



ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ  
ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ ΓΙΑ ΤΙΣ  
ΑΚΑΔΗΜΙΕΣ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

# ΚΑΥΣΙΜΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

ΤΡΙΑΝΤΑΦ. Ι. ΠΑΠΑΕΥΑΓΓΕΛΟΥ  
Επιμέλεια δ' έκδοσης Γεώργιος Μαΐστρος

δ' έκδοση

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ  
ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ



ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ  
ΑΚΑΔΗΜΙΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ



ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΤΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

# ΚΑΥΣΙΜΑ-ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

ΤΡΙΑΝΤΑΦ. Ι. ΠΑΠΑΕΥΑΓΓΕΛΟΥ

Χημικού  
Αρχιπλοιάρχου Π.Ν. ε.α.  
Καθηγητή Ναυτικών Σχολών Π.Ν. και Ε.Ν.

Επιμέλεια Γεωργίου Μαϊστρου  
Δρ. Χημικού Μηχανικού  
Διδάσκοντα ΑΕΝ Μηχανικών Χίου

Δ' ΕΚΔΟΣΗ

1954

ΑΘΗΝΑ  
2022



Α΄ ΕΚΔΟΣΗ 1972

Β΄ ΕΚΔΟΣΗ 1986

Γ΄ ΕΚΔΟΣΗ 1995

Δ΄ ΕΚΔΟΣΗ 2022

ISBN: 978-960-337-182-3

Copyright © 2022 Ίδρυμα Ευγενίδου

Απαγορεύεται η ολική ή μερική ανατύπωση του βιβλίου και των εικόνων με κάθε μέσο καθώς και η διασκευή, η προσαρμογή, η μετατροπή και η κυκλοφορία του (Άρθρο 3 του Ν. 2121/1993).

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Το 1952 ο Ευγένιος Ευγενίδης (1882-1954) όρισε με τη διαθήκη του τη σύσταση του Ιδρύματος Ευγενίδου, του οποίου ως μοναδικό σκοπό έταξε «να συμβάλῃ εἰς τὴν ἐκπαίδευσιν νέων ἑλληνικῆς ὑψηκοῦτητος ἐν τῷ ἐπιστημονικῷ καὶ τεχνικῷ πεδίῳ». Ο ιδρυτής και χορηγός του Ιδρύματος Ευγενίδου ορθά προέβλεψε ότι αναγκαίο παράγοντα για την πρόοδο της Ελλάδος αποτελεί η άρτια κατάρτιση των Ελλήνων τεχνιτών κατά τα πρότυπα της επαγγελματικής εκπαίδευσης άλλων ευρωπαϊκών χωρών.

Την 23η Φεβρουαρίου του 1956 εγκρίθηκε η σύσταση του κοινωφελούς Ιδρύματος Ευγενίδου, την διοίκηση και διαχείριση του οποίου κατά την ρητή επιθυμία του ιδρυτή του ανέλαβε η αδελφή του Μαριάνθη Σίμου (1895-1981). Τότε ξεκίνησε η υλοποίηση του σκοπού του Ιδρύματος και η εκπλήρωση μίας από τις βασικότερες ανάγκες του εθνικού μας βίου από την Μαριάνθη Σίμου και τους επιστημονικούς συνεργάτες της.

Το έργο της Μαριάνθης Σίμου συνέχισε από το 1981 ο πολύτιμος συνεργάτης και διάδοχος του Ευγενίου Ευγενίδη, Νικόλαος Βερνίκος-Ευγενίδης (1920-2000). Από το 2000 το έργο του Ιδρύματος Ευγενίδου συνεχίζει ο Λεωνίδας Δημητριάδης-Ευγενίδης, ο οποίος υλοποιεί τον σκοπό του Ιδρύματος προσαρμόζοντας το όραμα του ιδρυτή του στις σύγχρονες εξελίξεις.

Μία από τις πρώτες δραστηριότητες του Ιδρύματος Ευγενίδου, ευθύς μετά την ίδρυσή του, υπήρξε η συγγραφή και έκδοση εκπαιδευτικών βιβλίων για τους μαθητές των τεχνικών σχολών, καθώς διαπιστώθηκε ότι αποτελεί πρωταρχική ανάγκη ο εφοδιασμός τους με σειρές από βιβλία, τα οποία θα έθεταν τα ορθά θεμέλια για την παιδεία τους και θα αποτελούσαν συγχρόνως πολύτιμη βιβλιοθήκη για κάθε τεχνικό. Καρπός αυτής της δραστηριότητας είναι η Βιβλιοθήκη του Τεχνίτη, η οποία αριθμεί 32 τίτλους, η Βιβλιοθήκη του Τεχνικού, που περιλαμβάνει 50 τίτλους, η Τεχνική Βιβλιοθήκη με 11 τίτλους και η Βιβλιοθήκη του Τεχνικού Βοηθού Χημικού με 3 τίτλους. Επιπλέον, από το 1977 μέχρι σήμερα έχουν εκδοθεί 171 τίτλοι για τους μαθητές των Τεχνικών και Επαγγελματικών Λυκείων και 16 για τους μαθητές των Σχολών Μέσης Τεχνικής και Επαγγελματικής εκπαίδευσης.

Ξεχωριστή σειρά βιβλίων του Ιδρύματος Ευγενίδου αποτελεί η Βιβλιοθήκη του Ναυτικού (1967 έως σήμερα), η οποία είναι το αποτέλεσμα της συνεργασίας του Ιδρύματος Ευγενίδου με την Διεύθυνση Εκπαίδευσης Ναυτικών του Υπουργείου Ναυτιλίας. Η συγγραφή και έκδοση των εκπαιδευτικών βιβλίων για τους σπουδαστές των ναυτικών σχολών ανατέθηκε στο Ίδρυμα Ευγενίδου με την υπ' αριθμ. 61288/5031/9.8.1966 απόφαση του Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας, οπότε και λειτούργησε η αρμόδια Επιτροπή Εκδόσεων, η οποία είχε συσταθεί ήδη από το 1958. Η συνεργασία Ιδρύματος Ευγενίδου και Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας ανανεώθηκε και επικαιροποιήθηκε με Υπουργικές Αποφάσεις το 1999 και το 2005, με τις οποίες το ΥΕΝ ανέθεσε στο Ίδρυμα Ευγενίδου την συγγραφή των εκπαιδευτικών βοηθημάτων για τις Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού (Α.Ε.Ν.). Η ανάθεση της αρμοδιότητας για την έκδοση των διδακτικών βιβλίων για τις Ακαδημίες επαναβεβαιώθηκε με νομοθετική ρύθμιση τον Μάρτιο του 2020 (Ν. 4676).

Στην Βιβλιοθήκη του Ναυτικού περιλαμβάνονται 149 διδακτικά βιβλία ναυτικής εκπαίδευσης, καθώς και σχετικές έρευνες και πρακτικά συνεδρίων. Όλα τα βιβλία της Βιβλιοθήκης του Ναυτικού ανταποκρίνονται στις ανάγκες των σπουδαστών των ΑΕΝ και είναι γενικότερα χρήσιμα για όλους τους αξιωματικούς του Εμπορικού Ναυτικού, που ασκούν το επάγγελμα ή εξελίσσονται στην ιεραρχία. Επιπλέον οι συγγραφείς και η Επιτροπή Εκδόσεων καταβάλλουν κάθε προσπάθεια ώστε τα διδακτικά βιβλία να είναι επιστημονικώς άρτια, να επικαιροποιούνται με βάση τα εκάστοτε αναλυτικά προγράμματα σπουδών των Α.Ε.Ν. και να παραμένουν συμβατά με τις μεταβαλλόμενες διεθνείς απαιτήσεις.

Η διαχρονική συμβολή του Ιδρύματος Ευγενίδου στη Ναυτική Εκπαίδευση επιτυγχάνεται όχι μόνο με την έκδοση των σχετικών εκπαιδευτικών βιβλίων αλλά και με δωρεές στις Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού, υποτροφίες σε αξιωματικούς του Λιμενικού Σώματος, εκπόνηση μελετών/ερευνών και διεξαγωγή

συνεδρίων για την ναυτική εκπαίδευση και την ναυτιλία γενικότερα, καθώς και παροχή πρόσβασης σε κορυφαίες ναυτιλιακές βάσεις δεδομένων μέσω της Βιβλιοθήκης του.

Με την προσφορά των εκδόσεών του στους καθηγητές, στους σπουδαστές των ΑΕΝ και σε όλους τους αξιωματικούς του Εμπορικού Ναυτικού, αλλά και με την πληθώρα εκδόσεων για Τεχνικούς, το Ίδρυμα Ευγενίδου συνεχίζει να συμβάλλει στην τεχνική εκπαίδευση της Ελλάδος, υλοποιώντας επί 60 και πλέον χρόνια το όραμα του ιδρυτή του, αείμνηστου ευεργέτη Ευγένιου Ευγενίδη.

## ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

**Ιωάννης Γκόλιας**, Καθηγητής ΕΜΠ, Πρόεδρος.

**Αχιλλέας Ματσάγγος**, Αντιναύαρχος Λ.Σ. (ε.α.).

**Γεώργιος Γεωργούλης**, Πλοίαρχος Α' Ε.Ν., Ε.Δι.Π. Παν/μίου Αιγαίου.

**Ελευθέριος Πετρόπουλος**, Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., Υπ. Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής.

**Χρήστος Βαγιωνάκης**, Προϊστάμενος Τμήματος Κανονισμών και Εκπαιδευτικών Προγραμμάτων, Υπ. Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής.

Γραμματέας της Επιτροπής, **Ελευθερία Τελειώνη**.

### Διατελέσαντα μέλη της Επιτροπής

Πρόεδροι

*Α. Παπιάς* (1955-1983) καθηγητής ΕΜΠ, *Μ. Αγγελόπουλος* (1983-2003) ομ. καθηγητής ΕΜΠ, *Α. Σταυρόπουλος* ομ. καθηγητής Πανεπ. Πειραιώς (2003-2008), *Ε. Δρης*, ομ. Καθηγητής ΕΜΠ (2008-2020)

Λοιπά μέλη

*Γ. Κακριδής* (1955-1959) Καθηγητής ΕΜΠ, *Α. Καλογεράς* (1957-1970) Καθηγητής ΕΜΠ, *Χ. Καβουνίδης* (1955-1984) Μηχ. Ηλ. ΕΜΠ, *Μ. Αγγελόπουλος* (1970-1983), ομ. Καθηγητής ΕΜΠ, *Σπ. Γουλιέλμος* (1958) Αντιπλοίαρχος, *Ξ. Αντωνιάδης* (1959-1966) Αντιπλοίαρχος, Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Γ. Τσακίρης* (1967-1969) Πλοίαρχος, Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ελλ. Σίδερης* (1967-1969) Υποναύαρχος, *Π. Φουστέρης* (1969-1971) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αλ. Μοσχονάς* (1971-1972) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Χρυσανθακόπουλος* (1972-1974) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αθαν. Σωτηρόπουλος* (1974-1977) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Σπαρτιώτης* (1977) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., προσωρινός Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Θ. Πουλάκης* (1977-1979) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Λυκούδης* (1979-1981) Πλοίαρχος Λ. Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αναστ. Δημαράκης* (1981-1982) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Τσαντήλας* (1982-1984) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ε. Τζαβέλας* (1984-1986) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Γρηγοράκος* (1986-1988) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Μπαρκατσάς* (1988-1989) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Παπαναστασίου* (1989) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Λάμπρου* (1989-1992) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Κοκορέτσας* (1992-1993) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μαρκάκης* (1993-1994) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Ζουμπούλης* (1994-1995) Πλοίαρχος Λ.Σ., *Φ. Ψαρράς* (1995-1996) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Καλαρώνης* (1996-1998) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Θ. Ρεντζεπέρης* (1998-2000) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Στεφανάκης* (2000-2001) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μαρίνος* (2001) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Εξαρχόπουλος* (2001-2003) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μπριλάκης* (2003-2004) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ν. Θεμέλαρος* (2003-2004) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Κουβέλης* (2004-2005) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Δ. Βασιλάκης* (2005-2008) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Πετρόπουλος* (2008-2009) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Ματσάγγος* (2009-2011) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Σέρρης* (2011-2012) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Τζαβάρας*, (2004-2013) Αντιναύαρχος Λ.Σ. (Ε.Α.), *Ι. Τεγόπουλος* (1988-2013) ομ. Καθηγητής ΕΜΠ, *Α. Θεοφανόπουλος* (2012-2014) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Β. Καλλιπολίτου* (2014-2017) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ. Δ/ντρια Ναυτ. Εκπαιδ., *Σ. Μπέλλας* (2017-2018) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ. Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Τσελίκης* (2018-2019) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ. Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Βουτσινάς*, Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ..

### Σύμβουλοι επί των Εκδόσεων

*Δ.Γ. Νιάνιας* (1956-1965) Καθηγητής ΕΜΠ, *Κ. Αγγ. Μανάρης* (1966-2018), ομ. Καθηγ. Φιλοσ. Σχολής του Πανεπιστημίου Αθηνών.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ανάγκη για την ανασυγγραφή του βιβλίου «ΚΑΥΣΙΜΑ - ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ» ανέκυψε ύστερα από την αναπροσαρμογή του προγράμματος διδασκαλίας του μαθήματος στις Σχολές Ε.Ν., που εκπονήθηκε από το Υ.Ε.Ν.

Στα περισσότερα σημεία το βιβλίο βασίστηκε στην έκδοση του Ιδρύματος Ευγενίδου (1993), ενώ σε άλλα χρειάστηκε είτε η προσαρμογή είτε η συμπλήρωση κεφαλαίων, ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του νέου προγράμματος.

Ειδικότερα,

α) Το «Περί Καύσης» κεφάλαιο (2) εμπλουτίστηκε με περισσότερα στοιχεία ως προς τον παράγοντα AFR (αναλογία αέρα προς καύσιμο) και ως προς τη σύσταση των καυσαερίων, που περιλαμβάνονται στο Νέο Κανονισμό Εκπαιδύσεως για την ΑΔΣΕΝ. Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφονται οι σπουδαιότεροι αναλυτές καυσαερίων (ORSAT, RANAVEX, FYRITE κτλ).

β) Έγινε διόρθωση των προδιαγραφών στα σπουδαιότερα καύσιμα (βενζίνες, πετρέλαιο) σύμφωνα με τα τελευταία δεδομένα της Ελληνικής Νομοθεσίας και της Ε. Ε. γενικότερα.

γ) Προστέθη νέο Κεφάλαιο «Ρύπανση περιβάλλοντος λόγω καύσης» (24), η συγγραφή του οποίου βασίστηκε στα στοιχεία που ευγενώς παραχωρήθηκαν από τη Διεύθυνση Περιβάλλοντος του ΥΠΕΧΩΔΕ προς την οποία – και ειδικότερα την κυρία Μ. Φρούσου – εκφράζονται θερμές ευχαριστίες.

Επειδή όμως η παρούσα έκδοση αποσκοπεί στη συγγραφή ενός βιβλίου, το οποίο, εκτός από τις απαιτήσεις ενός εκπαιδευτικού κειμένου, θα μπορούσε να αποτελέσει και βοήθημα για το μηχανικό του Ε.Ν. στην επαγγελματική του σταδιοδρομία, γι' αυτό ο συγγραφέας έχει κατ' ανάγκη επεκταθεί και σε άλλα θέματα. Τα θέματα αυτά βέβαια δεν προβλέπονται από το ισχύον εκπαιδευτικό πρόγραμμα του Υ.Ε.Ν., θεωρήθηκαν όμως απαραίτητα για τη γενικότερη επαγγελματική μόρφωση του μηχανικού του Ε.Ν., αλλά και για την ενημέρωση στις νεότερες εξελίξεις στον τομέα της Τεχνολογίας των Καυσίμων και Λιπαντικών.

Μερικά από τα Κεφάλαια αυτά, όπως π.χ. το κεφ. 11 «Στερεά καύσιμα» και το κεφ. 13 «Καύσιμα πυραύλων» έχουν στοιχειοθετηθεί με μικρότερα τυπογραφικά στοιχεία, ώστε ο διδάσκων κατά την κρίση του να τα αναπτύσσει προς τους μαθητές, υποκινώντας συνάμα το ενδιαφέρον για θέματα καθημερινής επικαιρότητας.

Θερμές ευχαριστίες αισθάνομαι την υποχρέωση να απευθύνω προς το Ίδρυμα Ευγενίδου για την άρτια έκδοση του βιβλίου και προς το σεβαστό μου καθηγητή κ. Γ. Κυριακόπουλο του Ε.Μ.Π. για τις πολύτιμες συμβουλές, διορθώσεις και υποδείξεις πάνω στην επιστημονική βάση του συγγράμματος.

Ο συγγραφέας



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ Δ΄ ΕΚΔΟΣΗΣ

Η επικαιροποίηση του βιβλίου «ΚΑΥΣΙΜΑ - ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ» κατέστη αναγκαία λόγω των σημαντικών πρόσφατων αλλαγών σε κανονισμούς χρήσης ναυτιλιακών καυσίμων ως απόρροια της εφαρμογής περιβαλλοντικών πρωτοκόλλων στη ναυτιλία, καθώς και λόγω της προσαρμογής του προγράμματος διδασκαλίας του μαθήματος στις Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού σε πρακτικά θέματα που αντιμετωπίζει ο μηχανικός Ε.Ν κατά την εκτέλεση των καθηκόντων του.

Η επικαιροποίηση βασίστηκε στην προηγούμενη έκδοση του βιβλίου και πραγματοποιήθηκε διατηρώντας τη δομή, αφαιρώντας κεφάλαια και εμπλουτίζοντας άλλα, ώστε να ανταποκρίνονται στους στόχους της επικαιροποίησης.

Ειδικότερα:

α) Αφαιρέθηκαν τα καύσιμα αεριοστροβίλων, τα καύσιμα πυραύλων, τα συστήματα λίπανσης και έγινε σύντμηση στις περιγραφές άλλων περιπτώσεων λίπανσης.

β) Ανανεώθηκαν σημαντικά με σύγχρονο υλικό και νέες προδιαγραφές τα κεφάλαια περί ενέργειας, υγρών καυσίμων, παραγωγής και επεξεργασίας του φυσικού πετρελαίου, της βενζίνης και του πετρελαίου diesel, των ναυτιλιακών καυσίμων και του ελέγχου ποιότητας καυσίμων και λιπαντικών.

Επίσης, αναβαθμίστηκε και το κεφάλαιο για τη ρύπανση περιβάλλοντος από τα καύσιμα.

Τέλος, προστέθηκαν αρκετά παραδείγματα και ασκήσεις πάνω στα υπολογιστικά θέματα των καυσίμων και των λιπαντικών.

Θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες προς την Επιτροπή Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου για τις υποδείξεις της με σκοπό την επιστημονική τεκμηρίωση της επικαιροποιημένης μορφής του παρόντος συγγράμματος, καθώς και τον ομότιμο καθηγητή ΕΜΠ Μάριο Τσέζο για τις εύστοχες παρατηρήσεις του σχετικά με τις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα των καυσίμων. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνεργάτες της Ομάδας Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου για την αρμονική συνεργασία και την υποστήριξη του έργου μου.

Γεώργιος Μαϊστρος

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ:

### Ενέργεια

|   |   |
|---|---|
| 1.1 Γενικά .....                                    | 1 |
| 1.2 Η ενέργεια ως δείκτης ανάπτυξης μιας χώρας..... | 1 |
| 1.3 Μονάδες ενέργειας .....                         | 2 |
| 1.4 Οι σπουδαιότερες πηγές ενέργειας.....           | 2 |
| 1.4.1 Στερεά καύσιμα.....                           | 2 |
| 1.4.2 Υγρά καύσιμα.....                             | 3 |
| 1.4.3 Αέρια καύσιμα.....                            | 3 |
| 1.4.4 Πυρηνική ενέργεια .....                       | 3 |
| 1.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....               | 4 |
| 1.5.1 Η ηλιακή ενέργεια .....                       | 4 |
| 1.5.2 Γεωθερμική ενέργεια.....                      | 5 |
| 1.5.3 Ενέργεια από τη θάλασσα.....                  | 5 |
| 1.5.4 Ενέργεια ανέμου (αιολική ενέργεια) .....      | 6 |
| 1.6 Άλλες πηγές ενέργειας .....                     | 6 |
| 1.6.1 Βιοκαύσιμα .....                              | 6 |
| 1.6.2 Αμμωνία .....                                 | 7 |
| 1.6.3 Κυψέλες καυσίμου .....                        | 7 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ:

### Γενικά περί καύσης

|   |    |
|---|----|
| 2.1 Καύση – καύσιμα.....                                  | 8  |
| 2.2 Κατάταξη των καυσίμων .....                           | 8  |
| 2.3 Είδη καύσης.....                                      | 9  |
| 2.4 Τέλεια καύση .....                                    | 9  |
| 2.5 Ατελής καύση.....                                     | 10 |
| 2.6 Αναλογία αέρα προς καύσιμο (Air-Fuel Ratio – AFR).... | 10 |
| 2.6.1 Υπολογισμός της AFR .....                           | 10 |
| 2.6.2 Σύσταση καυσαερίων .....                            | 11 |
| 2.7 Ανάφλεξη .....  | 12 |
| 2.8 Αναλυτές καυσαερίων .....                             | 13 |
| 2.9 Δείγματα καυσαερίων .....                             | 16 |
| 2.10 Αυτανάφλεξη.....                                     | 16 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 2.11 Απώλειες καύσης ..... | 17 |
|----------------------------|----|

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ:

### Υγρά καύσιμα - Πρόελευση και συστατικά

|   |    |
|---|----|
| 3.1 Κατάταξη των υγρών καυσίμων.....  | 18 |
| 3.2 Το φυσικό πετρέλαιο.....  | 18 |
| 3.3 Ελληνικά πετρέλαια.....   | 19 |
| 3.4 Ιδιότητες του φυσικού πετρελαίου .....  | 19 |
| 3.5 Σύσταση του πετρελαίου.....   | 20 |
| 3.5.1 Υδρογονάνθρακες.....  | 20 |
| 3.5.2 Κατάταξη των υδρογονανθράκων<br>ως προς τη δομή του μορίου .....            | 20 |
| 3.5.3 Κατάταξη των υδρογονανθράκων<br>ως προς τον βαθμό κορεσμού του μορίου ..... | 21 |
| 3.6 Ισομέρεια.....  | 22 |
| 3.7 Άλλα συστατικά των προϊόντων του πετρελαίου.....                              | 23 |
| 3.8 Πρόελευση του πετρελαίου.....   | 23 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ:

### Παραγωγή και επεξεργασία του πετρελαίου

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Γενικά .....   | 25 |
| 4.2 Έρευνα για την ανακάλυψη κοιτασμάτων<br>πετρελαίου ..... | 25 |
| 4.3 Παραγωγή (ανόρυξη) .....                                 | 26 |
| 4.4 Επεξεργασία του πετρελαίου.....                          | 26 |
| 4.5 Διύλιση.....   | 27 |
| 4.6 Προϊόντα του φυσικού πετρελαίου.....                     | 28 |
| 4.6.1 Αέρια.....   | 29 |
| 4.6.2 Βενζίνες .....   | 29 |
| 4.6.3 Κηροζίνη ή φωτιστικό πετρέλαιο .....                   | 29 |
| 4.6.4 Πετρέλαιο diesel (gasoil).....                         | 29 |
| 4.6.5 Μαζούτ .....   | 29 |
| 4.7 Διεργασίες μετά τον διαχωρισμό.....                      | 30 |
| 4.7.1 Αναμόρφωση της νάφθας .....                            | 30 |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 4.7.2 Εξευγενισμός .....          | 30 |
| 4.7.3 Πυρόλυση .....              | 31 |
| 4.7.4 Κατεργασία των αερίων ..... | 31 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ:

### Βενζίνη

|  |    |
|--|----|
| 5.1 Γενικά .....   | 33 |
| 5.2 Ιδιότητες – Προδιαγραφές.....                              | 33 |
| 5.3 Πτητικότητα.....   | 34 |
| 5.3.1 Χαμηλή πτητικότητα .....                                 | 35 |
| 5.3.2 Υψηλή πτητικότητα.....                                   | 35 |
| 5.4 Ποιότητα καύσης – Αριθμός οκτανίου .....                   | 35 |
| 5.4.1 Επίδραση της ποιότητας του καυσίμου<br>στο κτύπημα ..... | 37 |
| 5.4.2 Επίδραση της μηχανής στο κτύπημα .....                   | 38 |
| 5.5 Βαθμός καθαρότητας.....                                    | 40 |
| 5.5.1 Θειούχες ενώσεις .....                                   | 40 |
| 5.5.2 Κομμώδεις ουσίες .....                                   | 40 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ:

### Πετρέλαιο diesel

|  |    |
|--|----|
| 6.1 Γενικά .....   | 41 |
| 6.2 Ποιότητα καύσης - Αριθμός κετανίου .....                                       | 42 |
| 6.3 Μέτρηση του αριθμού κετανίου .....   | 45 |
| 6.3.1 Άμεσοι ή μηχανικοί τρόποι μέτρησης<br>του αριθμού κετανίου.....              | 45 |
| 6.3.2 Έμμεσοι ή εργαστηριακοί τρόποι μέτρησης<br>του αριθμού κετανίου.....         | 46 |
| 6.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το κτύπημα<br>στις πετρελαιομηχανές .....            | 46 |
| 6.4.1 Ταχύτητα περιστροφής .....   | 46 |
| 6.4.2 Συμπύεση .....   | 46 |
| 6.4.3 Στροβιλισμός .....   | 47 |
| 6.4.4 Προπορεία έγχυσης.....   | 47 |
| 6.4.5 Υπερπλήρωση.....   | 47 |
| 6.4.6 Φορτίο .....   | 47 |
| 6.5 Συνέπειες από τη χρήση καυσίμου με<br>αντικανονικό αριθμό κετανίου .....       | 47 |
| 6.5.1 Καύσιμα με αριθμό κετανίου μικρότερο<br>από τον κανονικό (υποκετανικά) ..... | 47 |

|   |    |
|---|----|
| 6.5.2 Καύσιμα με αριθμό κετανίου μεγαλύτερο<br>του κανονικού (υπερκετανικά) ..... | 48 |
| 6.6 Ιδιότητες του πετρελαίου diesel .....   | 48 |
| 6.6.1 Ιξώδες.....   | 48 |
| 6.6.2 Πτητικότητα.....  | 48 |
| 6.6.3 Περιεκτικότητα θειούχων ενώσεων.....  | 49 |
| 6.6.4 Σημείο ανάφλεξης.....   | 50 |
| 6.6.5 Βαθμός καθαρότητας .....  | 50 |
| 6.6.6 Εξανθράκωμα .....   | 50 |
| 6.6.7 Σημείο ροής .....   | 50 |
| 6.6.8 Πυκνότητα .....   | 50 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ:

### Υπολειμματικά καύσιμα (μαζούτ)

|   |    |
|---|----|
| 7.1 Γενικά .....                            | 51 |
| 7.2 Ιδιότητες του μαζούτ .....              | 51 |
| 7.2.1 Ιξώδες.....                           | 51 |
| 7.2.2 Θείο .....                            | 52 |
| 7.2.3 Σταθερότητα.....                      | 52 |
| 7.3 Ελληνικές προδιαγραφές του μαζούτ ..... | 53 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ:

### Ναυτιλιακά καύσιμα

|   |    |
|---|----|
| 8.1 Γενικά – Μηχανές πρόωσης και κατανάλωση<br>καυσίμου .....         | 54 |
| 8.2 Κατάταξη των ναυτιλιακών καυσίμων .....                           | 55 |
| 8.3 Ποιοτική κατηγοριοποίηση – πρότυπο ISO 8217 .....                 | 56 |
| 8.4 Σημασία των προδιαγραφών .....                                    | 59 |
| 8.5 Η χρήση χαμηλής ποιότητας καυσίμου<br>στις μηχανές diesel .....   | 60 |
| 8.5.1 Σύστημα καθαρισμού.....   | 60 |
| 8.5.2 Ιξώδες.....   | 61 |
| 8.5.3 Ποιότητα καύσης (αριθμός κετανίου) .....                        | 62 |
| 8.5.4 Μεταλλικές προσμείξεις .....                                    | 62 |
| 8.5.5 Περιεκτικότητα σε θείο .....                                    | 63 |
| 8.6 Βελτίωση της ποιότητας του πετρελαίου με<br>χημικά πρόσθετα ..... | 66 |
| 8.6.1 Διασκορπιστικά – Σταθεροποιητικά πρόσθετα....                   | 67 |
| 8.6.2 Απογαλακτωματοποιητικά πρόσθετα .....                           | 67 |

|  |    |
|--|----|
| 8.6.3 Καταλύτες καύσης.....            | 68 |
| 8.6.4 Βελτιωτικά αριθμού κετανίου..... | 68 |
| 8.6.5 Τροποποιητές τέφρας.....         | 68 |
| 8.7 Το δίκτυο του καυσίμου.....        | 68 |
| 8.7.1 Δεξαμενές αποθήκευσης.....       | 68 |
| 8.7.2 Δεξαμενές χρήσης.....            | 69 |
| 8.7.3 Προθερμαντήρες.....              | 69 |
| 8.7.4 Φίλτρα.....                      | 69 |
| 8.7.5 Φυγοκεντρικός καθαρισμός.....    | 70 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ:

### Η καύση του πετρελαίου στις μηχανές diesel

|   |    |
|---|----|
| 9.1 Γενικά – Η χημεία της καύσης.....   | 75 |
| 9.2 Σημασία της καύσης.....   | 77 |
| 9.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την καύση του πετρελαίου σε μηχανές diesel..... | 77 |
| 9.3.1 Βαθμός συμπίεσης.....   | 77 |
| 9.3.2 Διασκορπισμός του καυσίμου.....   | 78 |
| 9.3.3 Διείσδυση.....  | 79 |
| 9.3.4 Χρόνος έγχυσης (προπορεία).....   | 79 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ:

### Στερεά καύσιμα

|   |    |
|---|----|
| 10.1 Είδη στερεών καυσίμων.....                         | 81 |
| 10.1.1 Ξυλάνθρακες.....                                 | 81 |
| 10.1.2 Κωκ.....   | 81 |
| 10.2 Γαιάνθρακες.....                                   | 81 |
| 10.3 Κύρια χαρακτηριστικά των γαιανθράκων.....          | 82 |
| 10.3.1 Θερμαντική ικανότητα.....                        | 82 |
| 10.3.2 Υγρασία.....                                     | 84 |
| 10.3.3 Πτητικά.....                                     | 84 |
| 10.3.4 Τέφρα.....                                       | 84 |
| 10.3.5 Θείο.....  | 84 |
| 10.3.6 Ανθεκτικότητα.....                               | 84 |
| 10.3.7 Πτητικά – Μόνιμος άνθρακας.....                  | 84 |
| 10.4 Η αυτανάφλεξη των γαιανθράκων.....                 | 85 |
| 10.5 Σημασία των γαιανθράκων ως πηγή ενέργειας.....     | 85 |
| 10.6 Αξιοποίηση του άνθρακα για παραγωγή ενέργειας..... | 85 |
| 10.6.1 Καύση σε στερεή μορφή.....                       | 85 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 10.6.2 Υγροποίηση του άνθρακα..... | 86 |
|------------------------------------|----|

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΔΕΚΑΤΟ: Αέρια καύσιμα

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 11.1 Σημασία των αερίων καυσίμων..... | 89 |
| 11.2 Φυσικό αέριο καύσιμα.....        | 89 |
| 11.3 Τεχνητά αέρια καύσιμα.....       | 90 |
| 11.3.1 Φωταέριο.....                  | 90 |
| 11.3.2 Υδατέριο.....                  | 90 |
| 11.3.3 Φτωχό αέριο.....               | 90 |
| 11.3.4 Υγραέριο.....                  | 91 |
| 11.3.5 Ακετυλένιο (ασετυλίνη).....    | 92 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΩΔΕΚΑΤΟ:

### Ποιοτικός έλεγχος των καυσίμων

|   |     |
|---|-----|
| 12.1 Η σημασία του ποιοτικού ελέγχου.....           | 93  |
| 12.2 Μακροσκοπική εξέταση – Βαθμός καθαρότητας..... | 93  |
| 12.3 Πυκνότητα (ειδικό βάρος).....                  | 94  |
| 12.3.1 Μέτρηση πυκνότητας.....                      | 94  |
| 12.3.2 Υπολογισμοί μάζας με βάση την πυκνότητα..... | 95  |
| 12.4 Ιξώδες.....                                    | 97  |
| 12.5 Απόσταση.....                                  | 98  |
| 12.6 Σημείο ανάφλεξης και σημείο καύσης.....        | 99  |
| 12.7 Θείο.....                                      | 101 |
| 12.8 Θερμαντική ικανότητα ή θερμογόνος δύναμη.....  | 102 |
| 12.9 Σημείο ροής.....                               | 105 |
| 12.10 Μέτρηση του νερού.....                        | 105 |
| 12.11 Εξανθράκωμα.....                              | 105 |
| 12.12 Σημείο ανιλίνης.....                          | 107 |
| 12.13 Βανάδιο.....                                  | 107 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΤΡΙΤΟ:

### Γενικά περί λίπανσης

|  |     |
|--|-----|
| 13.1 Σκοπός και σημασία της λίπανσης.....          | 108 |
| 13.2 Τριβή.....                                    | 108 |
| 13.3 Έργο τριβής – Απώλειες λόγω τριβής.....       | 109 |
| 13.4 Αποτελέσματα της τριβής.....                  | 110 |
| 13.5 Θεωρία της λίπανσης – Λιπαντική μεμβράνη..... | 110 |
| 13.6 Κατανομή των πιέσεων.....                     | 111 |

|   |     |
|---|-----|
| 13.7 Παράγοντες που επιδρούν στη λίπανση .....            | 112 |
| 13.8 Η ομαλή λειτουργία της μηχανής και το λιπαντέλαιο .. | 112 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΤΕΤΑΡΤΟ:

### Είδη λιπαντικών

|   |     |
|---|-----|
| 14.1 Τα γενικά χαρακτηριστικά ενός λιπαντικού ..... | 114 |
| 14.2 Κατάταξη των λιπαντικών .....                  | 114 |
| 14.3 Ορυκτέλαια .....                               | 117 |
| 14.4 Παραγωγή και επεξεργασία ορυκτελαίων .....     | 117 |
| 14.4.1 Απόσταση σε κενό .....                       | 117 |
| 14.4.2 Αποκρήρωση .....                             | 117 |
| 14.4.3 Κατεργασία με διαλύτες .....                 | 118 |
| 14.4.4 Αποχρωματισμός .....                         | 118 |
| 14.4.5 Χημικά πρόσθετα .....                        | 118 |
| 14.5 Συνθετικά λιπαντικά .....                      | 119 |
| 14.6 Στερεά λιπαντικά .....                         | 120 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΠΕΜΠΤΟ:

### Ποιοτικός έλεγχος των λιπαντικών

|   |     |
|---|-----|
| 15.1 Σκοπός και σημασία του ποιοτικού ελέγχου ..... | 122 |
| 15.2 Δειγματοληψία .....                            | 123 |
| 15.3 Μακροσκοπική εξέταση .....                     | 123 |
| 15.4 Ιξώδες .....                                   | 124 |
| 15.5 Δείκτης ιξώδους .....                          | 125 |
| 15.6 Σημείο ροής, σημείο νέφωσης .....              | 128 |
| 15.7 Αντοχή στην οξειδωση .....                     | 129 |
| 15.8 Αριθμός εξουδετέρωσης .....                    | 130 |
| 15.9 Εξανθράκωμα .....                              | 130 |
| 15.10 Συντελεστής αντοχής .....                     | 131 |
| 15.11 Πτητικότητα .....                             | 131 |
| 15.12 Βαθμός καθαρότητας .....                      | 132 |
| 15.13 Δοκιμή απογαλάκτωσης .....                    | 132 |
| 15.14 Μηχανικές δοκιμασίες .....                    | 133 |
| 15.15 Δοκιμές που μπορούν να γίνουν στο πλοίο ..... | 133 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΕΚΤΟ:

### Λίπανση ΜΕΚ

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 16.1 Γενικά για τη λίπανση ΜΕΚ ..... | 136 |
|--------------------------------------|-----|

|  |     |
|--|-----|
| 16.2 Λίπανση βενζινομηχανών .....                              | 137 |
| 16.2.1 Δίχρονες βενζινομηχανές .....                           | 137 |
| 16.2.2 Τετράχρονες βενζινομηχανές .....                        | 138 |
| 16.3 Λίπανση μηχανών diesel .....                              | 140 |
| 16.3.1 Γενικά για τη λίπανση των μηχανών diesel .....          | 140 |
| 16.3.2 Λίπανση τριβών .....                                    | 143 |
| 16.3.3 Λίπανση κυλίνδρου .....                                 | 144 |
| 16.3.4 Λίπανση στροβιλοφουσητήρων .....                        | 145 |
| 16.4 Προδιαγραφές λιπαντελαίων μηχανών diesel .....            | 145 |
| 16.5 Νεότερες εξελίξεις στη λίπανση των πετρελαιομηχανών ..... | 146 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΕΒΔΟΜΟ:

### Αλλοιώσεις των λιπαντικών κατά τη χρήση

|  |     |
|--|-----|
| 17.1 Αίτια των αλλοιώσεων .....                            | 148 |
| 17.1.1 Φυσιολογικά αίτια αλλοιώσεων των λιπαντικών .....   | 148 |
| 17.1.2 Λειτουργικά αίτια των αλλοιώσεων .....              | 149 |
| 17.2 Συνέπειες των αλλοιώσεων – Τρόπος αντιμετώπισης ..... | 150 |
| 17.3 Καθαρισμός του λιπαντικού κατά τη χρήση του .....     | 150 |
| 17.3.1 Φυγοκεντρικοί καθαριστήρες .....                    | 150 |
| 17.3.2 Φίλτρα .....  | 151 |
| 17.4 Αντικατάσταση του λιπαντικού .....                    | 153 |
| 17.5 Αναζωογόνηση των λιπαντελαίων .....                   | 153 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΟΓΔΩΟ:

### Λιπαντικά λίπη (γράσα)

|   |     |
|---|-----|
| 18.1 Γενικά .....                             | 156 |
| 18.2 Παραγωγή λιπαντικών λιπών (γράσων) ..... | 156 |
| 18.2.1 Πρώτες ύλες .....                      | 156 |
| 18.2.2 Διαδικασία παραγωγής .....             | 157 |
| 18.3 Κατάταξη των γράσων .....                | 157 |
| 18.3.1 Γράσα με σαπούνια ασβεστίου .....      | 157 |
| 18.3.2 Γράσα με σαπούνια νατρίου .....        | 157 |
| 18.3.3 Γράσα με σαπούνια αργιλίου .....       | 158 |
| 18.3.4 Γράσα με σαπούνια λιθίου .....         | 158 |
| 18.3.5 Γράσα με σαπούνια βαρίου .....         | 158 |
| 18.3.6 Γράσα με σαπούνια μολύβδου .....       | 158 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 18.4   | Ιδιότητες των γράσων. Ποιοτικός έλεγχος ..... | 159 |
| 18.4.1 | Σταθερότητα.....                              | 159 |
| 18.4.2 | Συνεκτικότητα .....                           | 159 |
| 18.4.3 | Φαινόμενο ιξώδες .....                        | 160 |
| 18.4.4 | Σημείο σταγόνας.....                          | 160 |
| 18.4.5 | Αντοχή στην οξειδωση.....                     | 161 |
| 18.4.6 | Αντίσταση στο νερό .....                      | 161 |
| 18.5   | Προδιαγραφές γράσων .....                     | 161 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΕΝΑΤΟ:

### Ρύπανση του περιβάλλοντος από καύσιμα

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 19.1   | Γενικά .....                                     | 162 |
| 19.2   | Ρυπαντές προερχόμενοι από τη χρήση καυσίμων..... | 162 |
| 19.3   | Συνέπειες της ρύπανσης .....                     | 163 |
| 19.3.1 | Οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) .....       | 163 |
| 19.3.2 | Οξειδία του θείου ( $\text{SO}_x$ ) .....        | 163 |
| 19.3.3 | Υδρογονάνθρακες.....                             | 163 |
| 19.3.4 | Μονοξειδίο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ).....      | 163 |
| 19.3.5 | Διοξειδίο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) .....    | 164 |
| 19.3.6 | Αιθάλη (καπνός) .....                            | 164 |
| 19.3.7 | Μόλυβδος.....                                    | 164 |
| 19.4   | Όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας .....             | 164 |

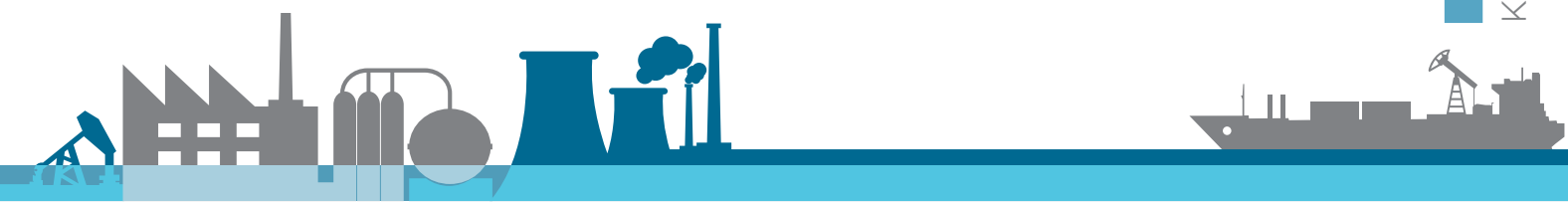
|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 19.4.1 | Διοξειδίο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) .....                         | 164 |
| 19.4.2 | Οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) .....                          | 165 |
| 19.4.3 | Αιωρούμενα σωματίδια (καπνός).....                                  | 165 |
| 19.4.4 | Όζον ( $\text{O}_3$ ).....  | 165 |
| 19.4.5 | Μονοξειδίο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ).....                         | 166 |
| 19.5   | Ρύπανση από ναυτικές μηχανές.....                                   | 166 |
| 19.6   | Τρόποι περιορισμού ρύπανσης από τις ναυτικές πετρελαιομηχανές ..... | 167 |
| 19.6.1 | Μείωση των $\text{NO}_x$ .....                                      | 167 |
| 19.6.2 | Μείωση $\text{SO}_x$ .....  | 168 |
| 19.6.3 | Αιωρούμενα σωματίδια (αιθάλη/καπνός).....                           | 168 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΙΚΟΣΤΟ:

### Πυρηνικά καύσιμα

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 20.1 | Γενικά .....  | 169 |
| 20.2 | Εξώθερμες πυρηνικές αντιδράσεις πρακτικού ενδιαφέροντος ..... | 169 |
| 20.3 | Πυρηνικοί αντιδραστήρες, πυρηνικά καύσιμα.....                | 171 |
| 20.4 | Πρόωση πλοίων με πυρηνική ενέργεια .....                      | 172 |
|      | Παραρτήματα .....   | 173 |
|      | Ευρετήριο .....   | 176 |





### 1.1 Γενικά

Η ενέργεια ορίζεται ως **η ικανότητα παραγωγής έργου**. Υπάρχει στη φύση υπό διάφορες μορφές (θερμική, κινητική, χημική, ηλεκτρική ενέργεια κλπ), που διέπονται από την **Αρχή αφθαρσίας της Ενέργειας**. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, **η ενέργεια ούτε δημιουργείται, ούτε καταστρέφεται, μπορεί όμως να μετατρέπεται από μια μορφή σε άλλη**. Με την καύση π.χ. η χημική ενέργεια των καυσίμων μετατρέπεται σε θερμότητα κι αυτή με μια θερμική μηχανή σε κινητική ενέργεια κ.ο.κ. Μπορεί συνεπώς κάποιος να συμπεράνει ότι ο Κόσμος είναι **προικισμένος** με μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας, που παραμένει σταθερή ανά τους αιώνες και που μπορεί ν' αλλάζει μόνο μορφή κατά τις διάφορες διεργασίες. Οι διεργασίες αυτές συντελούνται είτε μόνες τους (φύση), είτε με τη βοήθεια των μηχανών, που ο άνθρωπος έχει επινοήσει. Μ' αυτήν όμως την αλλαγή έχουμε μια υποβάθμιση της ενέργειας, δηλαδή ενέργεια **υψηλής στάθμης** μετατρέπεται σε ισοδύναμη ενέργεια **χαμηλής στάθμης**.

Νεότερες αντιλήψεις όμως, που έχουν διαμορφωθεί μετά την διάσπαση του ατόμου, συνδυάζουν την **Αρχή Αφθαρσίας της Ύλης** (Lavoisier) με την αρχή **Αφθαρσίας της Ενέργειας** σε μια γενικότερη διατύπωση, σύμφωνα με την οποία:

**«Το άθροισμα της ύλης και της ενέργειας, που αποτελεί την ουσία του Κόσμου είναι σταθερό».**

Πράγματι με τη διάσπαση του ατόμου έχει αποδειχθεί ότι είναι δυνατή η αλληλομετατροπή ύλης και ενέργειας, η οποία μάλιστα διέπεται από τη γνωστή εξίσωση του Einstein:

$$E = mc^2$$

που εφαρμόζεται κατά την παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας (βλ. § 2.2).

Όλες σχεδόν τις μορφές ενέργειας τις χρησιμοποιεί ο άνθρωπος είτε όπως τις βρίσκει στη Φύση (ηλιακή, αιολική ενέργεια) είτε μετατρέποντάς τις με τη βοήθεια των μηχανών (θερμική, ηλεκτρική ενέργεια) για να ικανοποιήσει τις ανάγκες του σε ενέργεια, που

ολοένα αυξάνονται. Ο σημερινός πολιτισμός βασίζεται στην ενέργεια, την οποία η ανθρωπότητα προσπαθεί να αντλήσει από όλες τις διαθέσιμες πηγές. Προβλέπεται (World Energy Outlook 2017) ότι το έτος 2025 οι ανάγκες της ανθρωπότητας σε ενέργεια θα φτάσουν τα 635 EJ που αντιστοιχούν σε 15,2 δισεκατομμύρια τόνους ισοδύναμους σε πετρέλαιο (Btoe). Οι ανάγκες αυτές αυξάνονται με ετήσιο ρυθμό 1%. Τα αποθέματα όμως ενέργειας υψηλής στάθμης της ανθρωπότητας ελαττώνονται και η αναπλήρωσή τους γίνεται με ρυθμό βραδύτερο από ό,τι η κατανάλωσή τους, οδηγώντας έτσι την ανθρωπότητα σε σοβαρή κρίση (την ενεργειακή κρίση). Το πρόβλημα αυτό της ενεργειακής κρίσης ελπίζεται ότι θα λυθεί με τη βοήθεια της επιστήμης, είτε με την ανακάλυψη νέων πηγών, είτε με την καλύτερη εκμετάλλευση των πηγών που ήδη υπάρχουν.

Είπαμε ότι η ενέργεια που υπάρχει στον κόσμο παραμένει άφθαρτη, άρα η ποσότητά της δεν ελαττώνεται. Κατά τις διάφορες όμως μετατροπές της μέσα στις μηχανές υποβαθμίζεται σε θερμική ενέργεια και μάλιστα χαμηλής θερμοκρασίας, που δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί και συνεπώς αχρηστεύεται. Γι' αυτό η έρευνα στρέφεται στην αναζήτηση πηγών ενέργειας, που εύκολα μπορούν να μετατραπούν σε θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας και τέτοιες πηγές είναι κυρίως τα καύσιμα (στερεά, υγρά και αέρια), που εξακολουθούν να δίνουν τα 75% της ολικής ενέργειας που καταναλώνει σήμερα η ανθρωπότητα.

### 1.2 Η ενέργεια ως δείκτης ανάπτυξης μιας χώρας

Μέτρο για το βαθμό ανάπτυξης μιας χώρας αποτελούν σήμερα δυο κυρίως παράγοντες:

- 1) Το ετήσιο κατά κεφαλή εισόδημα.
- 2) Η ετήσια κατά κεφαλή κατανάλωση ενέργειας.

Τα στοιχεία αυτά περιέχονται στον πίνακα 1.1, που έχει συνταχθεί από τη Διεθνή Υπηρεσία Ενέργειας το 2016 και κατατάσσει τις διάφορες χώρες κατά σειρά στάθμης ανάπτυξης με βάση τα στοιχεία αυτά, που σε γενικές γραμμές συμβαδίζουν χωρίς σημαντικές αποκλίσεις.



**Πίνακας 1.1**  
**Κατάταξη ανάπτυξης διαφόρων χωρών (2016)**

| Χώρα            | Ετήσιο ακαθάριστο κατά κεφαλή εισόδημα (δολ.) | Ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh/κάτοικο) |
|-----------------|---|---|
| Νορβηγία        | 62.988  | 67.659  |
| ΗΠΑ             | 58.540  | 79.130  |
| Κουβέιτ         | 54.834  | 106.750                                       |
| Ολλανδία        | 52.974  | 49.230  |
| Γερμανία        | 51.084  | 44.398  |
| Σουηδία         | 50.929  | 59.345  |
| Καναδάς         | 47.522  | 88.752  |
| Μεγάλη Βρετανία | 44.841  | 32.151  |
| Γαλλία          | 43.346  | 42.938  |
| Ισραήλ          | 37.555  | 32.306  |
| Ισπανία         | 37.377  | 29.905  |
| Πορτογαλία      | 31.119  | 24.791  |
| Ελλάδα          | 28.248  | 25.378  |
| Τουρκία         | 25.959  | 19.205  |
| Σερβία          | 15.578  | 21.625  |
| Βραζιλία        | 15.064  | 17.393  |
| Ν. Αφρική       | 12.840  | 31.348  |
| Κίνα            | 12.692  | 26.013  |
| Αίγυπτος        | 10.570  | 9.623   |
| Ινδία           | 5.464   | 7.403   |

### 1.3 Μονάδες ενέργειας

Αφού η ενέργεια ορίζεται ως η ικανότητα παραγωγής έργου, φυσικό είναι για τη μέτρησή της να χρησιμοποιούνται οι ίδιες μονάδες με τις οποίες μετρείται το έργο (Joule, kpm, ποδόλιβρο κ.λπ.). Στο Διεθνές Σύστημα μονάδων (Système International – SI) μονάδα ενέργειας είναι το Joule ( $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ ) και τα πολλαπλάσιά του:

$$1 \text{ kJ (kilojoule)} = 10^3 \text{ J}$$

$$1 \text{ MJ (megajoule)} = 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ GJ (gigajoule)} = 10^9 \text{ J}$$

$$1 \text{ TJ (terajoule)} = 10^{12} \text{ J}$$

$$1 \text{ PJ (petajoule)} = 10^{15} \text{ J}$$

$$1 \text{ EJ (exajoule)} = 10^{18} \text{ J}$$

Για τις διάφορες όμως μορφές ενέργειας εξακολου-

θούν να χρησιμοποιούνται οι παλιές επιμέρους μονάδες. Οι σπουδαιότερες από αυτές και οι σχέσεις τους με τη μονάδα του SI αναγράφονται στον πίνακα 1.2.

### 1.4 Οι σπουδαιότερες πηγές ενέργειας

Τα τεράστια ποσά ενέργειας που η ανθρωπότητα χρειάζεται για να καλύψει τις ανάγκες της και που το 2016 ήταν 575 EJ (13,76 δισεκατομμύρια τόνοι ισοδύναμοι σε πετρέλαιο, Btoe) (βλ. § 2.8) προέρχονται από διάφορες πηγές, από τις οποίες οι σπουδαιότερες εξετάζονται συνοπτικά παρακάτω:

#### 1.4.1 Στερεά καύσιμα

Ως **στερεά καύσιμα** χαρακτηρίζονται οι διάφορες κατηγορίες γαιανθράκων, που ως το 1960 βρισκόνταν στην πρώτη θέση σε ποσοστό συμμετοχής, οπότε και εκτοπίστηκαν από τα υγρά καύσιμα (πετρέλαιο). Τα αποθέματα των γαιανθράκων είναι τεράστια και υπολογίζονται σήμερα σε 8.000 δισεκατομμύρια τόνους που ισοδυναμούν με 180.200 EJ ενέργειας. Με βάση την ετήσια κατανάλωση των 7,2 δισεκατομμυρίων τόνων γαιάνθρακα, υπολογίζεται ότι τα αποθέματα γαιανθράκων με το σημερινό ρυθμό ανάλωσης επαρκούν για 1.100 χρόνια. Τα οικονομικώς εκμεταλλεύσιμα αποθέματα γαιανθράκων είναι πολύ λιγότερα και υπολογίζεται ότι με τα σημερινά δεδομένα επαρκούν για 150 χρόνια<sup>1</sup>.

Σήμερα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η βιομηχανία (κυρίως χάλυβα και τσιμέντου) αποτελούν την κύρια κατανάλωση γαιάνθρακα σε ποσοστό 62% και 32% αντίστοιχα της παγκόσμιας κατανάλωσης γαιάνθρακα. Το έτος 2040 το ποσοστό παραγωγής ενέργειας από άνθρακα θα κατέβει σε 15% από 20% που είναι σήμερα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της αύξησης των ποσοστών χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για να μειωθούν οι εκπομπές CO<sub>2</sub>

**Πίνακας 1.2**  
**Μονάδες ενέργειας**

| Μορφή ενέργειας    | Μονάδα       | Σχέση προς το SI                   |
|--------------------|--------------|------------------------------------|
| Θερμική ενέργεια   | Kcal<br>BTU  | 1 kcal = 4187 J<br>1 BTU = 1055 J  |
| Ηλεκτρική ενέργεια | kWh          | 1 kWh = 3,6 MJ                     |
| Κινητική ενέργεια  | kpm<br>ft.lb | 1 kpm = 9,81 J<br>1 ft.lb = 1,35 J |

<sup>1</sup> Ίδρυμα Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών, Ο Τομέας Ενέργειας στην Ελλάδα: Τάσεις, Προοπτικές και Προκλήσεις, Απρίλιος 2021.

στις οποίες τα στερεά καύσιμα συμβάλλουν σημαντικά. Ο άνθρακας θα χρησιμοποιείται με άλλη μορφή και με άλλα συστήματα καύσης, για τα οποία γίνεται λόγος στο κεφάλαιο 10.

#### 1.4.2 Υγρά καύσιμα

Πρόκειται κυρίως για τα προϊόντα του φυσικού πετρελαίου (βενζίνη, κηροζίνη, gasoil ή πετρέλαιο diesel, μαζούτ) που σήμερα καλύπτουν το 30% από τις ανάγκες της ανθρωπότητας σε ενέργεια. Η εξάπλωση των ΜΕΚ μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο και η χρησιμοποίησή τους για την κίνηση όλων των μεταφορικών μέσων (πλοία, τραίνα, αυτοκίνητα, αεροπλάνα), αλλά και πολλών βιομηχανικών μονάδων, που συνεχίζεται μέχρι σήμερα, έδωσαν τεράστια ώθηση στη βιομηχανία του πετρελαίου. Έτσι αυτή κατέλαβε δεσπόζουσα θέση στην οικονομία των διάφορων κρατών, επέβαλε τη δική της «γραμμή» στις τεχνικές εξελίξεις των θερμικών μηχανών και υπήρξε αιτία ή αφορμή πολέμων ή επηρέασε σημαντικά την έκβασή τους.

Τα αποθέματα κοιτασμάτων πετρελαίου εκτιμώνται σήμερα (2021) σε 1.700 δισεκατομμύρια βαρέλια περίπου. Με βάση την ετήσια κατανάλωση που παγκοσμίως ανέρχεται σε 34 δισεκατομμύρια βαρέλια περίπου, τα αποθέματα επαρκούν για 50 χρόνια, εφόσον φυσικά δεν ανακαλυφθούν και άλλα κοιτάσματα. Είναι βέβαιο πάντως ότι η σημασία του πετρελαίου ως πηγή ενέργειας θα μειώνεται συνεχώς και θα αντικαθίσταται από άλλες πηγές, καθώς τα αποθέματα θα εξαντλούνται και οι τιμές θα ανεβαίνουν.

#### 1.4.3 Αέρια καύσιμα

Το σπουδαιότερο από τα αέρια καύσιμα αυτά είναι το **φυσικό αέριο** ή **γαιαέριο**, που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο. Το φυσικό αέριο άλλοτε μεν εξάγεται μαζί με το φυσικό πετρέλαιο από τις πετρελαιοπηγές, γιατί είναι διαλυμένο σε αυτό υπό πίεση και κατόπιν αποχωρίζεται, άλλοτε δε εξάγεται ανεξάρτητα από το πετρέλαιο, από πηγές που περιέχουν μόνο γαιαέριο.

Το φυσικό αέριο είναι άριστο καύσιμο, τόσο για βιομηχανική χρήση, όσο και για κινητήριες μηχανές. Στις ΗΠΑ πυκνότατο δίκτυο αγωγών φυσικού αερίου εξυπηρετεί το 1/3 των ενεργειακών αναγκών, τόσο για βιομηχανικούς σκοπούς, όσο και για οικιακή χρήση. Αλλά και στην Ευρώπη υπάρχει μεγάλο δίκτυο φυσικού αερίου, που επεκτείνεται συνεχώς. Τελευταία κατασκευάζονται τεράστιοι αγωγοί, που θα μεταφέρουν από τη Σιβηρία προς την Ευρώπη 150 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου τον χρόνο.

Η σχετική αφθονία του, η ευελιξία στη χρήση και τα περιβαλλοντικά κέρδη καθιστούν το φυσικό αέριο ελκυστικό για τα μελλοντικά ενεργειακά συστήματα. Έτσι προβλέπεται ότι στο 2030 η ενέργεια από φυσικό αέριο θα φθάσει συνολικά τα 160 EJ καλύπτοντας το 25% των συνολικών αναγκών της ανθρωπότητας σε ενέργεια.

Στον πίνακα 1.3 παρουσιάζονται τα επιβεβαιωμένα αποθέματα φυσικού αερίου και η κατανομή τους στις διάφορες περιοχές της γης. Με βάση την ετήσια κατανάλωση των 3,63 τρισεκατομμυρίων κυβικών μέτρων το χρόνο, τα αποθέματα επαρκούν για 60 περίπου χρόνια.

**Πίνακας 1.3**  
**Αποθέματα φυσικού αερίου (2019)**

| Περιοχή                 | Φυσικό αέριο (τρις. κυβικά μέτρα) | %    |
|-------------------------|-----------------------------------|------|
| Βόρεια Αμερική          | 12                                | 5,45 |
| Νότια Αμερική           | 8                                 | 3,7  |
| Ευρώπη (χώρες ΟΟΣΑ)     | 5                                 | 2,3  |
| Πρώην Σοβιετική Ένωση   | 74                                | 34,3 |
| Μέση Ανατολή            | 80                                | 37   |
| Αφρική                  | 17                                | 7,9  |
| Άπω Ανατολή - Αυστραλία | 20                                | 9,8  |
| Σύνολο                  | 216                               | 100  |

#### 1.4.4 Πυρηνική ενέργεια

**Πυρηνική ενέργεια** ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται είτε κατά την διάσπαση των πυρήνων ατόμων βαρέων μετάλλων, όπως το ουράνιο (ενέργεια σχάσης), είτε κατά τη συνένωση πυρήνων ατόμων ελαφρών στοιχείων, όπως το υδρογόνο (ενέργεια σύντηξης). Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας αυτής απελευθερώνεται υπό μορφή θερμότητας, με την οποία μπορεί να λειτουργήσει μια εγκατάσταση ατμού, είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ατμοηλεκτρικοί σταθμοί) είτε για την πρόωση πλοίων. Παρά το γεγονός ότι η πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας εδώ και 60 χρόνια περίπου, το ποσοστό συμμετοχής της σύμφωνα με το World Nuclear Industry Reports (WNISR, 2021) βρισκόταν στο 10% και έχει πτωτική τάση κατά 4% ετησίως. Αυτό οφείλεται σε δυο λόγους:

1) Στο μέχρι τώρα υψηλό κόστος της παραγόμενης ενέργειας σε σύγκριση με την ενέργεια που παρά-

γεται από άλλες πηγές και κυρίως από τα συμβατικά καύσιμα.

2) Στην πιθανότητα κινδύνου μόλυνσης από τη ραδιενέργεια που εκλύεται κατά τη λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων.

Τα παγκόσμια αποθέματα πυρηνικών καυσίμων δεν είναι επακριβώς γνωστά. Τα μέχρι σήμερα εξακριβωμένα αποθέματα υπολογίζονται σε 25 δισεκατομμύρια τόνους ισοδύναμους σε πετρέλαιο (Btoe), δηλαδή είναι σχετικά μικρά<sup>2</sup>.

Αναλυτική περιγραφή της πυρηνικής ενέργειας (σύντηξη) δίδεται στην παράγραφο 2.2 και στο κεφάλαιο 14.

### 1.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν ν' αναφερθούν η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, και η ενέργεια από τη θάλασσα.

#### 1.5.1 Η ηλιακή ενέργεια

Αυτή η μορφή ενέργειας βασίζεται στην άμεση εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας που εκτιμάται σε  $1,1 \cdot 10^{29}$  MJ ετησίως, από τα οποία ένα ελάχιστο τμήμα, μόλις τα  $5,4 \cdot 10^{18}$  MJ, φθάνουν στην επιφάνεια της γης και από αυτά πάλι ένα πολύ μικρό μέρος αξιοποιείται για την παραγωγή ενέργειας.

Την ηλιακή ενέργεια εκμεταλλευόμαστε με τους εξής τρόπους:

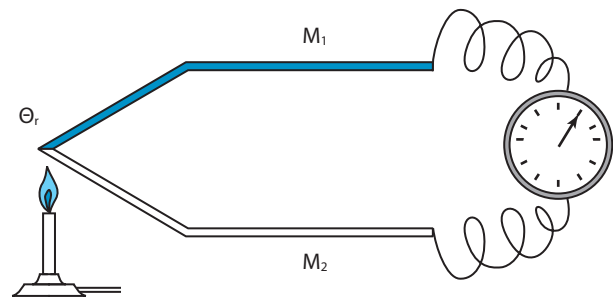
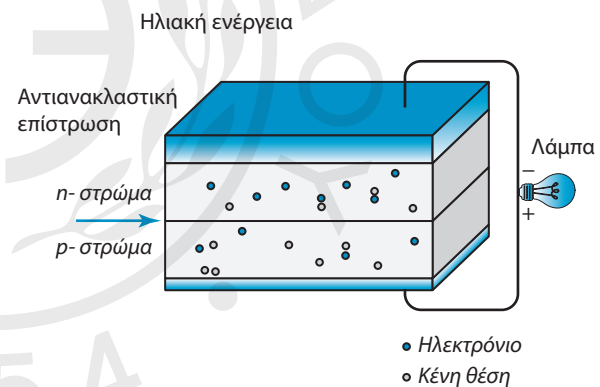
1) **Φωτοσύνθεση**, δηλαδή παραγωγή φυτικών υλών που μετατρέπονται σε ξύλα ή άνθρακες, που εντάσσονται στα στερεά καύσιμα. Ανέξοδες πρώτες ύλες (νερό και  $\text{CO}_2$ ) μετατρέπονται με τη βοήθεια της χλωροφύλλης και της ηλιακής ενέργειας σε στερεές καύσιμες ύλες, των οποίων η απόδοση βελτιώνεται ακόμη περισσότερο με τη χρήση χημικών λιπασμάτων.

2) **Υδατοπτώσεις**. Η ηλιακή ενέργεια προκαλεί την εξάτμιση νερού από την επιφάνεια της γης (θάλασσα, λίμνες, ποταμοί) και, μετά τη βροχόπτωση, σχηματίζονται φυσικοί καταρράκτες ή τεχνητές λίμνες, με φράγματα των οποίων η δυναμική ή η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη βοήθεια των υδροηλεκτρικών σταθμών (ΥΗΣ). Στην Ελλάδα υπάρχουν 15 μεγάλοι ΥΗΣ που εξασφαλίζουν σήμερα το 24% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η χώρα.

Σε παγκόσμια κλίμακα ο υδροηλεκτρισμός καλύπτει το 4% περίπου της ολικής ενέργειας.

3) **Φωτοβολταϊκά στοιχεία**. Η βασική αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Σε αυτό χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί, που είναι υλικά με ξεχωριστή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στον ημιαγωγό διαχωρίζονται τα φορτία σε p-στρώματα (δεκτικά σε θετικά φορτία) και σε n-στρώματα (δεκτικά σε αρνητικά φορτία) (σχ. 1.1). Σε αυτήν την κατηγορία υλικών η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε ατομικό επίπεδο ελέγχεται με μόνιμο (σταθερό) ή δυναμικό (χρονικά μεταβαλλόμενο) τρόπο. Αυτή η εξάρτηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας έχει σημασία όταν φωτόνια (από το φως της ηλιακής ακτινοβολίας) προσπέσουν στον ημιαγωγό που μετατρέπει την ενέργεια των φωτονίων σε ηλεκτρική ενέργεια.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιγράφεται ως εξής: Όταν τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας πέφτουν πάνω στον ημιαγωγό του φωτοβολταϊκού κελιού/στοιχείου περνούν χωρίς διαταραχή από την περιοχή των n-στρωμάτων και φτάνουν να χτυπήσουν τα άτομα της περιοχής των p-στρωμάτων. Αυτό



Σχ. 1.1

<sup>2</sup> World Energy Resources (2016).

προκαλεί τα ηλεκτρόνια της περιοχής των p-στρωμάτων να κινηθούν ανάμεσα στις κενές θέσεις για να φτάσουν και να συσσωρευθούν στην επαφή των δύο στρωμάτων, οπότε και σχηματίζουν μια δίοδο. Εκεί έλκονται από το θετικό πεδίο της διεπιφάνειας και περνώντας το ενεργειακό χάσμα αυτής της περιοχής κάνει την επιστροφή τους αδύνατη. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθεί ένα πλεόνασμα ηλεκτρονίων στην πλευρά του n-στρώματος, το οποίο μπορεί να παράγει τελικά ηλεκτρικό ρεύμα (ηλεκτρική ενέργεια) αν τοποθετήσουμε αγωγούς στα απέναντι άκρα του ημιαγωγού. Με αυτούς τους αγωγούς φτιάχνουμε τον αγωγίμο δρόμο για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται, όπως δείχνει το σχήμα 1.1.

Για να παράγουμε αξιοποιήσιμη ποσότητα ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα διατάσσουμε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία σε πάνελ και τα συνδέουμε κατάλληλα (σε σειρά ή παράλληλα). Τα πάνελ τοποθετούνται σε κατεύθυνση που δέχεται τη μέγιστη ηλιοφάνεια. Το ποσό της ηλιακής ενέργειας διαφέρει από τόπο σε τόπο. Για την Ελλάδα σε γενικές γραμμές η ηλιοφάνεια είναι μεγαλύτερη όσο πιο νότια βρισκόμαστε. Ενδεικτικά, ένα τυπικό κρυσταλλικό φωτοβολταϊκό πάνελ εκτείνεται σε 0,7 – 0,8 m<sup>2</sup> για κάθε 1kW ισχύος.

### 1.5.2 Γεωθερμική ενέργεια

Σύμφωνα με το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) γεωθερμία είναι «η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά και σε θερμά ξηρά πετρώματα».

Ενδεικτικά για την αξιοποίηση της γεωθερμίας στον πίνακα 1.4 αναφέρονται οι εφαρμογές σε συνάρτηση της θερμοκρασίας που επιτυγχάνουμε στα γεωθερμικά πεδία.

Πίνακας 1.4

| Θερμοκρασία γεωθερμίας (°C) | Εφαρμογή   |
|-----------------------------|--|
| 90                          | ηλεκτροπαραγωγή  |
| 60                          | βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. αφαλάτωση)                |
| 60                          | θέρμανση χώρων με καλοριφέρ                            |
| 60                          | ψύξη και κλιματισμός με αντλίες θερμότητας απορρόφησης |
| 40                          | θέρμανση χώρων με αερόθερμα                            |

|       |  |
|-------|--|
| 30    | ψύξη και κλιματισμός με υδρόψυκτες αντλίες θερμότητας          |
| 25    | θέρμανση χώρων με ενδοδαπέδιο σύστημα                          |
| 25    | θέρμανση θερμοκηπίων και εδαφών και για αντιπαγετική προστασία |
| 25-40 | θερμά λουτρά   |
| 15    | ιχθυοκαλλιέργειες  |

Η Ελλάδα έχει το πλεονέκτημα να διαθέτει πλήθος επιβεβαιωμένων γεωθερμικών πεδίων για εκμετάλλευση σε θερμικές εφαρμογές (όχι σε παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος), όπου τα πεδία βρίσκονται διάσπαρτα σε ολόκληρη τη χώρα (π.χ. στην Ν. Κεσσάνη Ξάνθη, στη Νιγρίτα Σερρών, στον Λαγκαδά και στη Θεσσαλονίκη, στην Ελαιοχώρα Χαλκιδικής). Στη νησιωτική χώρα αξιόλογα πεδία βρίσκονται στη Μήλο, στη Σαντορίνη, στη Νίσυρο, στη Στύψη και στην Άργεννο Λέσβου.

### 1.5.3 Ενέργεια από τη θάλασσα

Η θάλασσα περιέχει τεράστια αποθέματα ενέργειας, των οποίων η εκμετάλλευση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Από αυτούς σημαντικότεροι είναι: η **ενέργεια των παλιρροιών** και η **ενέργεια των κυμάτων**. Αναλυτικότερα:

#### 1) Ενέργεια των παλιρροιών

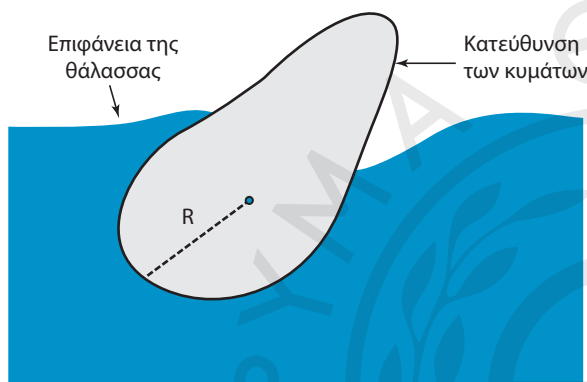
Η εκμετάλλευση της παλιρροιακής κίνησης της θάλασσας μπορεί να πραγματοποιηθεί με υδροστροβίλους. Ο τρόπος λειτουργίας τους είναι ανάλογος προς τη λειτουργία των υδροηλεκτρικών σταθμών σε τεχνητά φράγματα ή σε φυσικές υδατοπτώσεις.

Ο σημαντικότερος σταθμός παραγωγής ενέργειας των παλιρροιών, συνολικής ισχύος 240 MW, κατασκευάστηκε τη δεκαετία του 1960 στη γαλλική πόλη La Rance, και λειτουργεί έκτοτε με επιτυχία. Στη Δ Ευρώπη έχουν αξιοποιηθεί παλιρροϊκά ρεύματα στα στενά της Μάγχης και στην περιοχή της νότιας Ιρλανδίας. Στη Ν Ευρώπη τα σημαντικότερα ρεύματα βρίσκονται στην περιοχή της Μεσσίνας στη Σικελία, καθώς και στην Ελλάδα, με γνωστότερο το ρεύμα του Ευρίπου.

#### 2) Ενέργεια κυμάτων

Τα αποθέματα ενέργειας των κυμάτων μπορούν να

θεωρηθούν ανεξάντλητα. Ένας τρόπος αξιοποίησης της ενέργειας των κυμάτων απεικονίζεται στο σχήμα 1.2. Ο πλωτήρας R, καθώς δέχεται πλευρικά τη δύναμη των κυμάτων τίθεται σε περιστροφική κίνηση, την οποία μπορεί με κατάλληλη διάταξη να μετατρέψει σε ηλεκτρική ενέργεια. Παρόμοιοι πλωτήρες είναι ανοικτοί στο κάτω μέρος, που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και περιέχουν αέρα. Με τις κινήσεις των πλωτήρων που προκαλούνται από τις πλευρικές κρούσεις των κυμάτων, η πίεση του παγιδευμένου αέρα αυξομειώνεται ρυθμικά με τη βοήθεια κατάλληλης βαλβίδας και με τον πεπιεσμένο αέρα λειτουργεί στρόβιλος, που μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια.



Σχ. 1.2  
Παραγωγή ενέργειας από κύματα

Το κόστος όμως τέτοιων εγκαταστάσεων είναι πολύ υψηλό για τη λειτουργία σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σήμερα χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση σημαντήρων.

### 3) Ωκεανοθερμική ενέργεια

Αυτή στηρίζεται στη διαφορά θερμοκρασίας των στρωμάτων της θάλασσας.

#### 1.5.4 Ενέργεια ανέμου (αιολική ενέργεια)

Είναι από τις πιο παλιές μορφές ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε και εξακολουθεί μέχρι σήμερα να χρησιμοποιείται στους ανεμόμυλους και στα ιστιοφόρα πλοία.

Οι ανεμογεννήτριες είναι κατασκευές που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η αιολική ενέργεια βασίζεται στην κινητική ενέργεια του ανέμου που δίνεται από το γνωστό τύπο:

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

εξαρτάται συνεπώς από την ποσότητα του διατιθέμενου αέρα και από την ταχύτητά του. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στην **πρώτη**, γίνεται η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική μέσω της περιστροφής του άξονα της πτερωτής. Στη **δεύτερη** φάση γίνεται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας.

Σήμερα με την πρόοδο στις τεχνολογίες υλικών και παραγωγής κατασκευάζονται ανεμογεννήτριες με μήκος έλικας που ξεπερνάει τα 110 m.

Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής γίνεται με την εγκατάσταση αιολικού πάρκου που περιλαμβάνει διατεταγμένες ανεμογεννήτριες με τέτοιο τρόπο που να διασφαλίζεται η βέλτιστη μετατροπή της αιολικής ενέργειας. Στην Ελλάδα βρίσκουμε αιολικά πάρκα σε αρκετές περιοχές της Πελοποννήσου, της Κρήτης και της Εύβοιας αλλά και σε πάρα πολλά νησιά στο Αιγαίο. Για να παγιδευτεί η τεράστια ενέργεια του ανέμου που απαιτείται προκειμένου να παραχθεί από αυτή, με τη βοήθεια ανεμομύλων, υπολογίσιμη ηλεκτρική ενέργεια, πρέπει η κατασκευή των εγκαταστάσεων να είναι πάρα πολύ ισχυρή.

## 1.6 Άλλες πηγές ενέργειας

### 1.6.1 Βιοκαύσιμα

Με τον όρο **βιοκαύσιμα** ορίζουμε τα στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα που βασίζονται και προέρχονται από τη βιομάζα, δηλαδή το βιοδιασπώμενο κλάσμα προϊόντων ή αποβλήτων διαφόρων ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Τα βιοκαύσιμα βρίσκονται γύρω μας εδώ και λίγες δεκαετίες και αποτελούν αντικείμενο έρευνας των επιστημόνων που ειδικεύονται στις εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Η παραγωγή τους γίνεται από οργανικά και μάλιστα φυτικά προϊόντα, όπως το καλαμπόκι και τα ζαχαρότευτλα, γι' αυτό άλλωστε μπορούν να καταταγούν στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Έτσι, ως ανανεώσιμα καύσιμα προκαλούν στον συνολικό κύκλο ζωής τους χαμηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> ως προς τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα, όπως τα προϊόντα του φυσικού πετρελαίου. Τα πιο συνηθισμένα βιοκαύσιμα είναι το βιοντίζελ, η βιοαιθανόλη, το βιοαέριο, τα πέλλετς (pellets) και οι μπρικέτες (briquettes).

Για την χρήση τους ως εναλλακτικά καύσιμα στις μηχανές εσωτερικής καύσης μπορούν να αναμειχθούν με βενζίνη ή πετρέλαιο diesel. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των βιοκαυσίμων εξετάζονται κατά περίπτωση σε διάφορες εφαρμογές και αξιολογούνται για την περαιτέρω εμπορική τους χρήση.

Το βιοντίζελ αποτελείται από μεθυλεστέρες και

αιθυλεστέρες λιπαρών οξέων, που προέρχονται από παρθένα ή χρησιμοποιημένα φυτικά έλαια και ζωικά λίπη. Για τη διαδικασία παραγωγής του, χρησιμοποιείται μεθανόλη ή αιθανόλη που αντιδρά με τριγλυκερίδια. Οι πιο συνηθισμένες πρώτες ύλες είναι η ελαιοκράμβη και ο ηλίανθος, αλλά έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλα φυτικά έλαια, όπως σογιέλαιο, αραχιδέλαιο, ηλιέλαιο, ελαιόλαδο κακής ποιότητας, ακόμα και έλαια από μαγειρεία.

Αν και το βιοντίζελ είναι ένα δοκιμασμένο βιοκαύσιμο, φαίνεται να μην μπορεί ακόμη να ικανοποιήσει ούτε ένα μικρό ποσοστό της τρέχουσας ζήτησης καυσίμων, κυρίως στις μεταφορές. Γι' αυτό σήμερα πολλές εταιρείες προσπαθούν να παράγουν βιοντίζελ από μικροφύκη. Το πετρέλαιο diesel για την κίνηση είναι απαραίτητο να περιέχει ένα ποσοστό βιοντίζελ, κάτι που δίνει ώθηση στην αξιοποίηση αυτού του εναλλακτικού καυσίμου.

### 1.6.2 Αμμωνία

Η αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) είναι μια χημική ουσία που πρόσφατα αναγνωρίστηκε ως καύσιμο μηδενικού άνθρακα, το οποίο μπορεί να εισέλθει στην παγκόσμια αγορά σχετικά γρήγορα και να βοηθήσει στην επίτευξη του στόχου μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου, που διάφοροι φορείς (και από τον κλάδο της ναυτιλίας) έχουν αναλάβει. Η αμμωνία παράγεται κυρίως από σύνθεση ατόμων αζώτου και υδρογόνου. Έτσι, οι εκπομπές από την παραγωγή του υδρογόνου ως πρώτης ύλης και οι εκπομπές που προκύπτουν από τη σύνθεση της αμμωνίας πρέπει να θεωρούνται ως μέρος των εκπομπών του κύκλου ζωής καυσίμου της αμμωνίας.

Η αμμωνία χρησιμοποιείται στη βιομηχανία χημικών, υφασμάτων, εκρηκτικών και λιπασμάτων. Επομένως η τεχνολογία αποθήκευσής της έχει αναπτυχθεί σε

βιομηχανικό επίπεδο και αυτό θα βοηθήσει να λυθούν κάποια προβλήματα για τη χρήση της ως καύσιμο. Ήδη τα πρώτα πλοία με δυνατότητα καύσης αμμωνίας έχουν σχεδιαστεί και κατασκευάζονται. Πρόκειται για δεξαμενόπλοια με δυνατότητα να χρησιμοποιούν ως καύσιμο αμμωνία ή υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) με τη βοήθεια πρόσθετων μετασκευών.

### 1.6.3 Κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές που μετατρέπουν μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων απευθείας την εσωτερική ενέργεια ενός καυσίμου σε ηλεκτρική χωρίς να απαιτείται καύση ούτε κίνηση κάποιων μηχανικών μερών. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη χρήση υδρογόνου ως καυσίμου με τέτοιο τρόπο ώστε να μην χρειάζονται ποτέ ηλεκτρική επαναφόρτιση. Η δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνεχής.

Τα ηλεκτρόδια της κυψέλης καυσίμου κατασκευάζονται από πολύπλοκες νανοδομές από καταλύτη, έχουν πόρους και επικαλύπτονται με ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά. Οι ηλεκτροχημικές δράσεις σε μια κυψέλη καυσίμου περιλαμβάνουν οξείδωση του υδρογόνου στην άνοδο και αναγωγή του οξυγόνου στην κάθοδο.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι η υψηλή απόδοση για την μετατροπή των καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια, που μπορεί να φτάσει το 70%, οι χαμηλές εκπομπές, ανάλογα με την πηγή καυσίμων, ο χαμηλός θόρυβος και το χαμηλό βάρος τους. Όμως έχουν και αρκετά μειονεκτήματα, που περιλαμβάνουν το υψηλό κόστος αγοράς, το υψηλό κόστος συντήρησης, όπως αλλαγή ηλεκτρολύτη, η εκτιμώμενη ζωή της συσκευής, γιατί ακόμη δεν έχουμε δεδομένα πραγματικού χρόνου ζωής, και η χαμηλή διαθεσιμότητα.

## Γενικά περί καύσης

### 2.1 Καύση – καύσιμα

**Καύση** ονομάζεται η ένωση των διαφόρων σωμάτων με το οξυγόνο του αέρα. Η ένωση αυτή είναι μια **εξώθερμη** χημική αντίδραση, δηλαδή συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας. Στην πραγματικότητα κατά την καύση μετατρέπεται η χημική ενέργεια της ουσίας που καίγεται σε θερμική ενέργεια, την οποία οι διάφορες θερμικές μηχανές μπορούν να την μετατρέψουν σε μηχανικό έργο (κίνηση). Σ' αυτήν την πολύ απλή αρχή βασίζεται η λειτουργία των θερμικών μηχανών.

**Καύσιμα** χαρακτηρίζονται οι ουσίες που, όταν καίγονται, παράγουν θερμότητα **εκμεταλλεύσιμη**, δηλαδή θερμότητα που εύκολα μπορεί να μετατραπεί σε μηχανικό έργο.

Χημικό φαινόμενο ανάλογο προς την καύση είναι και η **οξειδωση**, που διαφέρει από την καύση ως προς την ταχύτητα της αντίδρασης με το οξυγόνο. Στην οξειδωση η χημική αντίδραση αυτή πραγματοποιείται αργά και γι' αυτό χαρακτηρίζεται ως **βραδεία καύση**. Η θερμότητα που παράγεται κατά την οξειδωση είναι η ίδια μ' αυτήν που θα παραγόταν με μια κανονική καύση, δεν είναι όμως **εκμεταλλεύσιμη** γιατί δεν μπορεί να μετατραπεί σε μηχανικό έργο, στις θερμικές μηχανές.

Από τα παραπάνω συμπεραίνει κάποιος ότι κάθε σώμα που μπορεί να ενωθεί με το οξυγόνο δεν μπορεί να χαρακτηρισθεί ως **καύσιμο**, αν η θερμότητα που παράγεται δεν μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε μηχανικό έργο.



#### Παραδείγματα

1. Ο σίδηρος κάτω από ορισμένες συνθήκες ενώνεται εύκολα με το οξυγόνο. Η θερμότητα όμως που παράγεται δεν είναι ενεργειακώς εκμεταλλεύσιμη, δηλαδή δεν μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε μηχανικό έργο, άρα ο σίδηρος δεν μπορεί να χαρακτηρισθεί ως καύσιμο.

2. Ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φωταέριο είναι σύμφωνα με την παραπάνω έννοια καύσιμα, γιατί η θερμότητα που παράγεται κατά την

καύση τους μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε μηχανικό έργο από μια θερμική μηχανή.

3. Επιπλέον, υπάρχουν ουσίες, όπως τα πυρηνικά καύσιμα, που, αν και η θερμότητα που παράγουν δεν προέρχεται από καύση, όπως αυτή ορίστηκε παραπάνω, κατατάσσονται στα καύσιμα. Έτσι τα καύσιμα αποκτούν ευρύτερη έννοια.

### 2.2 Κατάταξη των καυσίμων

Τα καύσιμα μπορούν να καταταγούν κατά πολλούς τρόπους επικρατέστερος είναι ο παρακάτω:

1) **Συμβατικά καύσιμα** (conventional fuels) ονομάζονται αυτά, στα οποία η θερμότητα παράγεται κατά την ένωσή τους με το οξυγόνο του αέρα, δηλαδή κατά την καύση. Είναι **ορυκτά καύσιμα** (fossil fuels) λόγω της προέλευσής τους από φυσικούς πόρους και ανάλογα με την κατάστασή τους διακρίνονται σε:

- α) **Στερεά καύσιμα** (γαιάνθρακες).
- β) **Υγρά καύσιμα** (από φυσικό πετρέλαιο).
- γ) **Αέρια καύσιμα** (φυσικό αέριο ή γαιαέριο).

2) **Πυρηνικά καύσιμα**, στα οποία η θερμότητα δεν προέρχεται από την καύση, δηλαδή από τη χημική αντίδραση του καυσίμου με το οξυγόνο, αλλά από **πυρηνικές αντιδράσεις**, δηλαδή διεργασίες που γίνονται στο εσωτερικό του πυρήνα των ουσιών αυτών. Οι πυρηνικές αντιδράσεις διαιρούνται σε:

α) **Αντιδράσεις σχάσης** (fission), κατά τις οποίες ο πυρήνας ενός στοιχείου με μεγάλο ατομικό βάρος, όπως το ουράνιο, διασπάται σε δυο μικρότερους πυρήνες. Κατά τη διάσπαση αυτή απελευθερώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας, που προέρχονται από το έλλειμμα μάζας, δηλαδή η μάζα των προϊόντων της σχάσης είναι μικρότερη από τη μάζα του πυρήνα που έχει διασπασθεί. Η μάζα αυτή που λείπει έχει μετατραπεί σε ενέργεια σύμφωνα με την εξίσωση:

$$E = mc^2$$

όπου: E η ενέργεια, m η μάζα και c η ταχύτητα του φωτός.

β) **Αντιδράσεις σύντηξης** (fusion), κατά τις οποίες οι πυρήνες δυο ελαφρών στοιχείων (π.χ. υδρογόνου) ενώνονται σε έναν πυρήνα στοιχείου με μεγαλύτερο ατομικό βάρος (π.χ. ήλιο). Κι εδώ υπάρχει **έλλειμμα μάζας** και μάλιστα μεγαλύτερο απ' όσο στις αντιδράσεις σχάσης, που μετατρέπεται επίσης σε ενέργεια σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση.

Οι περισσότεροι πυρηνικοί αντιδραστήρες με τους οποίους λειτουργούν οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σέ' όλο σχεδόν τον κόσμο, βασίζονται σε πυρηνικές αντιδράσεις σχάσης, ενώ στις αντιδράσεις σύντηξης βασίζεται η κατασκευή της **βόμβας Η** (υδρογόνου).

Με τα πυρηνικά καύσιμα ο όρος καύσιμα παίρνει ευρύτερη έννοια και περιλαμβάνει:

Κάθε ουσία που ύστερα από μια συμβατική ή πυρηνική αντίδραση απελευθερώνει ενέργεια εκμεταλλεύσιμη, δηλαδή ενέργεια που εύκολα μπορεί να μετατραπεί σε μηχανικό έργο από θερμικές μηχανές.

### 2.3 Είδη καύσης

Τα διάφορα είδη καύσης μπορούν να καταταγούν κατά δύο τρόπους:

1) Ανάλογα με τον **τρόπο καύσης** διακρίνουμε:

α) Καύση σε εστία (ξύλα, κάρβουνα, πετρέλαιο).

β) Καύση μέσα στη μηχανή (βενζινομηχανές, ντη-ζελομηχανές, αεριοστρόβιλοι).

2) Ανάλογα με τα **προϊόντα καύσης** έχουμε:

α) **Τέλεια καύση**, όταν στα προϊόντα καύσης δεν υπάρχουν καύσιμα συστατικά. Το καύσιμο στην περίπτωση αυτή έχει αποδώσει το μέγιστο της θερμικής ενέργειας που θα μπορούσε να αποδώσει.

β) **Ατελή καύση**, όταν στα προϊόντα καύσης υπάρχουν καύσιμα συστατικά και κυρίως μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και αιθάλη. Είναι φανερό ότι στην περίπτωση αυτή το καύσιμο αποδίδει μέρος μόνο της θερμαντικής του ικανότητας.

### 2.4 Τέλεια καύση

Για να έχουμε τέλεια καύση πρέπει να εξασφαλίσουμε **περίσσεια** αέρα, δηλαδή η καύση να γίνει με αέρα περισσότερο απ' όσο απαιτείται θεωρητικά.

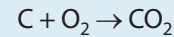
**Βαθμός περισσειας αέρα** ή **συντελεστής περισσειας λ** είναι ο λόγος της ποσότητας  $A_{\pi}$  του αέρα που παρέχεται για την καύση προς την ποσότητα  $A_{\theta}$  που απαιτείται θεωρητικά:

$$\lambda = \frac{A_{\pi}}{A_{\theta}}$$



### Παράδειγμα

Για την καύση του άνθρακα απαιτούνται θεωρητικά 2,67 kg οξυγόνου ή 11,6 kg αέρα για κάθε kg άνθρακα (C). Αυτό προκύπτει από την παρακάτω χημική αντίδραση, που είναι η αντίδραση καύσης του άνθρακα C:



Από τη στοιχειομετρία: 12 g C απαιτούν 32 g  $O_2$  και παράγουν 44 g  $CO_2$ .

Διαιρώντας όλες τις ποσότητες με 12 και αλλάζοντας τις μονάδες από g σε kg προκύπτει:

1 kg C απαιτεί 2,67 kg  $O_2$  και παράγει 3,67 kg  $CO_2$ .

Επειδή ο αέρας περιέχει οξυγόνο 23% κ.β. (περιεκτικότητα 0,23 kg  $O_2$ /kg αέρα), τα 2,67 kg οξυγόνου περιέχονται σε  $2,67/0,23 = 11,6$  kg αέρα.

Άρα, θεωρητικά, για κάθε 1 kg C απαιτούνται 11,6 kg αέρα. Όμως με 11,6 kg αέρα, το 1 kg C δεν θα καεί τελείως. Αν λοιπόν για το 1 kg C παρέχουμε πραγματικά 12,77 kg αέρα, θα έχουμε συντελεστή περισσειας:

$$\lambda = \frac{12,77}{11,6} = 1,1$$

δηλαδή περίσσεια 10%, που αυξάνει τις πιθανότητες για τέλεια καύση.

Η περίσσεια του αέρα που απαιτείται για να εξασφαλίσουμε την τέλεια καύση κυμαίνεται από 5% ως 100%. Ανάλογα με το είδος του καυσίμου σε γενικές γραμμές, οι προδιαγραφές του συντελεστή περισσειας καθορίζονται ως εξής:

1) Για **στερεά καύσιμα** μέχρι 100% ( $\lambda$  έως 2,00), δηλαδή διπλάσιος αέρα απ' όσο απαιτείται θεωρητικά. Για την καύση άνθρακα σε σκόνη η περίσσεια αέρα είναι γύρω στο 25% ( $\lambda = 1,25$ ).

2) Για **υγρά καύσιμα** 10–20% ( $1,10 < \lambda < 1,20$ ), που στην πράξη είναι ακόμα περισσότερη, ανάλογα με το είδος της μηχανής και τις ειδικές συνθήκες καύσης.

3) Για **αέρια καύσιμα** 5–10% ( $1,05 < \lambda < 1,10$ ), γιατί οι συνθήκες ανάμειξης του καυσίμου με το οξυγόνο είναι οι ιδανικότερες σε σύγκριση με τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Παρόλα αυτά μεγαλύτερη περίσσεια, που θα εξασφάλιζε την τέλεια καύση, πρέπει ν' αποφεύγεται, γιατί η θερμότητα που θα απάγεται στην ατμόσφαιρα με τον επιπλέον αέρα αποτελεί απώλεια, που αποβαίνει σε βάρος της θερμικής απόδοσης.



## 2.5 Ατελής καύση

Η ατελής καύση οφείλεται σε δυο κυρίως λόγους:

1) Σε **ανεπάρκεια του αέρα**, και όταν ακόμα παρέχεται σε περίσσεια και

2) Σε **κακή ανάμειξη** του καυσίμου με τον αέρα.

Συνέπειες της ατελούς καύσης είναι:

1) Η **απώλεια θερμότητας**, άρα μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης της μηχανής στην οποία γίνεται η καύση.



### Παράδειγμα

Για να υπολογίσουμε το ποσοστό απώλειας θερμότητας παίρνουμε τις περιπτώσεις τέλει καύσης 1 kg C (όλος ο άνθρακας προς CO<sub>2</sub>) και της ατελούς καύσης 1 kg C (όλος ο άνθρακας προς CO):

1 kg C κατά την τέλεια καύση (προς CO<sub>2</sub>) αποδίδει 8.100 kcal (33.900 kJ).

1 kg C κατά την ατελή καύση (προς CO) αποδίδει 2.400 kcal (10.000 kJ).

Συνεπώς για κάθε 1 kg C που καίγεται ατελώς χάνονται 8.100 – 2.400 = 5.700 kcal (23.900 kJ) δηλαδή χάνονται τα 5.700/8100 = 0,70 ή τα 70% της θερμαντικής ικανότητας του άνθρακα. Η απώλεια αυτή ισχύει και για όλα τα καύσιμα που περιέχουν άνθρακα στη σύστασή τους.

2) **Ρύπανση της μηχανής**, αν μεταξύ των προϊόντων της ατελούς καύσης υπάρχει άνθρακας υπό μορφή αιθάλης ή άλλα ασφαλτικής βάσης συστατικά.

3) **Ρύπανση του περιβάλλοντος**, που τα τελευταία χρόνια αποτελεί οξύτατο πρόβλημα για την ανθρωπότητα.

Ο βαθμός της ατέλειας καύσης στις θερμικές μηχανές ελέγχεται με την περιεκτικότητα σε CO των καυσαερίων. Υπάρχουν για τον σκοπό αυτό διάφορες διατάξεις που προσαρμόζονται στους οχετούς εξαγωγής των καυσαερίων και καταγράφουν συνεχώς την περιεκτικότητά τους σε CO. Στις ΜΕΚ γενικά η περιεκτικότητα των καυσαερίων σε CO δεν πρέπει να υπερβαίνει ορισμένα όρια (γύρω στο 0,1%).

## 2.6 Αναλογία αέρα προς καύσιμο (Air-Fuel Ratio – AFR)

Η αναλογία αέρα προς καύσιμο (AFR) παίζει ιδιαίτερο ρόλο για τη σωστή καύση, που με τη σειρά της επιδρά άμεσα στη σωστή λειτουργία της μηχανής, για την οποία το καύσιμο αυτό προορίζεται.

Η AFR εκφράζει την ποσότητα του αέρα που απαιτείται για την καύση της μονάδας βάρους του καυσίμου και, φυσικά, εξαρτάται από τη σύνθεση του καυσίμου και τις συνθήκες καύσης.

Διακρίνουμε:

1) Τη θεωρητική τιμή AFR<sub>θ</sub>, που εξαρτάται αποκλειστικά από τη σύνθεση του καυσίμου.

2) Την πραγματική AFR<sub>π</sub>, που εξαρτάται από την περίσσεια αέρα, που χρησιμοποιείται για την καύση (βλ. § 2.4).

### 2.6.1 Υπολογισμός της AFR

Η ποσότητα του αέρα που απαιτείται για την καύση 1 kg καυσίμου εξαρτάται από τη χημική σύσταση του καυσίμου και δίδεται από την εξίσωση:

$$AFR_{\theta} = 8,98 C + 26,90 (H - O/8) + 3,36 S \text{ m}^3 \text{ αέρα/kg καυσίμου} \quad (1)$$

$$\text{ή } AFR_{\theta} = 11,61 C + 34,78 (H - O/8) + 4,35 S \text{ kg αέρα/kg καυσίμου}, \quad (2)$$

αν ληφθεί υπόψη ότι η πυκνότητα του αέρα είναι 1,293 kg/m<sup>3</sup>.

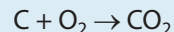
Στις παραπάνω σχέσεις τα C, H, O, και S παριστάνουν κατά σειρά τις περιεκτικότητες του καυσίμου σε άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο και θείο, εκφρασμένες σε kg στοιχείου ανά kg καυσίμου.



### Άσκηση

Για την απόδειξη των παραπάνω εξισώσεων (1) και (2) παίρνουμε τις χημικές εξισώσεις καύσης, δηλαδή τις χημικές αντιδράσεις κατά τις οποίες τα συστατικά του καυσίμου ενώνονται με το οξυγόνο:

α) Για την καύση άνθρακα:

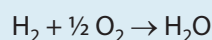


από τη στοιχειομετρία: 12 g C απαιτούν 32 g O<sub>2</sub> και παράγουν 44 g CO<sub>2</sub>

Διαιρώντας όλες τις ποσότητες με 12 και αλλάζοντας τις μονάδες από g σε kg προκύπτει:

1 kg C απαιτεί 2,67 kg O<sub>2</sub> και παράγει 3,67 kg CO<sub>2</sub>

β) Αντίστοιχα για την καύση υδρογόνου:

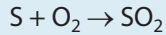


από τη στοιχειομετρία: 2 g H<sub>2</sub> απαιτούν 16 g O<sub>2</sub> και παράγουν 18 g H<sub>2</sub>O

Διαιρώντας όλες τις ποσότητες με 2 και αλλάζοντας τις μονάδες από g σε kg προκύπτει:

1 kg H<sub>2</sub> απαιτεί 8 kg O<sub>2</sub> και παράγει 9 kg H<sub>2</sub>O

γ) Αντίστοιχα για την καύση θείου:



από τη στοιχειομετρία: 32 g S απαιτούν 32 g O<sub>2</sub> και παράγουν 64 g SO<sub>2</sub>

Διαιρώντας όλες τις ποσότητες με 32 και αλλάζοντας τις μονάδες από g σε kg προκύπτει:

1 kg S απαιτεί 1 kg O<sub>2</sub> και παράγει 2 kg SO<sub>2</sub>

Αν τις παραπάνω απαιτήσεις καύσης, τις μεταφέρουμε σε πίνακα, προκύπτουν τα δεδομένα του πίνακα 2.1. Στη δεύτερη στήλη φαίνονται τα kg O<sub>2</sub> που απαιτούνται θεωρητικά για την καύση 1 kg κάθε στοιχείου. Με δεδομένη την πυκνότητα του οξυγόνου (1,43 kg/m<sup>3</sup>) προκύπτει η τρίτη στήλη. Από την διαίρεση με την κατά βάρος περιεκτικότητα του οξυγόνου στον αέρα (0,23 kg O<sub>2</sub>/ kg αέρα) προκύπτει από την δεύτερη στήλη η τέταρτη στήλη. Τέλος από την διαίρεση με την πυκνότητα του αέρα (1,293 kg/m<sup>3</sup>) προκύπτει από την τέταρτη στήλη η πέμπτη στήλη. Παρατηρούμε ότι οι δύο τελευταίες στήλες περιέχουν τους συντελεστές των εξισώσεων (1) και (2).

**Πίνακας 2.1**

| Για την καύση 1 kg | Απαιτούνται       |                               |         |                     |
|--------------------|-------------------|-------------------------------|---------|---------------------|
|                    | kg O <sub>2</sub> | m <sup>3</sup> O <sub>2</sub> | kg αέρα | m <sup>3</sup> αέρα |
| C                  | 2,67              | 1,87                          | 11,61   | 8,98                |
| H                  | 8,00              | 5,59                          | 34,78   | 26,90               |
| S                  | 1,00              | 0,70                          | 4,35    | 3,36                |

Η πραγματική τιμή AFR (AFR<sub>π</sub>) βρίσκεται αν τις τιμές του θεωρητικού AFR (AFR<sub>θ</sub>) πολλαπλασιάζουμε κάθε φορά επί τον συντελεστή περίσσειας λ, για τον οποίο γίνεται λόγος στην παράγραφο 2.4.

### 2.6.2 Σύσταση καυσαερίων

Τα βασικά συστατικά των καυσαερίων, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις καύσης (βλ. § 2.6.1) είναι:

1) Διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>).

2) Διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>).

3) Νερό (H<sub>2</sub>O), συνήθως ως υδρατμός.

Εκτός όμως αυτών, έχουμε:

1) Μονοξείδιο του άνθρακα (CO) όταν η καύση είναι ατελής.

2) Άζωτο, που συνοδεύει το οξυγόνο, αφού αποτελεί βασικό συστατικό του αέρα και μάλιστα σε περιεκτικότητα σχεδόν τετραπλάσια του οξυγόνου.

3) Στερεά κατάλοιπα, αποτελούμενα από τέφρα, σκουριά, αιθάλη κλπ.

Η ποσότητα των καυσαερίων δίδεται από το γενικό τύπο:

$$K_{\mu} = 1 + A_{\mu} - \Sigma_{\tau} \text{ kg/kg καυσίμου}$$

όπου K<sub>μ</sub> η μάζα των καυσαερίων και A<sub>μ</sub> η μάζα του αέρα που απαιτείται για την καύση (AFR, βλ. § 2.6.1) και Σ<sub>τ</sub> τα στερεά κατάλοιπα των καυσαερίων.



### Άσκηση

Πολλές φορές στην ανάλυση των καυσίμων αυτά προσομοιώνονται με χημικές ενώσεις που έχουν ισοδύναμη συμπεριφορά στην καύση τους. Έτσι για ένα υγρό καύσιμο (πετρέλαιο diesel) που αντιπροσωπεύεται από το χημικό τύπο C<sub>18</sub>H<sub>30</sub>O<sub>2</sub> ζητείται να προσδιοριστούν η πραγματική AFR (AFR<sub>π</sub>) σε kg αέρα/kg καυσίμου και σε m<sup>3</sup> αέρα/kg καυσίμου όταν χρησιμοποιούνται ανώτατα όρια περίσσειας αέρα.

Δίνονται ατομικά βάρη: άνθρακα = 12, υδρογόνο = 1 και οξυγόνο = 16.

Για την εφαρμογή των τύπων (1) και (2) που δίνουν την AFR<sub>θ</sub> πρέπει να υπολογιστούν οι περιεκτικότητες των στοιχείων στο καύσιμο.

Για τον άνθρακα:

$$C = \frac{18 \times 12}{18 \times 12 + 30 \times 1 + 2 \times 16} = \frac{216}{278} = 0,777$$

Για το υδρογόνο:

$$H = \frac{30 \times 1}{18 \times 12 + 30 \times 1 + 2 \times 16} = \frac{30}{278} = 0,108$$

Για το οξυγόνο:

$$O = \frac{2 \times 16}{18 \times 12 + 30 \times 1 + 2 \times 16} = \frac{32}{278} = 0,115$$

Για το θείο τίθεται S = 0 καθότι δεν περιέχεται αυτό το στοιχείο στο καύσιμο.

Έτσι σύμφωνα με την εξίσωση (1) στη παράγραφο 2.6.1:

$$AFR_{\theta} = 8,98 \times C + 26,90 \times \left( H - \frac{O}{8} \right) \frac{m^3 \text{ αέρα}}{kg \text{ καυσίμου}}$$

$$AFR_{\theta} = 8,98 \times 0,777 + 26,90 \times$$

$$\times \left( 0,108 - \frac{0,115}{8} \right) \frac{m^3 \text{ αέρα}}{kg \text{ καυσίμου}}$$

$$AFR_{\theta} = 6,9775 + 2,5185 = 9,4960 \frac{m^3 \text{ αέρα}}{kg \text{ καυσίμου}}$$

Η προδιαγραφή για την περίσσεια αέρα (ανώτατα όρια, υγρό καύσιμο) δίνει  $\lambda = 1,20$ . Έτσι και

$$AFR_{\pi} = \lambda \times AFR_{\theta}$$

$$AFR_{\pi} = 1,20 \times 9,4960 = 11,3952 \frac{m^3 \text{ αέρα}}{kg \text{ καυσίμου}}$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (2) στη παράγραφο 2.6.1:

$$AFR_{\theta} = 11,61 \times C + 34,78 \times \left( H - \frac{O}{8} \right) \frac{kg \text{ αέρα}}{kg \text{ καυσίμου}}$$

$$AFR_{\theta} = 9,0210 + 3,2563 = 12,2773 \frac{kg \text{ αέρα}}{kg \text{ καυσίμου}}$$

Η προδιαγραφή για την περίσσεια αέρα (ανώτατα όρια, υγρό καύσιμο) δίνει  $\lambda = 1,20$ . Έτσι

$$AFR_{\pi} = \lambda \times AFR_{\theta} \text{ και}$$

$$AFR_{\pi} = 1,20 \times 12,2773 = 14,7328 \frac{kg \text{ αέρα}}{kg \text{ καυσίμου}}$$

## 2.7 Ανάφλεξη

**Ανάφλεξη ή έναυση** ονομάζεται η έναρξη της χημικής αντίδρασης της καύσης, δηλαδή της ένωσης του καυσίμου με το οξυγόνο.

Για την ανάφλεξη απαιτούνται τρεις παράγοντες:

1) Καύσιμο.  
2) Οξυγόνο, σε κατάλληλη με το καύσιμο αναλογία.

3) Πηγή ανάφλεξης, που συνήθως είναι φλόγα, ηλεκτρικός σπινθήρας ή διάπυρη επιφάνεια.

Η αναλογία καυσίμου/αέρα πρέπει να βρίσκεται σε ορισμένα όρια που είναι γνωστά ως όρια αναφλεξιμότητας και εξαρτώνται κυρίως από το είδος του καυσίμου.

Τα όρια αναφλεξιμότητας για μερικά αέρια καύσιμα και ατμούς φαίνονται στον πίνακα 2.2.

Αν η περιεκτικότητα σε καύσιμο του μίγματος καυσίμου-αέρα είναι μικρότερη από τα κατώτατα όρια αναφλεξιμότητας, το μείγμα χαρακτηρίζεται **φτωχό** και δεν αναφλέγεται από έλλειψη καυσίμου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ξεκίνημα μιας βενζινομηχανής, ιδίως το χειμώνα, που δυσχεραίνεται, γιατί οι συνθήκες αυτές δεν ευνοούν την εξαέρωση της βενζίνης και έτσι το μείγμα που μπαίνει στους κυλίνδρους είναι **φτωχό** και η ανάφλεξη δύσκολη.

Αντίθετα, αν η περιεκτικότητα σε καύσιμο υπερβαίνει τα ανώτατα όρια αναφλεξιμότητας, το μείγμα χαρακτηρίζεται **πλούσιο** και δεν αναφλέγεται από ανεπάρκεια αέρα. Σε μια βενζινομηχανή π.χ. που έχει λόγω φορτίου υπερθερμανθεί, συχνά εμφανίζεται το γνωστό **μπούκωμα**, δηλαδή η μηχανή **σβήνει**, γιατί η υψηλή θερμοκρασία προκαλεί μεγαλύτερη εξαέρωση της βενζίνης και έτσι σχηματίζεται πλούσιο μείγμα που δεν αναφλέγεται. Σ' αυτό συντείνουν η υψηλή θερμοκρασία του περιβάλλοντος (θερινοί μήνες) και η μεγάλη πτητικότητα της βενζίνης (βλ. § 5.3).

Ανάλογο φαινόμενο παρατηρείται στις βενζινομηχανές και κατά την παρατεταμένη χρήση του εκκινητή (μίζας), που προκαλεί το σχηματισμό υπερπλούσιου μίγματος, που δεν αναφλέγεται. Έτσι έχουμε και εδώ μπούκωμα, που αντιμετωπίζεται με κατάλληλο εξαερισμό της μηχανής.

Τα όρια αναφλεξιμότητας ενός μίγματος καυσίμου-αέρα επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, από τους οποίους σημαντικότεροι είναι οι εξής:

1) **Πίεση**. Η αύξηση πίεσης πέρα από την ατμοσφαιρική συνήθως προκαλεί διεύρυνση των ορίων αναφλεξιμότητας για τα περισσότερα μείγματα, ενώ αντίθετα τα όρια αναφλεξιμότητας περιορίζονται για

**Πίνακας 2.2**

**Όρια αναφλεξιμότητας διαφόρων καυσίμων**

| Καύσιμο   | Όρια αναφλεξιμότητας (% κατά όγκο) |
|-----------|------------------------------------|
| Υδρογόνο  | 4 - 74                             |
| Μεθάνιο   | 5 - 15                             |
| Αιθάνιο   | 3 - 12                             |
| Προπάνιο  | 2 - 7                              |
| Ασετυλίνη | 3 - 60                             |
| Βενζίνη   | 1 - 7                              |
| Βενζόλιο  | 1 - 7                              |
| Οκτάνιο   | 1 - 3                              |
| Βουτάνιο  | 2-8                                |

πιέσεις μικρότερες από την ατμοσφαιρική.

2) **Θερμοκρασία.** Η αύξηση της θερμοκρασίας του μείγματος προκαλεί ανάλογη διεύρυνση των ορίων αναφλεξιμότητας, που κυμαίνεται από 0,001–0,003% για κάθε 1°C.

3) **Διεύθυνση μετάδοσης της φλόγας.** Διακρίνονται τρεις περιπτώσεις:

α) Η φλόγα μεταδίδεται προς τα πάνω: Τα όρια αναφλεξιμότητας διευρύνονται.

β) Η φλόγα μεταδίδεται προς τα κάτω: Τα όρια αναφλεξιμότητας περιορίζονται.

γ) Η φλόγα μεταδίδεται οριζόντια: Μόνο το όριο του πλούσιου μείγματος αυξάνεται, ενώ του φτωχού μείγματος παραμένει αμετάβλητο.

4) **Βαθμός ομοιογένειας του μείγματος.** Αν το μείγμα καυσίμου-αέρα είναι ομοιογενές και αυτό συμβαίνει όταν το καύσιμο είναι αέριο ή ατμός, τόσο τα όρια αναφλεξιμότητας όσο και η ταχύτητα ανάφλεξης έχουν μια ορισμένη τιμή, που μόνο από τους τρεις παραπάνω παράγοντες επηρεάζεται. Αντίθετα για ετερογενή μείγματα, όπως είναι τα εκνεφώματα ή σκόνες καυσίμων σε μείγμα με αέρα, δεν έχουν την ίδια σύσταση σ' όλη τη μάζα τους, πράγμα που επηρεάζει και τα όρια αναφλεξιμότητας και την ταχύτητα ανάφλεξης. Σημαντικά επηρεάζει στην περίπτωση αυτή και το μέγεθος των κόκκων, όταν πρόκειται για σκόνη στερεού καυσίμου.

## 2.8 Αναλυτές καυσαερίων

Η σύσταση των καυσαερίων μιας μηχανής έχει ιδιαίτερη σημασία για τον έλεγχο της απόδοσης και γενικότερα της σωστής λειτουργίας της.

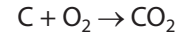
Στις περισσότερες περιπτώσεις τα καυσαέρια αποτελούνται από:

- 1) Διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>).
- 2) Μονοξείδιο του άνθρακα (CO).
- 3) Νερό (συνήθως σε κατάσταση υδρατμών).
- 4) Διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>).
- 5) Περίσσεια αέρα, δηλαδή οξυγόνο και άζωτο (βλ. § 2.4).

Μεταξύ των διάφορων συσκευών που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των καυσαερίων αναφέρονται:

### 1) Μετρητής CO<sub>2</sub> RANAREX

Το CO<sub>2</sub> είναι βασικό συστατικό των καυσαερίων όλων των θερμικών μηχανών, σχηματιζόμενο από την καύση του άνθρακα κατά την αντίδραση



Εφόσον πρόκειται για τέλεια καύση, η ποσότητα του CO<sub>2</sub>, που προέρχεται από ένα συγκεκριμένο καύσιμο, είναι σταθερή, ενώ η περίσσεια αέρα που έχει χρησιμοποιηθεί για να εξασφαλισθεί η τέλεια καύση, μεταβάλλει την εκατοστιαία αναλογία του CO<sub>2</sub> στα καυσαέρια, που είναι τόσο μικρότερη όσο μεγαλύτερη είναι η περίσσεια αέρα. Είναι φανερό, επομένως ότι η περιεκτικότητα CO<sub>2</sub> στα καυσαέρια, αποτελεί ένδειξη της περισσειας αέρα, που εξασφαλίζει την τέλεια καύση.

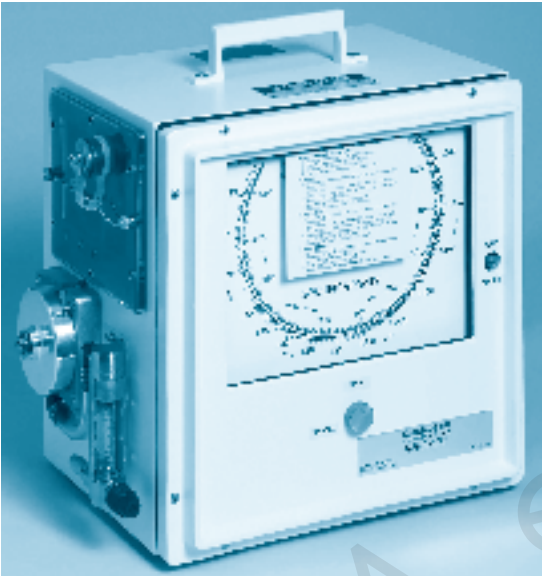
Ο μετρητής CO<sub>2</sub> RANAREX (σχ. 2.1) δείχνει, αλλά και μπορεί να καταγράφει την περιεκτικότητα CO<sub>2</sub> στα καυσαέρια. Χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο καυσαερίων από εστίες καύσης (π.χ. λέβητες), μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί και στα καυσαέρια κάθε θερμικής μηχανής.

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο γεγονός ότι το ειδικό βάρος των καυσαερίων μεταβάλλεται ανάλογα με την περιεκτικότητα CO<sub>2</sub>, αφού είναι γνωστό ότι το ειδικό βάρος του είναι πολύ μεγαλύτερο από τα άλλα συστατικά των καυσαερίων (πλην του SO<sub>2</sub>).

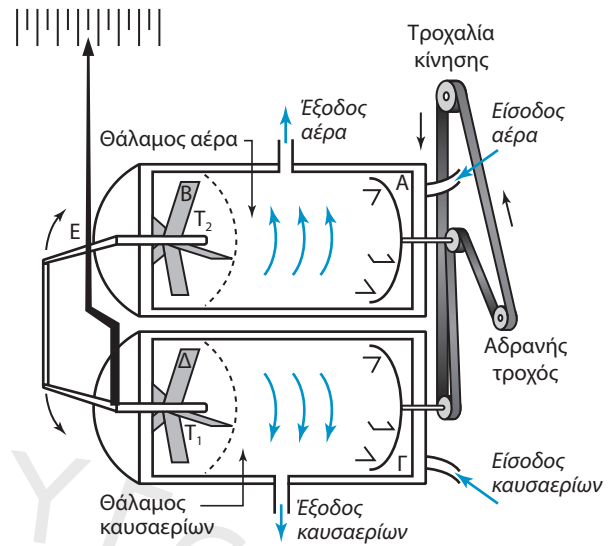
Ενδεικτικά αναφέρονται τα ειδικά βάρη συνήθων συστατικών των καυσαερίων (σε kg/m<sup>3</sup>):

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Αέρας           | 1,293 |
| Άζωτο           | 1,25  |
| Οξυγόνο         | 1,429 |
| Υδρατμός        | 0,80  |
| CO              | 1,25  |
| CO <sub>2</sub> | 1,97  |
| SO <sub>2</sub> | 2,85  |

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 τα καυσαέρια αναρροφώνται από το θάλαμο καύσης και με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα, που στρέφεται στο κυλινδρικό κέλυφος **K**, δέχονται μία περιστροφική κίνηση, οδηγούμενα προς τα πτερύγια ενός τροχού δράσης **T<sub>1</sub>**, και παράγουν μία ροπή στρέψης, που είναι κατ' ευθείαν ανάλογη προς το βάρος των καυσαερίων, άρα και προς την περιεκτικότητα CO<sub>2</sub>. Ένας δεύτερος τροχός δράσης **T<sub>2</sub>**, τροφοδοτείται με αέρα που προέρχεται από άλλον ανεμιστήρα και περιστρέφεται αντίθετα από τον ίδιο κινητήρα. Οι άξονες των δύο τροχών δράσης συνδέονται με τη βοήθεια δύο μοχλών και συνδετικής ράβδου. Η διαφορά των δύο αντίθετων ροπών δίνει περιορισμένη κίνηση στο σύστημα που μεταφέρεται στην ενδεικτική βελόνα του μετρητή. Η βελόνα αυτή κινείται μπροστά σε μία πλάκα βαθμολογημένη κατ' ευθείαν σε περιεκτικότητα % CO<sub>2</sub>.



(α)



(β)

**Σχ. 2.1**

(α) Συσκευή RANAREX. (β) Λειτουργία συσκευής. Α. Αναρρόφηση αέρα. Β. Μετάδοση ροπής στρέψης από αέρα. Γ. Αναρρόφηση καυσαερίων. Δ. Μετάδοση ροπής στρέψης από καυσαέρια (σε αντίθετη φορά από την περιστροφή αέρα). Ε. Μεταφορά της υπερβάλλουσας ροπής στρέψης στη βελόνα του οργάνου

## 2) Μετρητής CO<sub>2</sub> FYRITE

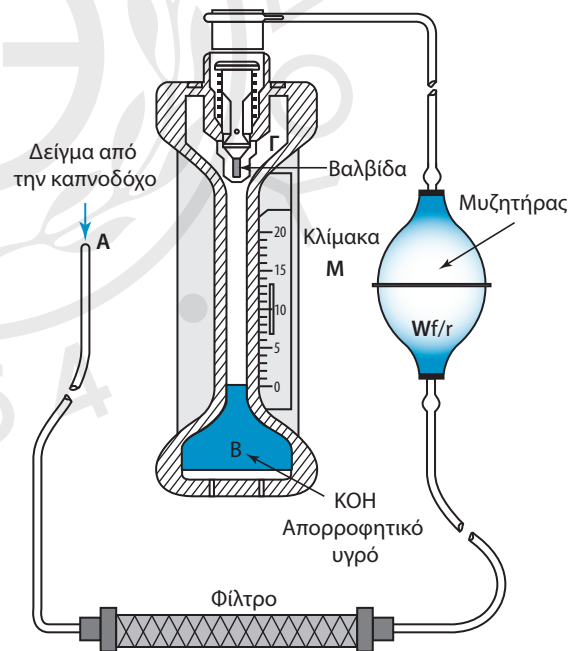
Στηρίζεται στη μεταβολή όγκου ορισμένης ποσότητας καυσαερίων, ύστερα από την απορρόφηση του CO<sub>2</sub>. Η απορρόφηση γίνεται με διάλυμα KOH μέσα από το οποίο διαβιβάζεται το δείγμα των καυσαερίων. Έχει απλή κατασκευή, αφού με αυτή συνήθως προσδιορίζεται ένα μόνο συστατικό, το CO<sub>2</sub>, που είναι και το βασικότερο συστατικό των καυσαερίων.

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής FYRITE φαίνεται διαγραμματικά στο σχήμα 2.2. Το δείγμα αναρροφάται από το σημείο **A** και διερχόμενο διά του δοχείου **B**, που περιέχει το διάλυμα KOH, υφίσταται μείωση του όγκου ανάλογη προς την περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> του δείγματος που έχει αναρροφηθεί. Τότε η στάθμη του υγρού του δοχείου **B** ανεβαίνει ανάλογα. Τούτο φαίνεται στην κλίμακα **M**, που είναι βαθμολογημένη σε % περιεκτικότητα CO<sub>2</sub>.

Σήμερα υπάρχει μεγάλη ποικιλία μετρητών FYRITE με αυτόματες λειτουργίες και ηλεκτρονική υποστήριξη στη λειτουργία και την καταγραφή των αποτελεσμάτων.

## 3) Μετρητής CO<sub>2</sub> SIEMENS

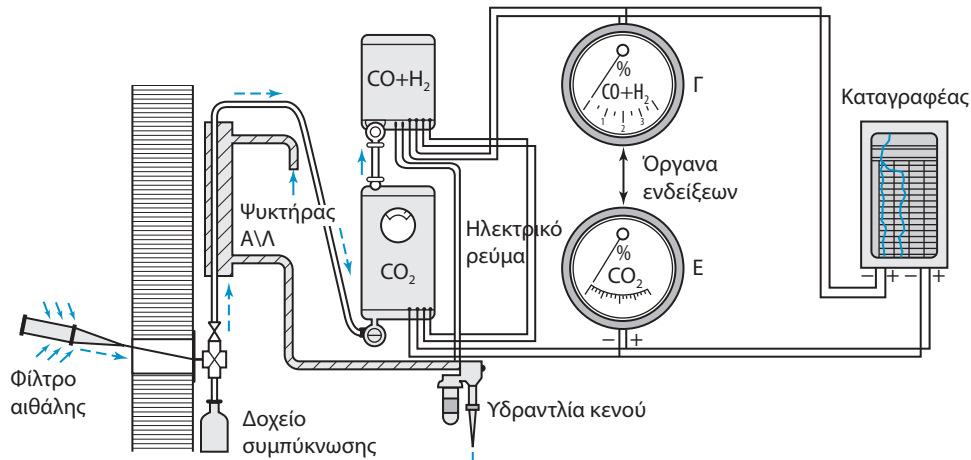
Η λειτουργία του οργάνου (σχ. 2.3) αυτού στηρίζεται στις διαφορές τιμών θερμικής αγωγιμότητας των

**Σχ. 2.2**

Αρχή λειτουργίας συσκευής FYRITE

συστατικών των καυσαερίων, όπως παρουσιάζει ο πίνακας 2.3.

Από τις τιμές του πίνακα 2.3 γίνεται φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα των καυσαερίων



Σχ. 2.3

Συσκευή ανάλυσης καυσαερίων SIEMENS

σε  $\text{CO}_2$  τόσο μικρότερη θα είναι η θερμική αγωγιμότητα των καυσαερίων αυτών.

Ο μεταβολές περιεκτικότητας  $\text{CO}_2$ , προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές της θερμικής αγωγιμότητας των καυσαερίων, που με τη σειρά τους μεταβάλουν αντίστοιχα τη θερμοκρασία ενός μεταλλικού σύρματος που τροφοδοτείται με ηλεκτρικό ρεύμα. Η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας προκαλεί ανάλογη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης, που είναι επομένως ενδεικτική της περιεκτικότητας  $\text{CO}_2$  των καυσαερίων. Τελικά η μεταβολή της αντίστασης, άρα και της περιεκτικότητας  $\text{CO}_2$  μεταφέρεται μέσω αμπερομέτρου σε ενδείκτη απευθείας βαθμολογημένο σε επί %  $\text{CO}_2$  (που στο σχ. 2.3 σημειώνεται ως **E**) ή καταγράφεται στον περιστρεφόμενο καταγραφέα. Με την ίδια συσκευή μπο-

ρεί να μετρηθεί το άθροισμα  $\text{CO}$  και  $\text{H}_2$  που τα καυσαέρια περιέχουν. Τα καυσαέρια διαβιβάζονται σε χώρο μέσα στον οποίο υπάρχει σύρμα λευκόχρυσου, στο οποίο διατηρείται ηλεκτρικό ρεύμα σε  $450^\circ\text{C}$ , πράγμα που προκαλεί την καταλυτική καύση του  $\text{CO}$  και του υδρογόνου και ανάλογη αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτή με τη σειρά της προκαλεί μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης που μεταφέρεται ως ένδειξη στο γαλβανόμετρο **Γ**.

#### 4) Αιθαλόμετρα

Είναι διατάξεις που επιτρέπουν τη μέτρηση της αιθάλης που υπάρχει στα καυσαέρια. Η μέτρηση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για την εκτίμηση της ποιότητας καύσης. Κατά πόσο μία θερμική εγκατάσταση ή μία θερμική μηχανή λειτουργεί ικανοποιητικά ή όχι εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία αιθάλης στα καυσαέρια. Η αιθάλη αποτελείται από άκαυστα συστατικά του καυσίμου, κυρίως άνθρακα, και η παρουσία της προδίδει συνήθως ατελή καύση. Μία πρώτη ένδειξη για την παρουσία της αιθάλης στα καυσαέρια παρέχει το χρώμα τους, που είναι τόσο βαθύτερο, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα της αιθάλης.

Μερικά από τα αιθαλόμετρα που χρησιμοποιούνται συνθέστερα είναι:

α) **Αιθαλόμετρο Ringelmann**. Είναι ένας χάρτινος δίσκος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4, που στο κέντρο φέρει άνοιγμα σε σχήμα πενταγώνου μέσα από το οποίο περνούν τα καυσαέρια.

Γύρω από το άνοιγμα υπάρχει κλίμακα 5 χρωμάτων (No 1 ως No 5) από το πολύ ανοικτό (No 1) ως το σχεδόν μαύρο (No 5), που αντιστοιχεί σε ανάλογη περι-

Πίνακας 2.3  
Θερμική αγωγιμότητα διάφορων αερίων

| Αέριο           | Τιμές θερμικής αγωγιμότητας                 |                     |
|-----------------|---|---------------------|
|                 | Joule. cm/cm <sup>2</sup> .S <sup>o</sup> C | Σε σύγκριση με αέρα |
| Αέρας           | 2,41  | 1,00                |
| Υδρογόνο        | 16,84                                       | 7                   |
| Μεθάνιο         | 3,02  | 1,25                |
| Οξυγόνο         | 2,44  | 1,01                |
| CO              | 2,32  | 0,96                |
| CO <sub>2</sub> | 1,45  | 0,63                |
| Νερό (υδρατμός) | 1,58  | 0,66                |
| SO <sub>2</sub> | 0,77  | 0,32                |

εκτικότητα αιθάλης. Καθώς τα καυσαέρια αναγκάζονται να περάσουν μέσα από το άνοιγμα, συγκρίνεται το χρώμα τους προς τα χρώματα της κλίμακας και καταγράφεται το χρώμα που είναι πλησιέστερο προς το χρώμα των καυσαερίων. Συνήθως δεν πρέπει μία εγκατάσταση που δουλεύει σωστά να έχει χρώμα κατά Ringelmann μεγαλύτερο από 2.



Σχ. 2.4

Αιθαλόμετρο Ringelmann

β) **Αιθαλόμετρο Bacharach.** Ορισμένη ποσότητα καυσαερίων διηθείται σε χάρτινο φίλτρο και το χρώμα που προκύπτει συγκρίνεται με τα χρώματα της κλίμακας Bacharach (σχ. 2.5) που έχει 10 διαβαθμίσεις.

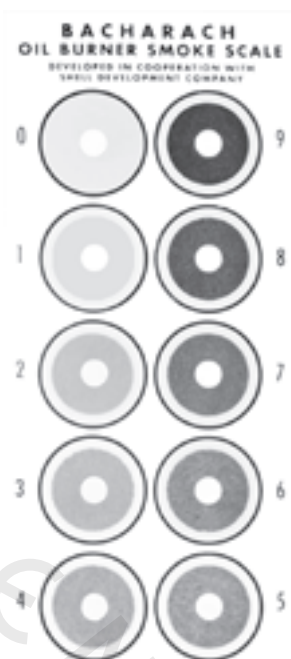
Και εδώ, δεν επιτρέπεται οι τιμές που προκύπτουν κατά τη μέτρηση να ξεπερνούν τη διαβάθμιση 2.

γ) **Φωτοηλεκτρικά αιθαλόμετρα.** Σε αυτά η μέτρηση της αιθάλης βασίζεται στη σύγκριση της απορρόφησης του φωτός που εκπέμπεται από μία φωτεινή πηγή, καθώς περνάει μέσα από τα καυσαέρια, προς την απορρόφηση της ίδιας πηγής με τις ίδιες συνθήκες κατά την διέλευση από περιβάλλον χωρίς αιθάλη.

## 2.9 Δείγματα καυσαερίων

Τα αποτελέσματα αναλύσεων των καυσαερίων που περιγράφονται στις προηγούμενες παραγράφους, δεν έχουν αξία αν το δείγμα των καυσαερίων που έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση δεν είναι αντιπροσωπευτικό όλης της ποσότητας καυσαερίων που εκπέμπει η εξεταζόμενη μηχανή.

Για την αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος των καυσαερίων, πρέπει να τηρούνται οι παρακάτω οδηγίες:



Σχ. 2.5

Αιθαλόμετρο Bacharach

1) Η δειγματοληψία να γίνεται από σημεία στα οποία τα καυσαέρια έχουν αναμειχθεί πλήρως, όπως στο κύριο σώμα ροής τους και όχι σε νεκρές γωνίες ή κοντά στα τοιχώματα των καπναγωγών.

2) Στις μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK), στις οποίες υπάρχει αυξομείωση της πίεσης στην εξαγωγή, πρέπει το σημείο δειγματοληψίας να απέχει αρκετά από το στόμιο της εξαγωγής, ώστε να μην αναμειχθούν τα καυσαέρια με αέρα κατά τις φάσεις υποπίεσης που δημιουργούν ρεύμα προς τον κινητήρα.

3) Το νερό των καυσαερίων που συμπυκνώνεται πρέπει να παγιδεύεται και να απομακρύνεται με κατάλληλες διατάξεις.

Τα δείγματα λαμβάνονται με σωλήνες, συνήθως χάλκινους, διαμέτρου 5-10 mm, εφόσον η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν υπερβαίνει τους 500°C. Για υψηλότερες θερμοκρασίες οι σωλήνες δειγματοληψίας είναι από πορσελάνη ή είναι μεταλλικοί αλλά υδρόψυκτοι.

## 2.10 Αυτανάφλεξη

Η αυτανάφλεξη είναι ειδική περίπτωση ανάφλεξης, κατά την οποία δεν απαιτείται φλόγα ή σπινθήρας για την ανάφλεξη του καυσίμου, αλλά η θερμοκρασία του φθάνει σε μια κατώτατη τιμή, πάνω από την οποία αναφλέγεται αυτόματα, δηλαδή χωρίς φλόγα ή σπινθήρα. Η περίπτωση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για τις μηχανές.

νές diesel, στις οποίες η έναυση του πετρελαίου γίνεται με αυτανάφλεξη. Για τον σκοπό αυτό η συμπίεση του αέρα είναι τόσο υψηλή (βαθμός συμπίεσης από 15:1 έως 18:1), ώστε η θερμοκρασία που αποκτά εξασφαλίζει την αυτανάφλεξη του πετρελαίου που ψεκάζεται από τον καυστήρα στο τέλος της συμπίεσης (10-40°C πριν το Α.Ν.Σ. ανάλογα με την προπορεία έγχυσης).

Η θερμοκρασία αυτανάφλεξης (Θ.Α.), η οποία είναι γνωστή και ως S.I.T. (Spontaneous Ignition Temperature) επηρεάζεται σημαντικότερα από τη μέθοδο μέτρησης (πίν. 2.4).

**Πίνακας 2.4**  
**Θερμοκρασία αυτανάφλεξης (Θ.Α.)**  
**και σημείο ανάφλεξης καυσίμων**

| Προϊόν                 | Θ.Α. °C<br>S.I.T. | Σημείο ανάφλεξης °C<br>(flash point) |
|------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Βενζίνη                | 720               | -40                                  |
| Κηροζίνη               | 650               | +40                                  |
| Γκαζόιλ (πετρ. diesel) | 430               | 65                                   |
| Μαζούτ                 | 400               | 100                                  |
| Ορυκτέλαια             | 360               | 200                                  |

Από τον πίνακα αυτόν παρατηρούμε ότι η Θ.Α. είναι μεγαλύτερη για τα ελαφρά καύσιμα και μικρότερη για τα βαριά καύσιμα και τα ορυκτέλαια, ενώ το Σημείο Ανάφλεξης είναι χαμηλό για τα ελαφρά και πτητικά καύσιμα και υψηλό για τα βαριά και παχύρρευστα καύσιμα ή έλαια. Η δοκιμή μέτρησης του σημείου ανάφλεξης περιγράφεται στην παράγραφο 12.6.

Η θερμοκρασία αυτανάφλεξης επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες και κυρίως από την πίεση. Αύξηση της πίεσης προκαλεί ελάττωση της θερμοκρασίας αυτανάφλεξης, όπως δείχνει το παράδειγμα του ορυκτελαίου SAE 30, στον πίνακα 2.5.

Η αυτανάφλεξη των καυσίμων έχει ιδιαίτερη σημασία για την ασφάλεια κατά την αποθήκευσή τους.

### 2.11 Απώλειες καύσης

Σημαντικό μέρος από τη θερμότητα που παράγεται κατά την καύση των διάφορων καυσίμων στις θερμικές μηχανές, χάνεται στα διάφορα στάδια κατά τα οποία η θερμότητα αυτή μεταβιβάζεται στη μηχανή ή απάγεται στο περιβάλλον.

Οι σπουδαιότερες απώλειες καύσης είναι:

#### 1) Απώλειες μέσα από την καπνοδόχο

Πρόκειται για τη θερμότητα που τα καυσαέρια

**Πίνακας 2.5**  
**Επίδραση της πίεσης στη θερμοκρασία**  
**αυτανάφλεξης ενός λιπαντικού**

| Πίεση<br>(bar) | Θ.Α. ορυκτελαίου<br>SAE 30 |
|----------------|----------------------------|
| 1              | 380°C                      |
| 2              | 320°C                      |
| 7              | 275°C                      |
| 15             | 260°C                      |
| 25             | 255°C                      |
| 35             | 250°C                      |
| 50             | 240°C                      |
| 70             | 228°C                      |

μεταφέρουν κατά το πέρασμά τους μέσα από την καπνοδόχο στην ατμόσφαιρα. Είναι η σημαντικότερη απώλεια, αν ληφθεί υπόψη ότι ο αέρας που εισάγεται για την καύση έχει θερμοκρασία 15-30°C και κατά την έξοδό του στην ατμόσφαιρα υπό μορφή καυσαερίων έχει θερμοκρασία 200-300°C. Έτσι εξηγείται γιατί η μεγάλη περίσσεια αέρα, προκειμένου να εξασφαλισθεί τέλεια καύση, μπορεί να αποβεί αντιοικονομική, αφού ο επί πλέον αέρας μεταφέρει μεγάλα ποσά θερμότητας. Το ποσοστό της απώλειας μέσα από την καπνοδόχο κυμαίνεται από 10 έως 15%.

#### 2) Απώλεια λόγω ατελούς καύσης

Είδαμε (βλ. § 2.5) ότι αν ο αέρας που παρέχεται στη μηχανή είναι ανεπαρκής, ή αν η ανάμειξή του με το καύσιμο δεν είναι ικανοποιητική, η καύση είναι ατελής και στα καυσαέρια περιέχονται άκαυστα συστατικά, κυρίως CO και αιθάλη. Έτσι το καύσιμο δεν αποδίδει όλη του τη θερμαντική ισχύ και ο βαθμός απόδοσης της μηχανής που τροφοδοτεί μειώνεται. Η απώλεια λόγω ατελούς καύσης κυμαίνεται από 2 ως 3%.

#### 3) Απώλεια λόγω μεταφοράς θερμότητας

Ένα μέρος από τη θερμότητα που παράγεται κατά την καύση χάνεται προς το περιβάλλον, με όλους τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να μεταδοθεί η θερμότητα:

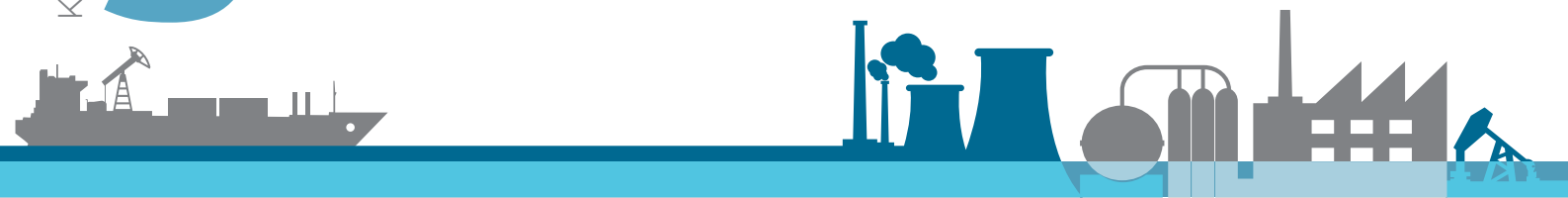
1) Με αγωγιμότητα, από τα τοιχώματα της μηχανής ή της εγκατάστασης στην οποία γίνεται η καύση.

2) Με μεταφορά, κυρίως μέσω των καυσαερίων, που εντάσσεται στις απώλειες μέσα από την καπνοδόχο και

3) με ακτινοβολία προς το περιβάλλον.



## Υγρά καύσιμα – Προέλευση και συστατικά



### 3.1 Κατάταξη των υγρών καυσίμων

Υγρά καύσιμα ονομάζονται εκείνα που στη συνηθισμένη θερμοκρασία βρίσκονται σε υγρή κατάσταση.

Τα υγρά καύσιμα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες:

1) **Πρωτογενή ή φυσικά υγρά καύσιμα**, που υπάρχουν στη φύση, όπως το φυσικό πετρέλαιο. Το φυσικό πετρέλαιο δεν χρησιμοποιείται αυτούσιο, αλλά διαχωρίζεται στα διάφορα προϊόντα, ύστερα από μια σειρά κατεργασιών, που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.

2) **Τεχνητά υγρά καύσιμα**, που δεν είναι φυσικά προϊόντα, αλλά παράγονται με διάφορες μεθόδους, όπως το οινόπνευμα, το υδρογόνο, τα συνθετικά καύσιμα κ.λπ. Το υδρογόνο (σε ορισμένες περιπτώσεις) αν και αέριο, κατατάσσεται στα υγρά καύσιμα, γιατί σε υγρή κατάσταση χρησιμοποιείται ως καύσιμο πυραύλων, φυσικά με πολύ μεγάλη πίεση, αφού με ατμοσφαιρική πίεση υγροποιείται μόλις στους  $-252^{\circ}\text{C}$ .

Για τις ναυτικές μηχανές μεγαλύτερη σημασία έχουν μερικά από τα προϊόντα απόσταξης του φυσικού πετρελαίου γιατί με αυτά κινούνται τα περισσότερα πλοία και από αυτά παράγονται τα σπουδαιότερα είδη λιπαντικών.

### 3.2 Το φυσικό πετρέλαιο

Είναι το σπουδαιότερο από όλα τα είδη καυσίμων, χάρη στα αναμφισβήτητα πλεονεκτήματα που τα προϊόντα του παρουσιάζουν ως καύσιμα των θερμικών μηχανών. Καλύπτει σχεδόν το 30% των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας και χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του 98% των ναυτικών μηχανών. Λέγεται επίσης αργό πετρέλαιο (crude oil).

Το πετρέλαιο είναι ορυκτό, βρίσκεται δηλαδή σε κοιτάσματα μέσα στο έδαφος και σε βάθη που ποικίλουν από λίγα μέτρα μέχρι αρκετά χιλιόμετρα. Η πρώτη γεώτρηση έγινε το 1859 από τον Drake στην περιοχή της Πενσυλβάνιας των ΗΠΑ. Τα κοιτάσματα

εκεί βρίσκονταν σε μικρό βάθος και η άντλησή τους δεν παρουσιάζε ιδιαίτερες δυσκολίες. Από την εποχή εκείνη η παραγωγή και επεξεργασία του πετρελαίου πήρε τεράστια ανάπτυξη και αποτελεί σήμερα μια από τις μεγαλύτερες βιομηχανίες. Εκτός από την εθνική σημασία, που έχει το πετρέλαιο ως πλουτοπαραγωγική πηγή μιας χώρας, έχει και γενικότερη στρατιωτική σημασία, μιας και είναι το σπουδαιότερο εφόδιο ενός σύγχρονου στρατού. Γενικότερα στο πετρέλαιο και στα προϊόντα του βασίζεται η βιομηχανική ανάπτυξη σε όλους τους τομείς: από τα μεταφορικά μέσα ως τη βαριά βιομηχανία.

Το φυσικό πετρέλαιο είναι άνισα κατανομημένο σε διάφορες περιοχές της γης. Σε ορισμένες περιοχές, όπως η Νότια Αμερική, η Αραβική Χερσόνησος, η Μέση Ανατολή, η Βόρεια Αφρική (Λιβύη) κ.α. υπάρχουν μεγάλα αποθέματα κοιτασμάτων φυσικού πετρελαίου ενώ σε άλλες περιοχές της γης δεν υπάρχει καθόλου πετρέλαιο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Ευρώπη που διαθέτει μόλις το 4,4% των παγκοσμίων αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικά για την κάλυψη των αναγκών της βασίζεται σε εισαγωγές.

Το σύνολο των αποθεμάτων του φυσικού πετρελαίου αγγίζει σήμερα (2020)<sup>1</sup> τα 1700 δισεκατομμύρια βαρέλια των οποίων η κατανομή παρουσιάζεται στον πίνακα 3.1.

Εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι το 50% περίπου των αποθεμάτων πετρελαίου όλης της γης βρίσκονται συγκεντρωμένα σε μικρή σχετικά έκταση της Μέσης Ανατολής (Αραβική Χερσόνησος, Ιράν, Ιράκ κλπ.), πράγμα που έχει τις ακόλουθες συνέπειες:

1) Στην περιοχή αυτή έχουν αναπτυχθεί πλουσιότατα κρατίδια, όπως το Κουβέιτ που κατέχει την τρίτη θέση στον κόσμο από άποψης εθνικού εισοδήματος (πίνακας 1.1).

2) Η περιοχή αυτή είναι εξαιρετικά ευπαθής και συχνά αιτία αναταραχών και πολέμων.

<sup>1</sup> World Energy Resources (2016).

**Πίνακας 3.1**  
**Αποθέματα φυσικού πετρελαίου**

| Χώρα ή περιοχή          | Αποθέματα    |      |
|-------------------------|--------------|------|
|                         | Δισ. βαρέλια | %    |
| Μέση Ανατολή            | 813          | 48   |
| Βόρεια Αμερική          | 228          | 13,4 |
| Νότια Αμερική           | 321          | 18,9 |
| Ευρώπη (χώρες ΟΟΣΑ)     | 14           | 0,8  |
| Άπω Ανατολή - Αυστραλία | 50           | 3    |
| Πρώην Σοβιετική Ένωση   | 140          | 8,3  |
| Αφρική                  | 129          | 7,6  |
| Σύνολο                  | 1.695        | 100  |

3) Η μεταφορά του πετρελαίου από την περιοχή αυτή στους τόπους κατανάλωσης (κυρίως Ευρώπη) είχε ευμενή επίδραση στην ανάπτυξη της Εμπορικής Ναυτιλίας.

### 3.3 Ελληνικά πετρέλαια

Ύστερα από ερευνητικές προσπάθειες πολλών δεκαετιών, το 1981 επιτεύχθηκε η ανακάλυψη των πρώτων εκμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων στη θαλάσσια περιοχή της Θάσου (κοίτασμα πετρελαίου Πρίνος και κοίτασμα φυσικού αερίου Ν. Καβάλας)

Για την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων αυτών ιδρύθηκε το 1975 η Δημόσια Επιχείρηση Πετρελαίου (ΔΕΠ Α.Ε.), με μοναδικό μέτοχο το ελληνικό κράτος. Το 1985 ιδρύεται η ΔΕΠ-ΕΚΥ, θυγατρική της ΔΕΠ Α.Ε.

Υπό την επίβλεψη της ΔΕΠ Α.Ε. και ΔΕΠ-ΕΚΥ δόθηκαν 24 ερευνητικές άδειες σε περιοχές στην ξηρά και στη θάλασσα. Εκτελέστηκαν 73.000 km σεισμικών 2D και 2.500 km<sup>2</sup> σεισμικών 3D, καθώς και 73 ερευνητικές γεωτρήσεις βασισμένες στις σεισμικές έρευνες. Αποτέλεσμα της ερευνητικής δραστηριότητας ήταν η ανακάλυψη του κοιτάσματος πετρελαίου στη θαλάσσια περιοχή του Κατάκολου (Δ. Πελοπόννησος), του κοιτάσματος φυσικού αερίου στην Επανομή Θεσσαλονίκης, καθώς και συγκεντρώσεις βιογενούς αερίου.

Σήμερα οι δραστηριότητες παραγωγής αφορούν το κοίτασμα του Πρίνου, στην θαλάσσια περιοχή Νότια της Καβάλας, όπου οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις συν-

δέθηκαν με αγωγό με την ακτή, όπου κατασκευάστηκε εργοστάσιο επεξεργασίας φυσικού αερίου και πετρελαίου, με δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου και υπεράκτιο τερματικό σταθμό φόρτωσης. Τα εκτιμώμενα αποθέματα είναι περί τα 40 εκατομμύρια βαρέλια<sup>2</sup>.

Οι τρέχουσες δραστηριότητες έρευνας υδρογονανθράκων αφορούν έρευνες στην ξηρά όσο και στη θάλασσα.

Οι χερσαίες έρευνες αφορούν τις περιοχές Αιτωλοακαρνανίας (Repsol, Energean Oil & Gas), Ιωαννίνων (Repsol, Energean Oil & Gas), Άρτας – Πρέβεζας (Ελληνικά Πετρέλαια) και Βορειοδυτικής Πελοποννήσου (Ελληνικά Πετρέλαια), ενώ οι θαλάσσιες έρευνες αφορούν τις περιοχές Κατάκολου (Energean Oil & Gas), Πατραϊκού Κόλπου (Ελληνικά Πετρέλαια, Edison), Θρακικού Πελάγους (Calfrac Well Services, Ελληνικά Πετρέλαια), Δυτικά της Κρήτης (Total, Exxon Mobil, Ελληνικά Πετρέλαια), Νοτιοδυτικά της Κρήτης (Total, Exxon Mobil, Ελληνικά Πετρέλαια), Περιοχή 1 Βορειοδυτικά της Κέρκυρας (Ελληνικά Πετρέλαια), Περιοχή 2 Δυτικά της Κέρκυρας (Total Edison, Ελληνικά Πετρέλαια). Περιοχή 10 Δυτικά της Πελοποννήσου (Ελληνικά Πετρέλαια) και Ιόνιο (Repsol, Ελληνικά Πετρέλαια)<sup>3</sup>.

### 3.4 Ιδιότητες του φυσικού πετρελαίου

Οι ιδιότητες του φυσικού πετρελαίου ποικίλλουν ανάλογα με την προέλευσή του. Άλλοτε εμφανίζεται λεπτόρρευστο, ανοιχτόχρωμο και με ελαφρά οσμή και άλλοτε παχύρρευστο, κατάμαυρο και με δυσάρεστη οσμή. Τα πετρέλαια ορισμένων πετρελαιοπηγών είναι πλούσια σε παραφίνη, ενώ άλλα αφήνουν μετά την απόσταξη ασφαλτούχα κατάλοιπα. Αλλά και η αναλογία των διαφόρων κλασμάτων που προκύπτουν από τη διύλιση καθώς και η ποιότητά τους, ποικίλλουν σε ευρύτατα όρια. Το ποσοστό της παραγόμενης κατά την αρχική απόσταξη βενζίνης π.χ. μπορεί να κυμαίνεται από 5-30%, η δε ποιότητά της ως προς τον αριθμό οκτανίου από 40-90.

Ανάλογα λοιπόν με τη σύστασή τους τα φυσικά πετρέλαια μπορούν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες:

- 1) **Πετρέλαια παραφινικής βάσης**, που είναι πλούσια σε παραφίνη.
- 2) **Πετρέλαια ασφαλτικής βάσης** ή ναφθενικά που περιέχουν πολλά ασφαλτούχα συστατικά.

<sup>2,3</sup> Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος, Έρευνα και Εκμετάλλευση Υδρογονανθράκων, (<https://ypen.gov.gr/energeia/ydrogonanthrakes/erevna-kai-ekmetallefsi-ydrogonanthr/>)

3) **Πετρέλαια μικτής βάσης**, που αποτελούν ενδιάμεση κατηγορία.

### 3.5 Σύσταση του πετρελαίου

#### 3.5.1 Υδρογονάνθρακες

Βασικά συστατικά του πετρελαίου και των προϊόντων του είναι οι υδρογονάνθρακες, δηλαδή χημικές ενώσεις που αποτελούνται αποκλειστικά από άνθρακα (C) και υδρογόνο (H). Τα μόρια των υδρογονανθράκων του πετρελαίου ποικίλλουν τόσο κατά τη δομή όσο και κατά το μέγεθος, και κυμαίνονται από τον απλούστερο υδρογονάνθρακα, που είναι το μεθάνιο  $\text{CH}_4$ , μέχρι πολύπλοκα μόρια με 40 ή και περισσότερα άτομα άνθρακα, που συναντώνται στα υπολείμματα της απόσταξης (μαζούτ, άσφαλτος, κυλινδρέλαια κ.λπ.). Ο αριθμός των ατόμων υδρογόνου είναι περίπου διπλάσιος από τα άτομα άνθρακα, επειδή όμως το υδρογόνο είναι πολύ ελαφρότερο από τον άνθρακα, η εκατοστιαία αναλογία των δυο αυτών βασικών συστατικών είναι περίπου 85% C και 15% H.

Με το μέγεθος του μορίου των υδρογονανθράκων συμβαδίζουν οι εξής κύριες ιδιότητες:

1) Το σημείο ζέσης ή βρασμού, δηλαδή η θερμοκρασία απόσταξης και

2) η πυκνότητα.

Στο σημείο ζέσης βασίζεται ο διαχωρισμός των διαφόρων κλασμάτων του φυσικού πετρελαίου (βενζίνες-πετρέλαιο-μαζούτ), δηλαδή η τεχνολογία της απόσταξης. Ο τμηματικός διαχωρισμός με βάση το σημείο ζέσης ονομάζεται **κλασματική απόσταξη** (ή **διύλιση**).

Την κατάταξη των υδρογονανθράκων με βάση τις παραπάνω ιδιότητες δίνει σε γενικές γραμμές ο πίνακας 3.2.

Εκτός όμως από το μέγεθος του μορίου τους, οι υδρογονάνθρακες που αποτελούν το πετρέλαιο διαφέρουν επίσης:

1) **Κατά τη δομή του μορίου τους**, δηλαδή κατά τον τρόπο που τα άτομα, που αποτελούν το μόριο του υδρογονάνθρακα, συγκροτούν το μόριο.

2) **Κατά το βαθμό κορεσμού**, δηλαδή κατά τον αριθμό αλλά και κατά τη θέση των ατόμων άνθρακα που δεν είναι κορεσμένα, δηλαδή δεν έχουν διαθέσει και τις τέσσερις μονάδες συγγενειάς τους.

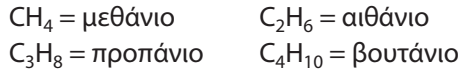
#### 3.5.2 Κατάταξη των υδρογονανθράκων ως προς τη δομή του μορίου

Τα σπουδαιότερα είδη υδρογονανθράκων που αποτελούν το πετρέλαιο ανήκουν σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες:

1) **Αλειφατικοί υδρογονάνθρακες με ευθεία αλυσίδα** οι οποίοι λέγονται επίσης **παραφίνες** ή **αλκάνια** ή **υδρογονάνθρακες της σειράς του μεθανίου** και έχουν όλα τα άτομα άνθρακα στη σειρά. Είναι **κορεσμένοι** υδρογονάνθρακες, δηλαδή καθένα από τα άτομα άνθρακα του μορίου τους έχει διαθέσει και τις τέσσερις μονάδες συγγενειάς του, είτε για δεσμό με υδρογόνο είτε για δεσμό με άλλο γειτονικό άτομο άνθρακα. Η ονομασία τους βασίζεται στον αριθμό ατόμων άνθρακα που το μόριό τους περιέχει και στην κατάληξη -άνιο (πεντάνιο, οκτάνιο, εικοσάνιο κ.λπ.) εκτός από τους τέσσερις πρώτους υδρογονάνθρακες της σειράς που έχουν ιδιαίτερα ονόματα, πάντα όμως με την κατάληξη **-άνιο**.

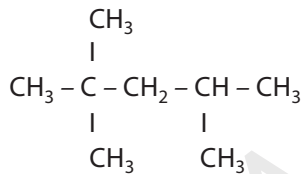
**Πίνακας 3.2**  
**Ομαδοποίηση και ιδιότητες υδρογονανθράκων στα προϊόντα φυσικού πετρελαίου**

| a/a | Προϊόν   | Αριθμός ατόμων C | Σημείο απόσταξης °C    | Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> ) | Παρατηρήσεις  |
|-----|--|------------------|------------------------|--------------------------------|---|
| 1   | Υγραέρια   | 1-4              | Κάτω από 0°            | -                              | Απόσταξη σε ατμοσφαιρική πίεση  |
| 2   | Βενζίνες   | 4-10             | 50-200                 | 0,70-0,75                      |   |
| 3   | Φωτιστικό πετρ. (κηροζίνη)   | 10-14            | 150-280                | 0,80                           |   |
| 4   | Πετρέλαιο diesel   | 12-18            | 240-360                | 0,80-0,86                      |   |
| 5   | Υπόλειμμα απόσταξης<br>Από το υπόλειμμα αυτό:<br>α) Μαζούτ<br>β) Λιπαντέλαια | 15-45<br>»<br>»  | άνω των 360°<br>»<br>» | 0,9-1<br>»<br>»                | Απόσταξη σε ατμοσφαιρική πίεση συνεπάγεται διάσπαση των υδρογονανθράκων (εξανθράκωση).<br>Καύσιμο για εξωτερική καύση, και υπό ορισμένες προϋποθέσεις και για MEK.<br>Με απόσταξη υπό κενό. |



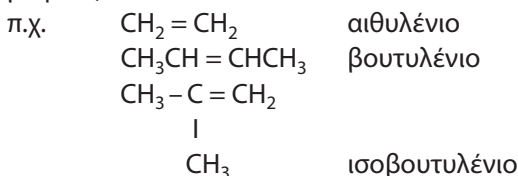
Ανταποκρίνονται στον γενικό τύπο  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$  και διακρίνονται για τη σταθερότητά τους υπό συνθήκες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης.

2) **Αλειφατικοί υδρογονάνθρακες με διακλαδωμένη αλυσίδα** οι οποίοι λέγονται επίσης **ισοπαραφίνες** ή **ισοαλκάνια** και διακρίνονται από τις παραφίνες κατά το ότι τα άτομα άνθρακα που συγκροτούν το μόριο τους δεν βρίσκονται στη σειρά, αλλά διακλαδίζονται, π.χ. το ισοοκτάνιο:



έχει τα πέντε από τα οκτώ άτομα άνθρακα στη σειρά και τα υπόλοιπα τρία σε διακλάδωση. Οι υδρογονάνθρακες της κατηγορίας αυτής έχουν ιδιαίτερη σημασία ως συστατικά της βενζίνης γιατί χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντικροτική ικανότητα.

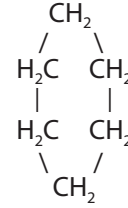
3) **Ολεφίνες ή αλκένια ή υδρογονάνθρακες της σειράς του αιθυλενίου.** Οι υδρογονάνθρακες της κατηγορίας αυτής είναι **ακόρεστοι** με διπλούς δεσμούς, δηλαδή ένα ή περισσότερα από τα άτομα άνθρακα του μορίου τους ενώνονται μεταξύ τους με δύο μονάδες συγγένειας. Ονομάζονται, όπως και οι παραφίνες, με τον αριθμό ατόμων άνθρακα και την κατάληξη **-ενιο**, εκτός πάλι από τα τρία πρώτα μέλη της σειράς, που διατηρούν τα ίδια ονόματα, όπως και στις παραφίνες, με την κατάληξη **-ένιο**. (Το πρώτο μέλος, δηλ. αντίστοιχο προς το μεθάνιο  $\text{CH}_4$ , όπως είναι φυσικό, δεν υπάρχει). Αν τα άτομα άνθρακα είναι σε διακλάδωση προτάσσεται και εδώ το **-ίσο-** όπως και στις παραφίνες:



Οι ολεφίνες παρουσιάζουν αστάθεια που οφείλεται στην ύπαρξη του ευπαθούς διπλού δεσμού. Ολεφίνες δεν υπάρχουν στα φυσικά πετρέλαια, αλλά δημιουργούνται στα διυλιστήρια με τις διυλιστηριακές διεργασίες.

4) **Ναφθένες ή ναφθένια ή κυκλοπαραφίνες.** Είναι υδρογονάνθρακες, των οποίων τα άτομα άνθρακα σχηματίζουν κλειστή αλυσίδα και ενώνονται μεταξύ

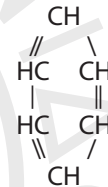
τους με απλούς δεσμούς. Έχουν τον γενικό τύπο  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$  και ονομάζονται από τον αριθμό ατόμων άνθρακα που περιέχουν και με το πρόθεμα **κύκλο-** και την κατάληξη **-ανιο**.



π.χ. κυκλοεξάνιο

Διακρίνονται για την εξαιρετική χημική σταθερότητά τους.

5) **Αρωματικοί υδρογονάνθρακες.** Πρόκειται για υδρογονάνθρακες που στο μόριό τους περιέχουν εξαμελή δακτύλιο ατόμων άνθρακα, όπου εναλλάσσονται στη σειρά απλοί και διπλοί δεσμοί. Τυπικός αντιπρόσωπος της σειράς αυτής είναι το **βενζόλιο** που έχει τον παρακάτω τύπο:

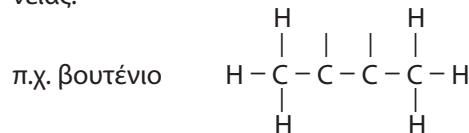


Οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες έχουν επίσης εξαιρετική χημική σταθερότητα και σαν συστατικά της βενζίνης έχουν πολύ καλή αντικροτική ικανότητα, δηλαδή μεγάλο αριθμό οκτανίου.

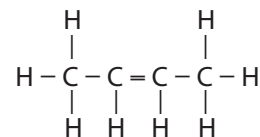
### 3.5.3 Κατάταξη των υδρογονανθράκων ως προς τον βαθμό κορεσμού του μορίου

Συνηθέστερες περιπτώσεις ως προς αυτήν την κατάταξη είναι:

1) **Υδρογονάνθρακες με διπλό δεσμό**, δηλαδή υδρογονάνθρακες, στους οποίους δυο γειτονικά άτομα άνθρακα έχουν από μία αδιάθετη μονάδα συγγένειας.

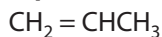


Οι δύο ελεύθερες μονάδες συγγένειας ενώνονται μεταξύ τους και σχηματίζουν ένα διπλό δεσμό.

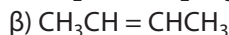
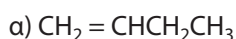


Οι υδρογονάνθρακες της κατηγορίας αυτής ονομάζονται **ολεφίνες** [βλ. § 3.5.2(3)]. Είναι δυνατό στο μόριο του ίδιου υδρογονάνθρακα να υπάρχουν δυο διπλοί δεσμοί (διολεφίνες) ή και περισσότεροι. Η θέση των διπλών δεσμών στο μόριο του υδρογονάνθρακα ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος του μορίου του.

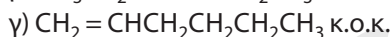
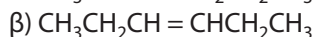
π.χ. έχουμε **ένα** μόνο **προπένιο**:



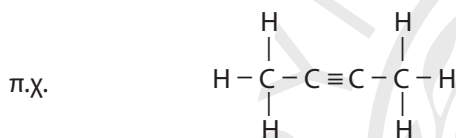
**δυο** βουτένια



**τρία** εξένια:



2) **Υδρογονάνθρακες με τριπλό δεσμό**, δηλαδή υδρογονάνθρακες στους οποίους δυο γειτονικά άτομα άνθρακα έχουν από δύο αδιάθετες μονάδες συγγένειας, που όταν ενώνονται μεταξύ τους μαζί με τον αρχικό δεσμό σχηματίζουν έναν **τριπλό δεσμό**.



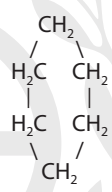
Οι υδρογονάνθρακες αυτοί έχουν την κατάληξη **-ίνιο** (ο παραπάνω λέγεται **βουτίνιο**) και καλούνται **ακόρεστοι υδρογονάνθρακες της σειράς του ακετυλενίου**, από το όνομα του πρώτου μέλους της σειράς αυτής που είναι το ακετυλένιο ( $\text{CH}\equiv\text{CH}$ ), η γνωστή **ασετυλίνη**.

Όλοι οι ακόρεστοι υδρογονάνθρακες έχουν άμεση επίδραση στις ιδιότητες και φυσικά στην ποιότητα του προϊόντος, του οποίου αποτελούν συστατικά. Κυρίως παρουσιάζουν αστάθεια του μορίου τους (οξειδωση) και γι' αυτό είναι συνήθως ανεπιθύμητοι και απομακρύνονται κατά τα διάφορα στάδια εξευγενισμού. Ένας τρόπος για την αντιμετώπισή τους είναι η υδρογόνωση προς παραφίνες ή με αντιοξειδωτικά πρόσθετα. Υπενθυμίζεται και πάλι ότι σπανίως τα φυσικά πετρέλαια περιέχουν γενικά ολεφίνες, αλλά η παρουσία τους στα προϊόντα οφείλεται σε διυλιστηριακές διεργασίες (απόσταξη, πυρόλυση).

### 3.6 Ισομέρεια

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι σε έναν μοριακό τύπο, δηλαδή στον τύπο που δείχνει το σύνολο των ατόμων που αποτελούν το μόριο ενός υδρογονάνθρακα, αντιστοιχούν περισσότερα από ένα είδη,

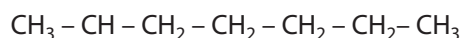
**Πίνακας 3.3**  
**Ισομερείς υδρογονάνθρακες του τύπου  $\text{C}_6\text{H}_{12}$**

| a/a | Συντακτικός τύπος  | Ονομασία                             | Κατηγορία  |
|-----|--|--------------------------------------|--|
| 1   | $\text{CH}_3\text{CH} = \text{CHCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$   | Εξένιο-2,3                           | αλειφατικοί<br>ακόρεστοι<br>με ευθεία<br>αλυσίδα       |
| 2   | $\text{CH}_2 = \text{CHCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$   | Εξένιο-1,2                           |  |
| 3   | $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH} = \text{CHCH}_2\text{CH}_3$   | Εξένιο-3,4                           |  |
| 4   | $\begin{array}{c} \text{CH}_3\text{CH} = \text{C} - \text{CH}_2\text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$      | 3-μεθυλο-πεντένιο-2,3<br>(ισοεξένιο) | αλειφατικοί<br>ακόρεστοι<br>με διακλαδωμένη<br>αλυσίδα |
| 5   | $\begin{array}{c} \text{CH}_2 = \text{C} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2\text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$ | 2-μεθυλο-πεντένιο-1,2<br>(ισοεξένιο) |  |
| 6   | $\begin{array}{c} \text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_2\text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$  | 3-μεθυλο-πεντένιο-1,2<br>(ισοεξένιο) |  |
| 7   | $\begin{array}{c} \text{CH}_3 - \text{C} = \text{CH} - \text{CH}_2\text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$   | 2-μεθυλο-πεντένιο-2,3<br>(ισοεξένιο) |  |
| 8   |                                |                                      | ναφθενικός   |

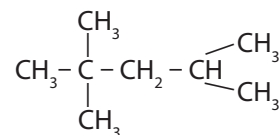
που διαφέρουν μεταξύ τους είτε ως προς τη δομή του μορίου, είτε ως προς τον αριθμό και τη θέση των πολλαπλών δεσμών που περιέχουν, π.χ. στο μοριακό τύπο  $\text{C}_6\text{H}_{12}$  αντιστοιχούν πάνω από 10 είδη υδρογονανθράκων μερικά από τα οποία περιέχει ο πίνακας 3.3.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ισομέρεια** και οι υδρογονάνθρακες με τον ίδιο μοριακό τύπο αλλά με διάφορη δομή ονομάζονται **ισομερείς**. Η ισομέρεια έχει σπουδαία σημασία για την τεχνολογία του πετρελαίου, γιατί μεταξύ δυο ισομερών υδρογονανθράκων, που είναι συστατικά ενός προϊόντος του πετρελαίου, μπορεί να υπάρχουν σοβαρές διαφορές ιδιοτήτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση των δυο ισομερών υδρογονανθράκων  $\text{C}_8\text{H}_{18}$ :

1) Κανονικό οκτάνιο



2) Ισο-οκτάνιο



που ως συστατικά της βενζίνης έχουν εντελώς αντίθετη συμπεριφορά ως προς την αντικροτική τους ικανότητα. Το ισοκτάνιο έχει άριστη αντικροτικότητα και βαθμολογείται με 100 στην κλίμακα του αριθμού οκτανίου, ενώ το κανονικό οκτάνιο έχει αρνητική τιμή, δηλαδή πάρα πολύ κακή αντικροτική ικανότητα. Στην αναμόρφωση της βενζίνης εξάλλου επιδιώκεται ο σχηματισμός των ισομερών με τις ευνοϊκότερες για το προϊόν ιδιότητες κυρίως αντικροτικότητας (όπως οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες).

Πρέπει όμως να τονισθεί ότι οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες αυξάνουν με τον αριθμό οκτανίου της βενζίνης, έχουν όμως το μειονέκτημα να προκαλούν έντονη ρύπανση του περιβάλλοντος από τα προϊόντα της καύσης τους. Έτσι η βελτίωση των βενζινών ως προς την αντικροτικότητα επιδιώκεται και με άλλους τρόπους, όπως με την προσθήκη χημικών ενώσεων που περιέχουν οξυγόνο (βλ. §. 5.4.1).

Ο αριθμός των ισομερών είναι ανάλογος προς το μέγεθος του μορίου των υδρογονανθράκων, δηλαδή προς τον αριθμό ατόμων άνθρακα που περιέχει το μόριο του υδρογονάνθρακα.

Στον παρακάτω πίνακα παρέχεται μια εικόνα των ισομερών κορεσμένων υδρογονανθράκων της σειράς  $C_nH_{2n+2}$ , δηλαδή των παραφινικών:

| Αριθμός ατόμων C | Ισομερή | Αριθμός ατόμων C | Ισομερή        |
|------------------|---------|------------------|----------------|
| 6                | 5       | 15               | 4347           |
| 7                | 9       | 18               | 60523          |
| 8                | 18      | 25               | 36797588       |
| 9                | 35      | 40               | 62491178805831 |
| 12               | 355     |                  |                |

### 3.7 Άλλα συστατικά των προϊόντων του πετρελαίου

Εκτός από τους υδρογονάνθρακες, που αποτελούν συνήθως το μεγαλύτερο μέρος των συστατικών του πετρελαίου, περιέχονται σε διάφορες αναλογίες σ' αυτό και τα εξής συστατικά:

#### 1) Θείο

Η παρουσία του θείου στα καύσιμα είναι επιβλαβής και ως εκ τούτου ανεπιθύμητη, διότι κατά την καύση μετατρέπεται σε  $SO_2$  και τελικά σε θειικό οξύ, που μπορεί να προκαλέσει ισχυρές διαβρώσεις στα

μεταλλικά μέρη της μηχανής, με τα οποία έρχεται σε επαφή. Απομακρύνεται κατά τις διάφορες φάσεις επεξεργασίας, σε βαθμό που ποικίλλει ανάλογα με το τελικό προϊόν. Στο μαζούτ για παράδειγμα η περιεκτικότητα του θείου μπορεί να φθάσει μέχρι 5%, ενώ στα άλλα καύσιμα τα επιτρεπόμενα όρια είναι πολύ χαμηλά, π.χ. για το πετρέλαιο diesel που προορίζεται ως καύσιμο αυτοκινήτων δεν επιτρέπεται περιεκτικότητα θείου μεγαλύτερη από 0,2 % για λόγους προστασίας του περιβάλλοντος από τη ρύπανση. Εξίσου χαμηλά είναι τα όρια περιεκτικότητας θείου και στη βενζίνη. Για τις χώρες της Ε.Ε., άρα και για την Ελλάδα, τα όρια αυτά είναι 0,05%.

#### 2) Ανόργανα συστατικά

Είναι άλατα ή άλλες ενώσεις διαφόρων μετάλλων, όπως νατρίου - σιδήρου - βαναδίου κ.λπ. που περιέχονται στο πετρελαιοφόρο κοίτασμα και επιδρούν στην τέφρα των καυσίμων.

#### 3) Οξυγόνο και άζωτο

Περιέχονται σε ελάχιστη αναλογία και η παρουσία τους εξηγείται από την οργανική προέλευση του πετρελαίου.

#### 4) Ειδικά πρόσθετα (additives)

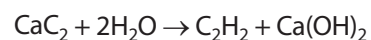
Αναμειγνύονται με τα διάφορα πετρελαιοειδή προϊόντα σε μικρή αναλογία κατά τις τελικές φάσεις επεξεργασίας, με σκοπό τη βελτίωση ορισμένων από τις ιδιότητές τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα αντικροτικά πρόσθετα της βενζίνης, που είναι οξυγονούχες ενώσεις.

### 3.8 Προέλευση του πετρελαίου

Για την προέλευση του πετρελαίου έχουν διατυπωθεί αρκετές θεωρίες από τις οποίες σημαντικότερες είναι οι εξής:

#### 1) Θεωρία της ανόργανης προέλευσης

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή το πετρέλαιο σχηματίστηκε στο εσωτερικό της γης από οργανομεταλλικές ενώσεις, δηλαδή ενώσεις μετάλλων με άνθρακα, με την επίδραση νερού κατά τρόπο ανάλογο με την παραγωγή ασετυλίνης:



Η θεωρία αυτή, που βρίσκει πλήρη εργαστηριακή

επαλήθευση, υποστηρίχθηκε από τον Mendelejeff, τον πατέρα του περιοδικού συστήματος των στοιχείων. Σήμερα όμως δεν ευσταθεί.

## **2) Θεωρία της οργανικής προέλευσης (ζωικής ή φυτικής)**

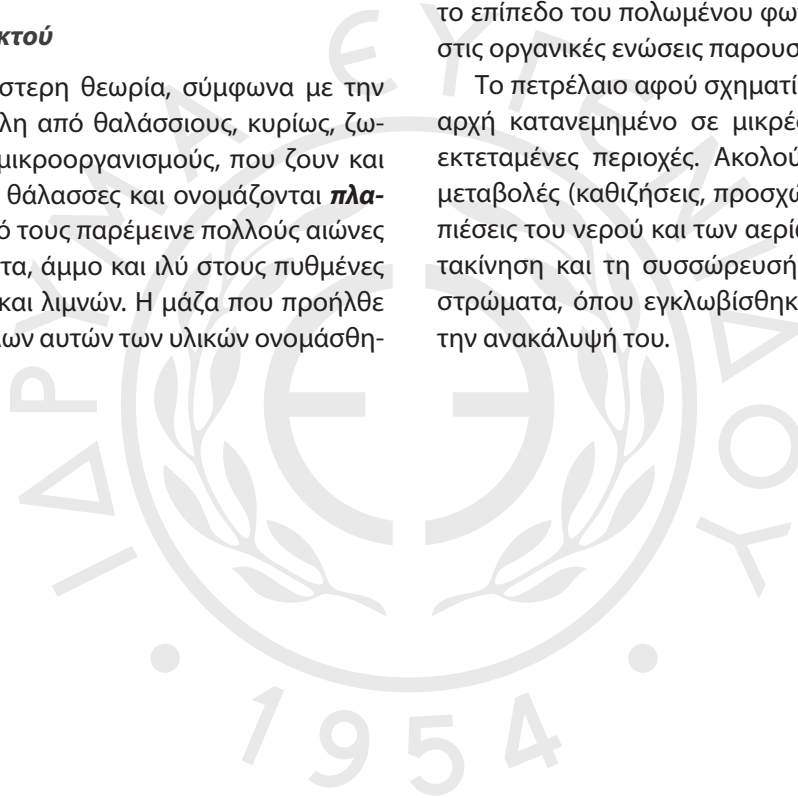
Κατά τη θεωρία αυτή ζωικά λείψανα από προγενέστερες γεωλογικές εποχές βρέθηκαν στο εσωτερικό της γης. Εκεί με την επίδραση υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών καθώς και διαφόρων μικροοργανισμών αποσυντέθηκαν και από τα προϊόντα αποσύνθεσης προήλθε το πετρέλαιο. Τα φυτικά λείψανα δίνουν μεθάνιο και γαιάνθρακες. Και αυτή η θεωρία δεν ευσταθεί.

## **3) Θεωρία του πλαγκτού**

Είναι η επικρατέστερη θεωρία, σύμφωνα με την οποία η οργανική ύλη από θαλάσσιους, κυρίως, ζωικούς και φυτικούς μικροοργανισμούς, που ζουν και αναπτύσσονται στις θάλασσες και ονομάζονται **πλαγκτό**, μετά το θάνατό τους παρέμεινε πολλούς αιώνες αναμειγμένη με άλατα, άμμο και ιλύ στους πυθμένες αβαθών θαλασσών και λιμνών. Η μάζα που προήλθε από τη συνένωση όλων αυτών των υλικών ονομάστη-

κε **σαπροπηλός**. Μετά την ξήρανσή τους οι θάλασσες και οι λίμνες σκεπάστηκαν από ιζηματογενή πετρώματα ή από υπολείμματα άλλων ζωικών και φυτικών οργανισμών. Έτσι ο σαπροπηλός, με την πάροδο του χρόνου και υπό την επίδραση αναερόβιων μικροοργανισμών, σε συνδυασμό με την καταλυτική επίδραση του περιβάλλοντος, αποσυντέθηκε και από τα προϊόντα της σχηματίστηκε το φυσικό πετρέλαιο. Τη θεωρία αυτή ενισχύει η ανεύρεση στο πετρέλαιο ορμονών, πρωτεϊνών, ιωδίου και άλλων συστατικών, των οποίων η παρουσία μόνο με την οργανική προέλευση του πετρελαίου μπορεί να εξηγηθεί. Τη θεωρία αυτή ενισχύει επίσης το γεγονός ότι το πετρέλαιο στρέφει το επίπεδο του πολωμένου φωτός, πράγμα που μόνο στις οργανικές ενώσεις παρουσιάζεται.

Το πετρέλαιο αφού σχηματίστηκε παρέμεινε στην αρχή κατανεμημένο σε μικρές ποσότητες σε πολύ εκτεταμένες περιοχές. Ακολούθησαν οι γεωλογικές μεταβολές (καθιζήσεις, προσχώσεις κ.λπ.), που με τις πιέσεις του νερού και των αερίων προκάλεσαν τη μετακίνηση και τη συσσώρευσή του σε αδιαπέραστα στρώματα, όπου εγκλωβίσθηκε και παρέμεινε μέχρι την ανακάλυψή του.





## 4.1 Γενικά

Τα κυριότερα στάδια της παραγωγής και της επεξεργασίας του πετρελαίου είναι:

- 1) Η έρευνα για την ανακάλυψη κοιτασμάτων πετρελαίου,
- 2) η παραγωγή (ανόρυξη),
- 3) η μεταφορά στα διυλιστήρια-διαχωρισμός σε προϊόντα – διύλιση και
- 4) άλλες διεργασίες (μετά τη διύλιση).

## 4.2 Έρευνα για την ανακάλυψη κοιτασμάτων πετρελαίου

Η έρευνα αυτή βασίζεται κυρίως:

- 1) στη μορφή του εδάφους και
- 2) σε γεωλογικές μεθόδους.

Ως προς τη μορφή του εδάφους (σχ. 4.1) έχει διαπιστωθεί ότι ορισμένες μορφές εδάφους ευνοούν την ύπαρξη κοιτασμάτων πετρελαίου, όπως:

1) **Αντίκλινα**, δηλαδή αμφικλινείς σχηματισμοί του εδάφους, με αργιλικό υπόστρωμα, πάνω στο οποίο διαμορφώνεται πορώδες πέτρωμα, που καλύπτεται με άλλο αδιαπεράστο αργιλικό πέτρωμα. Στο πορώδες πέτρωμα, που είναι διαπερατό, συγκεντρώνεται το πετρέλαιο Π, που συνήθως συνοδεύεται από υδάτινη στοιβάδα Υ στον πυθμένα, ενώ από πάνω υπάρχουν τα αέρια Α υπό πίεση. Το πετρελαιοφόρο πέτρωμα είναι αφενός μεν πορώδες, ώστε στους πόρους του να εισχωρήσει το πετρέλαιο και αφετέρου διαπερατό, δηλαδή οι πόροι του συγκοινωνούν μεταξύ τους, ώστε το

πετρέλαιο να ρέει με ευκολία μέσα στο πέτρωμα.

2) **Μεταπτώσεις** σχηματίζονται όταν η μια πλευρά του αντίκλινου υποστεί καθίζηση, οπότε το στρώμα του πετρελαίου Π παγιδεύεται υπό πίεση στο άλλο τμήμα του αντίκλινου.

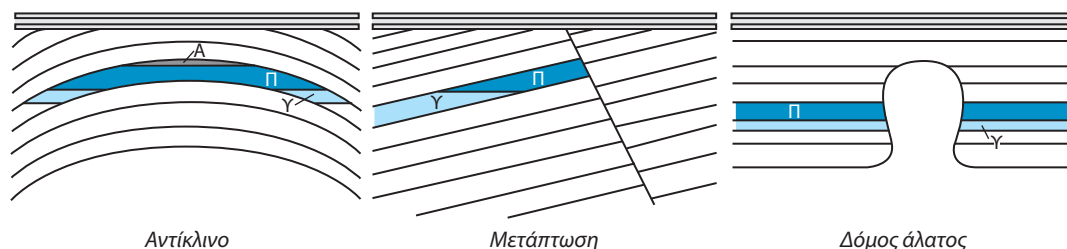
3) **Δόμοι άλατος** σχηματίζονται όταν κάτω από το πετρελαιοφόρο κοίτασμα υπάρχει στρώμα άλατος που ανυψώνεται προς τα πάνω από πλευρικές πιέσεις που δέχεται από γειτονικά στρώματα του υπεδάφους. Συχνά η ανύψωση φθάνει ως την επιφάνεια του εδάφους οπότε το κοίτασμα χωρίζεται σε δυο μέρη.

Οι σπουδαιότερες από τις **γεωλογικές μεθόδους** έρευνας είναι:

1) Η **σεισμολογική μέθοδος**. Με ισχυρές εκρήξεις προκαλούνται τεχνητές δονήσεις των οποίων τα κύματα καταγράφονται με ειδικό σειсмоγράφο. Η ταχύτητα με την οποία τα κύματα αυτά διαδίδονται και αντανακλώνται, εξαρτάται από τη σύσταση του εδάφους. Όπου υπάρχει αλλαγή εδαφικής σύστασης, που θα μπορούσε να οφείλεται σε ένα πετρελαιοφόρο κοίτασμα, θα παρατηρείται απότομη αλλαγή της ταχύτητας.

2) Η **βαρομετρική μέθοδος**. Αυτή έγκειται στην μέτρηση της έντασης της βαρύτητας, που επηρεάζεται αισθητά από τη σύσταση του εδάφους. Ένα κοίτασμα πετρελαίου προκαλεί αξιοσημείωτη ελάττωση της τιμής του g.

3) Η **μαγνητική μέθοδος**. Η ένταση του γήινου μαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται αισθητά, όταν μετρείται σε έδαφος, κάτω από το οποίο υπάρχει πετρελαιοφόρο κοίτασμα.



Αντίκλινο

Μετάπτωση

Δόμος άλατος

Σχ. 4.1

Μορφές εδάφους που ευνοούν την ύπαρξη πετρελαιοειδών κοιτασμάτων



4) Η **ραδιενεργή μέθοδος**. Αυτή βασίζεται στη μέτρηση της ακτινοβολίας γ διαφόρων στρωμάτων, που προέρχεται από την απορρόφηση βραδέων νετρονίων από άτομα υδρογόνου. Το υδρογόνο αυτό όμως μπορεί να ανήκει σε μόρια υδρογονανθράκων, αλλά και σε μόρια νερού ( $H_2O$ ).

Πρέπει να τονισθεί ότι όλες οι μέθοδοι για τον εντοπισμό κοιτασμάτων πετρελαίου **μόνο ενδείξεις** για την παρουσία τους παρέχουν. Οι ενδείξεις αυτές μόνο με δοκιμαστική γεώτρηση και στη συνέχεια με άντληση μπορούν να επιβεβαιωθούν.

### 4.3 Παραγωγή (ανόρυξη)

Με τον όρο **παραγωγή** εδώ εννοείται η μεταφορά του πετρελαίου από τα έγκατα της γης στην επιφάνεια για την οποία, απαιτείται διάτρηση των πετρωμάτων που καλύπτουν το πετρελαιοφόρο κοίτασμα με ειδικά γεωτρήπανα. Η **γεώτρηση** προχωρεί σε τόσο βάθος, ώστε να συναντήσει το στρώμα πετρελαίου, πράγμα που επιβεβαιώνεται με μια σειρά από δοκιμαστικές αντλήσεις.

Με τη γεώτρηση σχηματίζεται μια οπή με διάμετρο 40-45 cm, τα τοιχώματα της οποίας επενδύονται με χαλύβδινους σωλήνες, ώστε να προστατεύεται από την είσοδο σ' αυτή νερού ή χυμάτων. Έτσι σχηματίζονται τα λεγόμενα **φρέατα** που αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα της περιοχής στην οποία γίνεται η εκμετάλλευση του πετρελαιοφόρου κοιτάσματος.

Κατά τη διάρκεια της γεώτρησης το γεωτρήπανο λιπαίνεται και ψύχεται με μίγμα νερού και χώματος που σχηματίζει ιλύ (λάσπη) και που συγχρόνως εμποδίζει την απότομη έξοδο αερίων, νερού ή πετρελαίου, αλλά και μεταφέρει τα θραύσματα των βράχων της γεώτρησης, από τον πυθμένα του φρέατος στην επιφάνεια της γης.

Η άνοδος του πετρελαίου στην επιφάνεια γίνεται με έναν από τους παρακάτω τρόπους (σχ. 4.2):

- 1) Με φυσικό τρόπο, δηλαδή μόνο με την πίεση των υπερκείμενων στρωμάτων αερίων. Στην αρχή τουλάχιστον η πίεση αυτή είναι αρκετή, ώστε να ανεβάζει το πετρέλαιο ως την επιφάνεια υπό μορφή πίδακα.
- 2) Με έγχυση νερού υπό πίεση.
- 3) Με άντληση, με ειδικές αντλητικές μηχανές.
- 4) Εμφυσώντας  $CO_2$  ή αέριους υδρογονάνθρακες υπό πίεση από άλλο πηγάδι.
- 5) Με άλλες μεθόδους.

### 4.4 Επεξεργασία του πετρελαίου

Μετά την παραγωγή του το πετρέλαιο υποβάλλεται σε μια σειρά από επεξεργασίες, με τις οποίες απαλλάσσεται από ανεπιθύμητα συστατικά ή αποκτά επιθυμητές ιδιότητες.

Οι επεξεργασίες αυτές κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

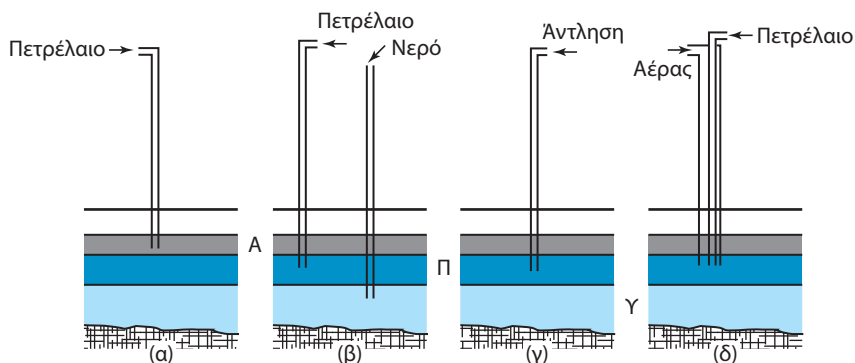
- 1) Προκαταρκτικές διεργασίες.
- 2) Απόσταξη.
- 3) Τελικές διεργασίες μετά την απόσταξη.

Το σύνολο αυτών των επεξεργασιών αποτελούν τη **δίυλιση** του πετρελαίου, της οποίας το μεγαλύτερο μέρος γίνεται σε ειδικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις, τα γνωστά μας **διυλιστήρια**.

#### – Προκαταρκτικές επεξεργασίες

Με τις διεργασίες αυτές που γίνονται πριν από την απόσταξη, το φυσικό πετρέλαιο απαλλάσσεται από ανεπιθύμητα συστατικά που παρασύρονται κατά την ανόρυξη. Οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνουν:

- 1) **Φυσικό καθαρισμό**, δηλαδή απομάκρυνση των γαιωδών προσμείξεων (χώματα, άμμος, λάσπη) που επιτυγχάνεται με φυγοκεντρική ροή σε κυλινδρικά τύ-



Σχ. 4.2

Μέθοδοι παραγωγής πετρελαίου

μπανα και με καθίζηση στις δεξαμενές αποθήκευσης.

2) **Απαερίωση**, δηλαδή αποχωρισμό από τα αέρια συστατικά που περιέχει το πετρέλαιο και που επιβάλλεται γιατί τα αέρια:

α) Είναι καύσιμη ύλη, άριστης ποιότητας.

β) Είναι ανεπιθύμητα όταν παραμένουν μέσα στο πετρέλαιο.

γ) Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βενζίνης (βλ. § 4.6).

3) **Αφυδάτωση**, δηλαδή αφαίρεση όσο το δυνατό μεγαλύτερου μέρους του νερού που έχει αντληθεί μαζί με το πετρέλαιο. Για την αφυδάτωση εφαρμόζονται οι εξής μέθοδοι:

α) Καθίζηση (settling), που βασίζεται στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ πετρελαίου και νερού.

β) Απομάκρυνση με ειδικούς τρόπους.

Η απομάκρυνση του νερού δυσχεραίνεται, όταν το νερό σχηματίζει με το πετρέλαιο γαλακτώμα, που πρέπει να διασπασθεί πριν επιχειρηθεί αφυδάτωση. Η διάσπαση του γαλακτώματος μπορεί να γίνει με χημική ή ηλεκτρική κατεργασία:

1) **Με χημική κατεργασία:** Στο πετρέλαιο προστίθενται ορισμένες ουσίες που προκαλούν τη συνένωση των σταγονιδίων νερού, τα οποία είναι διάσπαρτα μέσα στο πετρέλαιο. Τα σταγονίδια αυτά μετά τη συνένωσή τους κατακαθίζουν στον πυθμένα των δεξαμενών, απ' όπου εύκολα απομακρύνονται με διαχωρισμό. Ουσίες του τύπου αυτού κυκλοφορούν με διάφορα εμπορικά ονόματα, όπως το αμερικανικό σκεύασμα TRETOLITE.

2) **Με ηλεκτρική κατεργασία:** Το πετρέλαιο διέρχεται από ηλεκτρικό διαχωριστή με ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, πάνω από 5000 V, που προκαλεί τη συνένωση των σταγονιδίων νερού, που έτσι διαχωρίζεται. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στο ηλεκτρικό φορτίο που τα σταγονίδια νερού αποκτούν κατά την τριβή με το πετρέλαιο. Το φορτίο αυτό είναι συνήθως αρνητικό και γι' αυτό τα σταγονίδια του νερού, οδεύουν προς το θετικό πόλο του ηλεκτρικού πεδίου όπου συνενώνονται και καθιζάνουν.

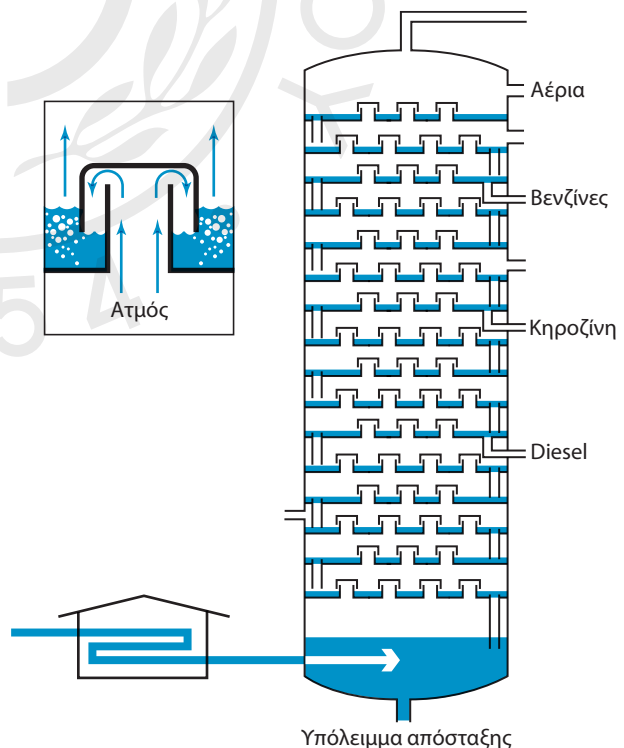
#### 4.5 Διύλιση

Η **διύλιση** ή **κλασματική απόσταξη** είναι η διεργασία με την οποία το φυσικό πετρέλαιο διαχωρίζεται σε ομάδες συστατικών που καλούνται **κλάσματα**, ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία αποστάζουν.

Το φυσικό πετρέλαιο αποτελείται (βλ. § 3.5) από χιλιάδες συστατικά, κυρίως υδρογονάνθρακες, που ο διαχωρισμός μεταξύ τους είναι αδύνατος και άσκοπος. Υπολογίζεται ότι μόνο η βενζίνη περιέχει 400 είδη

υδρογοναθράκων και βεβαίως πολύ περισσότερα είδη περιέχουν τα βαρύτερα κλάσματα. Η απόσταξη λοιπόν αποβλέπει στον διαχωρισμό των υδρογονανθράκων σε ομάδες. Κάθε ομάδα περιέχει υδρογονάνθρακες που αποστάζουν σε ορισμένα όρια θερμοκρασίας και στο σύνολό τους αποτελούν ορισμένο είδος καυσίμου, του οποίου οι ιδιότητες επιτρέπουν και συγκεκριμένη εφαρμογή. Έτσι μετά τα αέρια συστατικά, που αποτελούνται από υδρογονάνθρακες με 1 ως 4 άτομα άνθρακα, αποστάζουν υδρογονάνθρακες που έχουν σημείο βρασμού μεταξύ 50°C και 180°C και αποτελούν τις νάφθες από τις οποίες παράγονται οι βενζίνες. Ακολουθούν υδρογονάνθρακες που αποτελούν την κηροζίνη (150-240°C), το πετρέλαιο diesel (200-360°C) και τέλος αυτό που δεν έχει αποσταχθεί μέχρι τους 360°C υπό ατμοσφαιρική πίεση αποτελεί το **υπόλειμμα απόσταξης** ή **μαζούτ**. Αυτό χρησιμοποιείται κυρίως ως καύσιμο των ναυτικών μηχανών, αλλά και ως πρώτη ύλη για ορυκτέλαια, με περαιτέρω απόσταξη «εν κενώ». Στο υπόλειμμα της απόσταξης «εν κενώ» βρίσκονται άσφαλτος ή κυλινδρέλαια, που αποτελούν πρόσθετα προϊόντα της βιομηχανίας των διυλιστηρίων με εξαιρετική εμπορική σπουδαιότητα.

Η απόσταξη γίνεται σε κατακόρυφη στήλη που ονομάζεται **πύργος απόσταξης** (σχ. 4.3) και συνήθως



Σχ. 4.3

Πύργος απόσταξης

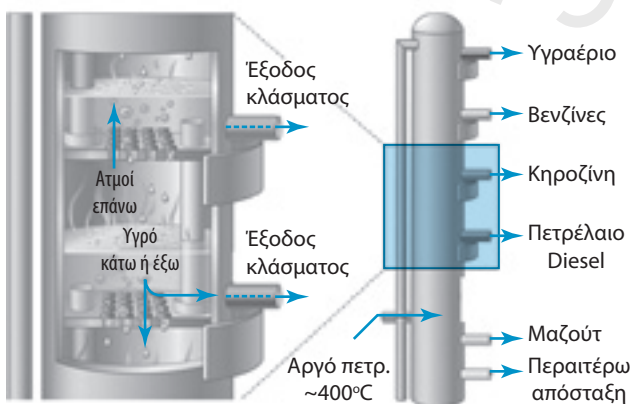
λόγω του ύψους της ξεχωρίζει στις εγκαταστάσεις των διυλιστηρίων (σχ. 4.4).

Τα στοιχεία απόσταξης βρίσκονται μέσα στον πύργο σε επάλληλους οριζόντιους δίσκους (σχ. 4.5). Το αργό πετρέλαιο (φυσικό πετρέλαιο) προθερμαίνεται στους εναλλάκτες θερμότητας και μπαίνει στον σωληνωτό θερμαντήρα της καμίνου που θερμαίνεται στους 400°C περίπου. Το νέφος των ατμών και των σταγονιδίων εισέρχεται λίγο πιο κάτω από το μέσο της στήλης και οι ατμοί, καθώς ανέρχονται προς το πάνω μέρος της στήλης ψύχονται και μέρος από αυτούς υγροποιείται και συγκεντρώνεται στους οριζόντιους δίσκους. Το υγρό που υπερεκχυλίζει κατέρχεται προς τον παρακάτω δίσκο, που είναι θερμότερος και το υγρό ατμοποιείται ξανά. Έτσι οι ατμοί, καθώς ανέρχονται, εμπλουτίζονται συνεχώς με πτητικότερα συστατικά, ενώ τα λιγότερο πτητικά, που αντιστοιχούν σε βαρύτερα κλάσματα, συμπυκνώνονται στους κατώτερους δίσκους. Μ' αυτόν τον τρόπο τα συμπυκνώματα που περιέχει



**Σχ. 4.4**

Αποψη του διυλιστηρίου Ελευσίνας όπου διακρίνονται οι πύργοι απόσταξης



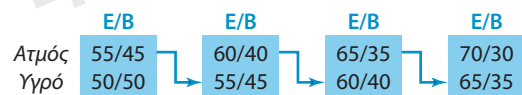
**Σχ. 4.5**

Λεπτομέρεια πύργου απόσταξης που δείχνει τον τρόπο διαχωρισμού των κλασμάτων φυσικού πετρελαίου

κάθε δίσκος διατηρούν ορισμένη θερμοκρασία και αν η θερμοκρασία βρασμού των υδρογονανθράκων, που διέρχονται από αυτά, είναι υψηλότερη, τότε συμπυκνώνονται και παγιδεύονται. Οι υδρογονάνθρακες όμως που έχουν θερμοκρασία βρασμού χαμηλότερη από αυτή που επικρατεί στη συγκεκριμένη περιοχή δίσκων, ανέρχονται πιο ψηλά, ώσπου να συμπυκνωθούν. Η αρχή αυτή, στην οποία βασίζεται η διύλιση, μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτή αν ληφθεί υπόψη ότι τα υγρά με το χαμηλότερο σημείο βρασμού, δηλαδή τα πτητικότερα, ατμοποιούνται ευκολότερα. Επομένως οι ατμοί ενός μείγματος υγρών με διαφορετικά σημεία βρασμού, όπως είναι το πετρέλαιο diesel, είναι εμπλουτισμένοι με τα πτητικότερα συστατικά, σε σύγκριση με το αρχικό μείγμα. Έτσι και το συμπύκνωμα που θα προκύψει θα έχει μεγαλύτερη αναλογία από το πτητικότερο συστατικό, που θα είναι και το ελαφρότερο.

Αν για παράδειγμα με Ε συμβολίσουμε τα ελαφρότερα (πτητικότερα) και με Β τα βαρύτερα (λιγότερο πτητικά) συστατικά ενός μείγματος υδρογονανθράκων Ε/Β σε αναλογία 50/50, το μείγμα αυτό κατά το βρασμό θα δώσει αέρια φάση με αναλογία έστω 55/45, δηλαδή πλουσιότερο σε πτητικά συστατικά, αφού αυτά εξατμίζονται, ευκολότερα από τα βαρύτερα, που είναι λιγότερο πτητικά συστατικά. Αν ο ατμός στον αμέσως επόμενο δίσκο συναντήσει υγρό της αναλογίας περίπου 55/45, τότε το μεν βαρύ συστατικό συμπυκνώνεται, ενώ η λανθάνουσα θερμότητα, που προκύπτει από τη συμπύκνωση, προκαλεί περαιτέρω εξάτμιση του πτητικού συστατικού, οπότε η νέα αναλογία τείνει προς το 60/40 κ.ο.κ.

Την παραπάνω αρχή, που αποτελεί τη βάση της κλασματικής απόσταξης (συνεχούς), παριστάνει το παρακάτω διάγραμμα.



#### 4.6 Προϊόντα του φυσικού πετρελαίου

Τα σπουδαιότερα προϊόντα που προκύπτουν από τον διαχωρισμό του φυσικού πετρελαίου παρουσιάζονται στο σχήμα 4.5 και αναγράφονται στον πίνακα 4.1. Είναι φανερό ότι η κατάταξη γίνεται με βάση τη θερμοκρασία απόσταξης που συμβαδίζει με το μέγεθος του μορίου των υδρογονανθράκων, δηλαδή με τον αριθμό ατόμων άνθρακα και με την πυκνότητά τους.

Συνοπτικά για τα προϊόντα αυτά μπορούμε να πούμε τα εξής:

**Πίνακας 4.1**  
**Τα σπουδαιότερα προϊόντα διύλισης του φυσικού πετρελαίου**

| a/a | Προϊόν                         | Ενδεικτικός αριθμός ατόμων άνθρακα | Θερμοκρασία απόσταξης (°C) | Πυκνότητα (kg/l) | Παρατηρήσεις                             |
|-----|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------|------------------|--|
| 1.  | α) Αέρια                       | 1-2                                |                            |                  | Απόσταση σε ατμοσφαιρική πίεση           |
|     | β) Υγραέρια                    | 3-4                                | Κάτω από 0°C               | 0,6-0,7*         |  |
| 2   | Βενζίνες                       | 4-10                               | 50-180                     | 0,70-0,75        |  |
| 3.  | Κηροζίνη (φωτιστικό πετρέλαιο) | 10-16                              | 150-240                    | 0,80             |  |
| 4.  | Πετρέλαιο Diesel               | 12-20                              | 200-360                    | 0,80-0,86        |  |
| 5.  | Υπόλειμμα απόσταξης (μαζούτ)   | πάνω από 20                        | πάνω από 360               | 0,90-1,00        |  |
| 6.  | Λιπαντέλαια                    | πάνω από 20                        | πάνω από 360               | 0,90-0,98        | με περαιτέρω απόσταξη του μαζούτ εν κενώ |
| 7.  | Άσφαλτος                       | πάνω από 20                        | πάνω από 360               | 1,0-1,20         |  |

\* Σε υγρή κατάσταση

#### 4.6.1 Αέρια

Είναι τα πρώτα κλάσματα και αποτελούνται κυρίως από υδρογονάνθρακες με 1-4 άτομα άνθρακα. Οι δυο πρώτοι υδρογονάνθρακες με 1 ή 2 άτομα άνθρακα είναι το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και το αιθάνιο ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) που χρησιμοποιούνται συνήθως ως καύσιμα του διυλιστηρίου. Οι υδρογονάνθρακες με 3 ή 4 άτομα άνθρακα (προπάνιο, βουτάνιο) αποτελούν τα **υγραέρια**, που οφείλουν την ονομασία τους στο ότι είναι μεν υπό συνθήκη πίεσης και θερμοκρασία αέρια, υγροποιούνται όμως πολύ εύκολα με μικρή πίεση και έτσι φέρονται στο εμπόριο υγροποιημένα σε χαλύβδινες φιάλες. Έχουν μεγάλη κατανάλωση για οικιακούς, εργαστηριακούς ή και βιομηχανικούς σκοπούς και χρησιμοποιούνται επίσης ως καύσιμα βενζινομηχανών αυτοκινήτων.

#### 4.6.2 Βενζίνες

Τα πρώτα υγρά αποστάγματα του πετρελαίου άρα και τα πτητικότερα και ελαφρότερα κλάσματα του αποτελούν προϊόν γνωστό ως **νάφθα**. Αποτελείται από υδρογονάνθρακες με 4-10 άτομα άνθρακα και από αυτήν παράγονται οι βενζίνες.

Είναι το κύριο καύσιμο των βενζινομηχανών. Με βενζινομηχανές κινούνται τα περισσότερα επιβατικά αυτοκίνητα, ελάχιστα αεροπλάνα, μικρά σκάφη (άκατοι) και λειτουργούν βιομηχανικοί κινητήρες μικρής ισχύος.

#### 4.6.3 Κηροζίνη ή φωτιστικό πετρέλαιο

Από την ανακάλυψη του πετρελαίου (1859) ως το τέλος του Α΄ Παγκόσμιου Πολέμου (1918) το φωτιστι-

κό πετρέλαιο ήταν το πολυτιμότερο προϊόν της διύλισης που χρησιμοποιούνταν κυρίως για φωτισμό και θέρμανση. Μετά τον εξηλεκτρισμό που ακολούθησε, η χρήση του μειώθηκε. Στο μεσοπόλεμο χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βενζίνης με πυρόλυση.

Μετά το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο επανήλθε στο προσκήνιο με ειδικές προδιαγραφές ως το κατ' εξοχήν καύσιμο των αεριοστροβίλων (jet engines). Το σημείο ανάφλεξης (flash point) της κηροζίνης (περί τους 40°C) είναι υψηλότερο από αυτό της βενζίνης (περί τους -40°C) γι' αυτό αποτελεί το αεροπορικό καύσιμο.

#### 4.6.4 Πετρέλαιο diesel (gasoil)

Το πετρέλαιο diesel είναι το κατ' εξοχήν καύσιμο των ΜΕΚ και ειδικότερα των ταχύστροφων πετρελαιομηχανών, ενώ στις βραδύστροφες μηχανές, που χρησιμοποιούν τα πλοία του Εμπορικού Ναυτικού για την πρόωσή τους, έχει αντικατασταθεί από το μαζούτ. Αυτό είναι το τελευταίο κλάσμα-απόσταγμα της ατμοσφαιρικής απόσταξης του πετρελαίου και έχει τελικό σημείο ζέσεως περίπου 360°C. Πάνω από τη θερμοκρασία αυτή επέρχεται θερμική διάσπαση των υδρογοναθράκων που οδηγεί στην πυρόλυσή τους. Παράπερα απόσταση συνεπώς, μόνο με ελαττωμένη πίεση (κενό) μπορεί να συνεχισθεί.

#### 4.6.5 Μαζούτ

Αποτελεί το **υπόλειμμα της απόσταξης** δηλαδή το μέρος εκείνο του φυσικού πετρελαίου, που δεν έχει αποσταχθεί ως τους 360°C. Περιέχει τους βαρύτερους υδρογονάνθρακες με άτομα άνθρακα περισσότερα

από 20 και γι' αυτό έχει και τη σχετικά μεγαλύτερη πυκνότητα (0,90-1,00 kg/l). Περιέχει ακόμα πολλές από τις προσμείξεις του φυσικού πετρελαίου γι' αυτό και χρησιμοποιήθηκε κυρίως σε μηχανές εξωτερικής καύσεως (ατμομηχανές). Σήμερα όμως, λόγω του χαμηλού κόστους του, είναι το κατ'εξοχήν καύσιμο των πετρελαιομηχανών του Εμπορικού Ναυτικού (ντιζελομηχανών).

Με παραπέρα απόσταξη «εν κενώ», δηλαδή με πολύ χαμηλή πίεση, το μαζούτ διαχωρίζεται σε:

1) **Απόσταγμα**, που αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή των λιπαντέλαιων και

2) **Υπόλειμμα**, που μπορεί να αποτελείται από:

α) **κυλινδρέλαια**, αν το αρχικό φυσικό πετρέλαιο έχει παραφινική βάση ή

β) **άσφαλτο**, αν το αρχικό φυσικό πετρέλαιο έχει ασφαλτική βάση.

Υποπροϊόντα της απόσταξης είναι η παραφίνη και η βαζελίνη, που χρησιμοποιούνται σε σημαντικές εφαρμογές, όπως η μεν παραφίνη π.χ. για βερνίκια στίλβωσης και η βαζελίνη ως φαρμακευτικό έκδοχο.

#### 4.7 Διεργασίες μετά τον διαχωρισμό

Τα προϊόντα απόσταξης του φυσικού πετρελαίου υποβάλλονται σε διάφορες διεργασίες που αποσκοπούν στη βελτίωση των ιδιοτήτων τους και τη μετατροπή τους σε άλλα προϊόντα ανάλογα με τις ανάγκες ή τη ζήτηση που παρουσιάζουν.

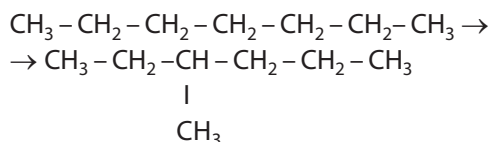
Σπουδαιότερες από τις διεργασίες αυτές είναι:

##### 4.7.1 Αναμόρφωση της νάφθας (reforming)

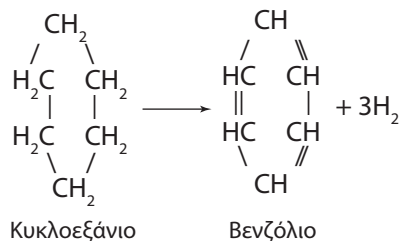
Είναι θερμική κατεργασία χημικής μετατροπής, με την οποία επέρχεται μοριακή ανακατάταξη των υδρογονανθράκων που μεταβάλλει τη δομή τους, ώστε να προκόψουν υδρογονάνθρακες με καλύτερες ιδιότητες και κυρίως με μεγαλύτερο αριθμό οκτανίου, δηλαδή καλύτερη ποιότητα καύσης (βλ. § 5.4).

Η αναμόρφωση επιτυγχάνεται κυρίως με θέρμανση της βενζίνης σε 500°C – 600°C υπό πίεση 15-20 bar. Συχνά χρησιμοποιούνται καταλύτες, δηλαδή ουσίες με βάση λευκόχρυσο σε αργιλοπυριτικό φορέα που επιταχύνουν την αντίδραση αναμόρφωσης ή τη στρέφουν προς την επιθυμητή κατεύθυνση.

Τυπικό παράδειγμα αντίδρασης αναμόρφωσης αποτελεί η μετατροπή του n-επτανίου (αριθμός οκτανίου 0) στο ισομερές ισο-εξάνιο.



Άλλο παράδειγμα αναμορφωτικής αντίδρασης αποτελεί η μετατροπή κυκλοπαραφινών σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες, που συνοδεύεται με παραγωγή υδρογόνου (αφυδρογόνωση) και οδηγεί επίσης στη βελτίωση της οκτανικής απόδοσης.



Το παραγόμενο υδρογόνο χρησιμεύει για την υδρογόνωση, δηλαδή τη μετατροπή ακόρεστων υδρογονανθράκων σε κορεσμένους, καθώς και στην αποθείωση των προϊόντων διύλισης, δηλαδή στην απομάκρυνση του θείου.

Προϊόντα αναμόρφωσης είναι:

- 1) Βενζίνη με μεγαλύτερο αριθμό οκτανίου.
- 2) Αέρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή συνθετικής βενζίνης.

##### 4.7.2 Εξευγενισμός

Την κατεργασία αυτή υφίστανται μερικά προϊόντα του φυσικού πετρελαίου και ο εξευγενισμός αποβλέπει στην απομάκρυνση συστατικών, των οποίων η παρουσία είναι επιβλαβής, όπως κεριά, κομμωδία συστατικά (ρητίνες), θειούχες ενώσεις κλπ. Κυριότερες μέθοδοι εξευγενισμού είναι:

1) **Κατεργασία με διάλυση PbO σε NaOH**. Είναι γνωστή στην τεχνολογία των πετρελαιοειδών ως Doctor Process και συνίσταται στην επεξεργασία της βενζίνης με μολυβδώδες νάτριο (NaPbO<sub>2</sub>). Αυτό παρασκευάζεται με διάλυση οξειδίου του μολύβδου (PbO) σε καυστική σόδα (NaOH) και έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή των δύσοσμων θειούχων ενώσεων σε μη δύσοσμες ενώσεις. Η διεργασία αυτή λέγεται **γλύκανση** (sweetening).

2) **Εξευγενισμός με απορροφητικές γαίες**. Με τη μέθοδο αυτή εκμεταλλευόμαστε την ιδιότητα που έχουν ορισμένες απορροφητικές γαίες να συγκρατούν εκλεκτικά με προσρόφηση ορισμένα ανεπιθύμητα συστατικά των προϊόντων απόσταξης του πετρελαίου.

3) **Εξευγενισμός με διαλύτες**. Ορισμένες οργανικές ύλες διαλύουν εκλεκτικά μερικά συστατικά των πετρελαιοειδών, που διαχωρίζονται έτσι από τα υπόλοιπα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται πολύ κατά τον εξευγενι-

σμό των ορυκτέλαιων με φουρφουράλη. Η φουρφουράλη είναι διαλύτης που παράγεται από τα πίσυρα και έχει την ιδιότητα να απομακρύνει από τα ορυκτέλαια ανεπιθύμητα συστατικά αρωματικής δομής.

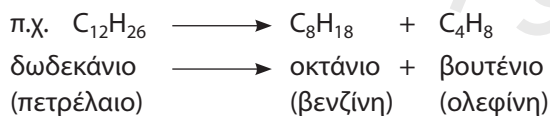
#### 4.7.3 Πυρόλυση (cracking)

**Πυρόλυση ή πυροδιάσπαση** είναι η θερμική κατεργασία με την οποία επιτυγχάνεται διάσπαση των μεγάλων ή μέτριων μορίων των υδρογονανθράκων προς υδρογονάνθρακες με μικρότερο μοριακό βάρος. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε π.χ. να μετατρέψουμε κηροζίνη ή πετρέλαιο diesel σε βενζίνη.

Για την πυρόλυση εφαρμόζονται δυο κυρίως μέθοδοι:

1) **Θερμική πυρόλυση.** Για τη μέθοδο αυτή ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται κυρίως πετρέλαιο diesel ή μαζούτ, που μετατρέπεται σε βενζίνη με απόδοση 20-50%. Το υπόλοιπο είναι αέρια και κλάσματα από βαρύτερα καύσιμα, μεταξύ των οποίων και το κωκ. Η πυρόλυση συνήθως γίνεται σε αέρια φάση, με θερμοκρασία 500°C και με πίεση 15-20 bar. Η επαφή των ατμών των υδρογονανθράκων με τα θερμά μεταλλικά τοιχώματα του θαλάμου αντίδρασης προκαλεί διάσπαση του μορίου τους με την οποία το πετρέλαιο diesel ή μαζούτ μετατρέπεται σε βενζίνη.

2) **Καταλυτική πυρόλυση.** Διαφέρει από τη θερμική πυρόλυση κατά το ότι στο θάλαμο αντίδρασης τοποθετούνται καταλύτες, δηλαδή ουσίες με βάση αργιλοπυριτικές ενώσεις. Οι ουσίες αυτές διευκολύνουν την αντίδραση της πυροδιάσπασης, αλλά και την κατευθύνουν προς την επιθυμητή πορεία, χωρίς να συμμετέχουν σ' αυτήν. Έτσι η αντίδραση της πυροδιάσπασης γίνεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και με καλύτερη απόδοση.



Από την πυροδιάσπαση προκύπτουν τα εξής προϊόντα:

1) **Βενζίνη**, που συνήθως αποτελεί το κύριο προϊόν της πυρόλυσης. Η απόδοση κυμαίνεται ανάλογα με την πρώτη ύλη και τις συνθήκες υπό τις οποίες γίνεται η πυρόλυση.

2) **Αέρια** (υδρογόνο, ελαφροί υδρογονάνθρακες).

3) **Υπόλειμμα**, που αποτελείται από βαριούς υδρογονάνθρακες και χρησιμοποιείται ως καύσιμο λεβήτων. Επειδή είναι πλούσιο σε ανθρακούχες ύλες είναι ακατάλληλο για πετρελαιομηχανές diesel. Συνήθως

αναμειγνύεται με ελαφρότερα προϊόντα (π.χ. πετρέλαιο diesel), ώστε να αποκτήσει επιθυμητές ιδιότητες.

#### 4.7.4 Κατεργασία των αερίων

Τόσο τα φυσικά αέρια όσο και τα αέρια που προκύπτουν από την απόσταξη ή πυρόλυση, υποβάλλονται κατ' αρχάς σε κλασματική απόσταξη με την οποία διαχωρίζονται:

1) Στο λεγόμενο **ξηρό αέριο**, δηλαδή μείγμα υδρογονανθράκων με ένα ή δυο άτομα άνθρακα (μεθάνιο, αιθάνιο, αιθυλένιο) που αποτελεί καύσιμο του διυλιστηρίου ή καύσιμο βιομηχανικής ή οικιακής εφαρμογής.

2) Στα **υγραέρια** που αποτελούνται από προπάνιο ( $C_3H_8$ ) και βουτάνιο ( $C_4H_{10}$ ). Φέρονται στο εμπόριο σε χαλύβδινες φιάλες, σε υγρή κατάσταση με μικρή πίεση και χρησιμοποιούνται:

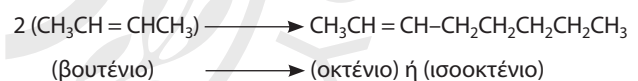
α) ως καύσιμο οικιακής χρήσης,

β) ως πρώτη ύλη στη βιομηχανία των **πετροχημικών**, και

γ) για την παραγωγή συνθετικής βενζίνης.

Η **σύνθεση βενζίνης** με πρώτες ύλες υγραέρια αποτελεί χημική αντίδραση ακριβώς αντίθετη από την πυροδιάσπαση: από ελαφρότερα συστατικά (υγραέρια) λαμβάνονται βαρύτερα (βενζίνη).

Π.χ.



Η πράξη αυτή του πολλαπλασιασμού των μορίων ονομάζεται **πολυμερισμός** και επιτυγχάνεται με δυο κυρίως τρόπους:

1) **Καταλυτικός πολυμερισμός με θειικό οξύ:** Το προς πολυμερισμό αέριο (βουτένιο) διαβιβάζεται στον αντιδραστήρα με τον καταλύτη. Έτσι προκύπτουν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες με 8 ή και 12 άτομα άνθρακα, που ύστερα από υδρογόνωση δίνουν κυρίως οκτάνιο με πρόσμειξη δωδεκανίου που είναι συστατικά της βενζίνης.

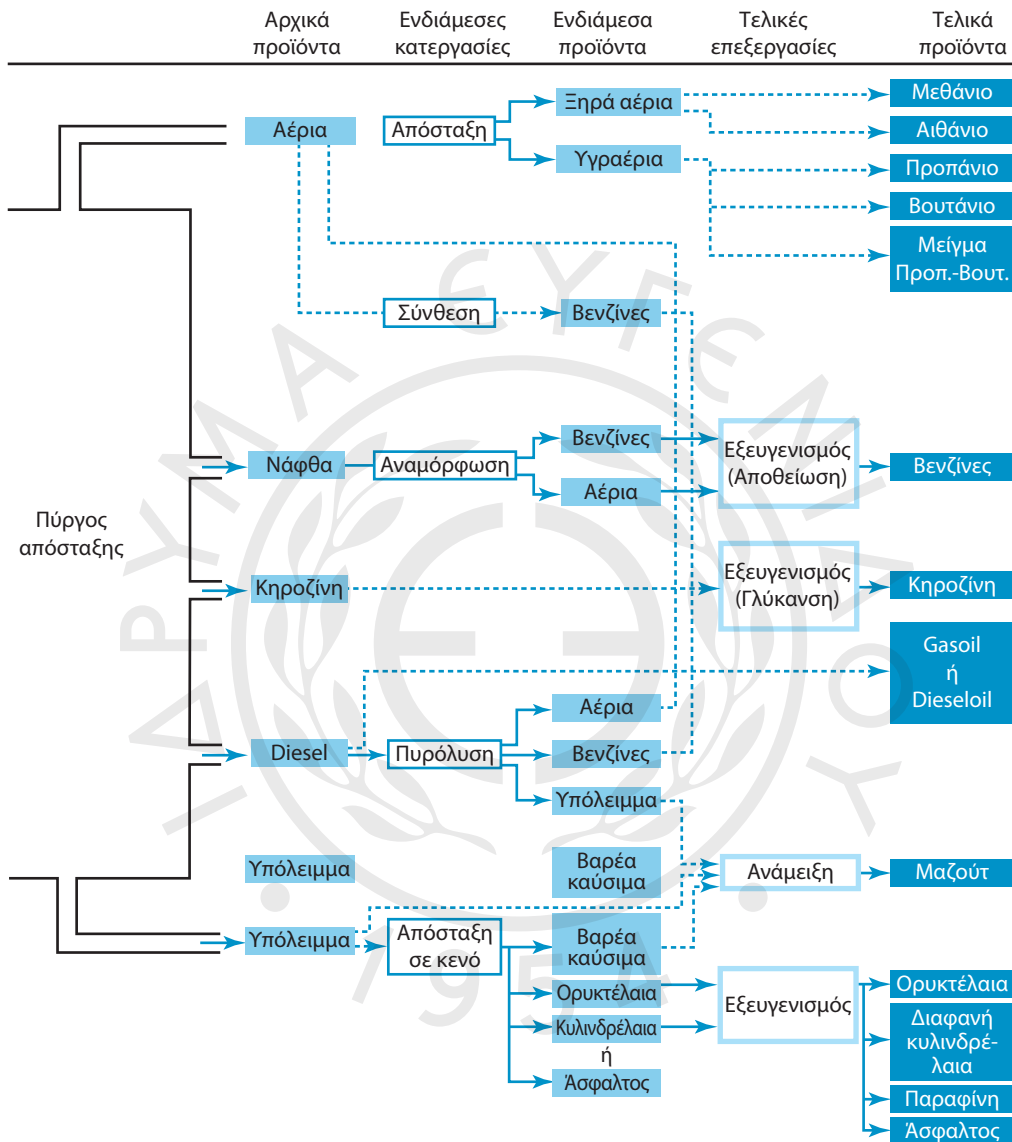
2) Η **καταλυτική αλκυλίωση**, όπου ισοβουτάνιο και βουτυλένιο δίνουν απευθείας ισοοκτάνιο, που είναι πολύ επιθυμητό συστατικό των βενζινών. Ο τρόπος αυτός είναι καλύτερος από τον προηγούμενο.

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κυριότερες φάσεις επεξεργασίας του φυσικού πετρελαίου.

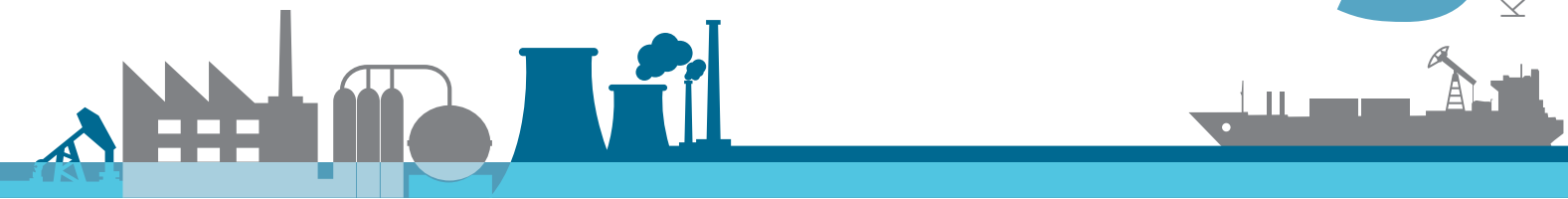
Όλες οι παραπάνω διεργασίες αφορούν στην επεξεργασία του φυσικού πετρελαίου, όπως αυτό παραλαμβάνεται από το διυλιστήριο και με βάση τις

τρέχουσες απαιτήσεις της αγοράς. Στην παραπάνω ανάπτυξη δεν αναφέρονται εξειδικευμένες διαδικασίες επεξεργασίας καυσίμων που αφορούν στη βελτίωση της ποιότητάς τους και την εναρμόνιση με κα-

νονισμούς και συμβάσεις, όπως είναι η ιξωδύλωση για τα υπολειμματικά καύσιμα (μαζούτ). Για αυτές γίνεται αναφορά στο αντίστοιχο κεφάλαιο των ναυτιλιακών καυσίμων (κεφ. 8).



**Σχ. 4.6**  
Οι κυριότερες φάσεις επεξεργασίας του φυσικού πετρελαίου



## 5.1 Γενικά

Η βενζίνη παράγεται από ελαφρότερα υγρά κλάσματα του φυσικού πετρελαίου που αποτελούν τη **νάφθα**, δηλαδή το πρώτο προϊόν της απόσταξης μετά τα υγραέρια. Χάρη στη μεγάλη πτητικότητα της, στην ευκολία δηλαδή με την οποία εξατμίζεται, η βενζίνη είναι το μόνο καύσιμο που εξαερώνεται, πριν εισαχθεί στη μηχανή. Αυτό εξασφαλίζει πλήρη ανάμειξη με τον αέρα και συνεπώς καλύτερες συνθήκες καύσης. Έχει όμως το μειονέκτημα να παρουσιάζει ευαισθησία ως προς την αντικροτικότητα, που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να καταστρέψει τον κινητήρα. Αυτό αντιμετωπίζεται με την κατάλληλη **ποιότητα** της βενζίνης.

Η βενζίνη, μέχρι τη δεκαετία του '60, ήταν το σπουδαιότερο καύσιμο, μιας και οι βενζινομηχανές αποτελούσαν σχεδόν τη μοναδική προωστήρια μηχανή για τα αυτοκίνητα και τα αεροπλάνα, δηλαδή τα κύρια μεταφορικά μέσα επιβατών. Ήδη για μεν τα αεροπλάνα η βενζίνη έχει τελείως εκτοπισθεί από την κηροζίνη, που είναι το κύριο καύσιμο των αεροπορικών αεροστροβίλων, στα δε αυτοκίνητα εκτοπίζεται συνεχώς από το πετρέλαιο diesel. Παρόλα αυτά παραμένει ένα από τα σημαντικότερα είδη καυσίμων. Στον τομέα των μεταφορών η βενζίνη είναι το πιο διαδεδομένο καύσιμο στην Ελλάδα (39% της κατανάλωσης καυσίμων στις μεταφορές για το έτος 2018), η δε ετήσια κατανάλωσή της στην Ελλάδα την ίδια χρονιά υπερβαίνει τα 3 εκατομμύρια τόνους.

Για ναυτικές μηχανές η βενζίνη έχει πολύ περιορισμένη σημασία, αφού χρησιμοποιείται μόνο για την πρόωση μικρού εκτοπίσματος σκαφών (βενζινάκατοι). Αυτό το κεφάλαιο περιορίζεται στην εξέταση των σπουδαιότερων ιδιοτήτων της βενζίνης.

## 5.2 Ιδιότητες – Προδιαγραφές

Οι ιδιότητες της βενζίνης εξαρτώνται από την ποιότητά της, που καθορίζεται με τις προδιαγραφές, δηλαδή με το σύνολο τιμών και απαιτήσεων για τις ιδιότητες που ενδιαφέρουν το κάθε προϊόν. Με τις προδιαγραφές για κάθε κατηγορία βενζίνης καθορί-

ζεται η ποιότητα εκείνη, που θα εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία και την καλή απόδοση της μηχανής για την οποία προορίζεται.

Οι προδιαγραφές δεν έχουν στατικό χαρακτήρα. Τροποποιούνται, προσαρμόζονται ή επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- 1) Εξέλιξη των βενζινομηχανών.
- 2) Διαθεσιμότητα της βενζίνης.
- 3) Κόστος.
- 4) Προστασία περιβάλλοντος.
- 5) Συναλλαγματικοί λόγοι.

Ο πίνακας 5.1 περιέχει τις προδιαγραφές της βενζίνης που ισχύουν σήμερα στη χώρα μας και στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Από τις ιδιότητες που καθορίζουν οι παραπάνω προδιαγραφές μεγαλύτερη σπουδαιότητα έχουν:

- 1) Η πτητικότητα της βενζίνης (στοιχεία 7 και 8),

**Πίνακας 5.1**  
**Προδιαγραφές βενζινών**

| Κύρια χαρακτηριστικά                    | Βενζίνη Premium Αμόλυβδη |
|---|--------------------------|
| 1. Αριθμός οκτανίου (RON)               | 95 ελαχ.                 |
| 2. Βενζόλιο, % κ.ο.                     | 1 μεγ.                   |
| 3. Πυκνότητα σε 15°C, kg/m <sup>3</sup> | 720-775                  |
| 4. Θείο, mg/kg                          | 10                       |
| 5. Κομμίδες υπόλειμμα (gum), mg/100 ml  | 5 μεγ.                   |
| 6. Περιεκτικότητα σε οξυγόνο, % κ.β.    | 2,7 μεγ.                 |
| 7. Απόσταξη                             |                          |
| Απόσταγμα σε 70°C, % κ.ο.               | 20-50                    |
| Απόσταγμα σε 100°C, % κ.ο.              | 46-71                    |
| Απόσταγμα σε 150°C, %κ.ο.               | 75 ελαχ.                 |
| Τέλος απόσταξης, °C                     | 210 μεγ.                 |
| Υπόλειμμα απόσταξης, %                  | 2 μεγ.                   |
| 8. Τάση ατμών σε 38°C (RVP), kPa        | 45-80                    |
| 9. Οξυγονούχες ουσίες, % κ.ο.           |                          |
| – Αιθανόλη                              | 5,0                      |
| – Ισοπροπυλική αλκοόλη                  | 10,0                     |



- 2) η ποιότητα καύσης που εκφράζεται με την αντι-κροτικότητα (στοιχεία 1 και 9) και  
3) ο βαθμός καθαρότητας (στοιχεία 2, 4 και 5).

### 5.3 Πτητικότητα

Είναι η ιδιότητα που εκφράζει το πόσο εύκολα ή δύσκολα εξατμίζεται ορισμένη ποσότητα βενζίνης κάτω από ορισμένες συνθήκες. Έχει ιδιαίτερη σημασία για τη βενζίνη, γιατί είναι το μόνο καύσιμο που εισέρχεται στη μηχανή αφού προηγουμένως **εξαεριοθεύ** και αναμειχθεί με τον αέρα σε ειδικό εξάρτημα της μηχανής που λέγεται **εξαεριοτήρας** (καρμπυρατέρ). Στον κύλινδρο της μηχανής ατμοποιείται και η βενζίνη εισέρχεται σε μορφή λεπτότατων σταγονιδίων. Πρέπει λοιπόν η βενζίνη να έχει τέτοια πτητικότητα, ώστε να εξασφαλίζει την τροφοδότηση της μηχανής με μείγμα ατμών βενζίνης-αέρα στην κατάλληλη αναλογία και πάντοτε μέσα στα όρια αναφλεξιμότητας, που για τη βενζίνη είναι 1-7% κατ' όγκο (βλ. πίνακα 2.2).

Η βενζίνη περιέχει περίπου 400 υδρογονάνθρακες με αριθμό ατόμων άνθρακα από 4 έως 12, που έχουν εύρος σημείων ζέσης (βρασμού) περίπου 170°C. Άρα υπάρχουν συστατικά με διαφορετική πτητικότητα.

#### - Εύρεση στοιχειομετρικής αναλογίας μείγματος αέρα/βενζίνης

Η θεωρητική τιμή της αναλογίας αέρα-καυσίμου ( $AFR_{\theta}$ ) για τη βενζίνη σε μονάδες kg αέρα/kg βενζίνης (κατά βάρος) δίνεται από τον τύπο (βλ. § 2.6.1):

$$AFR_{\theta} = 11,61 \cdot C + 34,78 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) \frac{kg \text{ αέρα}}{kg \text{ καυσίμου}}$$

Με αντικατάσταση της τυπικής στοιχειακής αναλογίας για τη βενζίνη, όπου  $C = 0,865$ ,  $H = 0,135$  και  $O = 0$ , παίρνουμε:

$$AFR_{\theta} = 14,7 \frac{kg \text{ αέρα}}{kg \text{ καυσίμου}}$$

Η αναλογία αυτή (14,7) ονομάζεται **στοιχειομετρική αναλογία** ή **στοιχειομετρική δύναμη μείγματος** γιατί προκύπτει από τις εξισώσεις καύσης των στοιχείων που αποτελούν τη βενζίνη (βλ. § 2.6.1). Στις διάφορες φάσεις λειτουργίας των βενζινομηχανών εντούτοις, η αναλογία αυτή είναι άλλοτε μεγαλύτερη (πλούσιο μείγμα για το ξεκίνημα) κι άλλοτε μικρότερη (πτωχό μείγμα για οικονομική οδήγηση), όπως δείχνει ο πίνακας 5.2.

**Πίνακας 5.2**  
**Μεταβολή της αναλογίας αέρα-καυσίμου**  
**στις διάφορες φάσεις λειτουργίας της βενζινομηχανής**

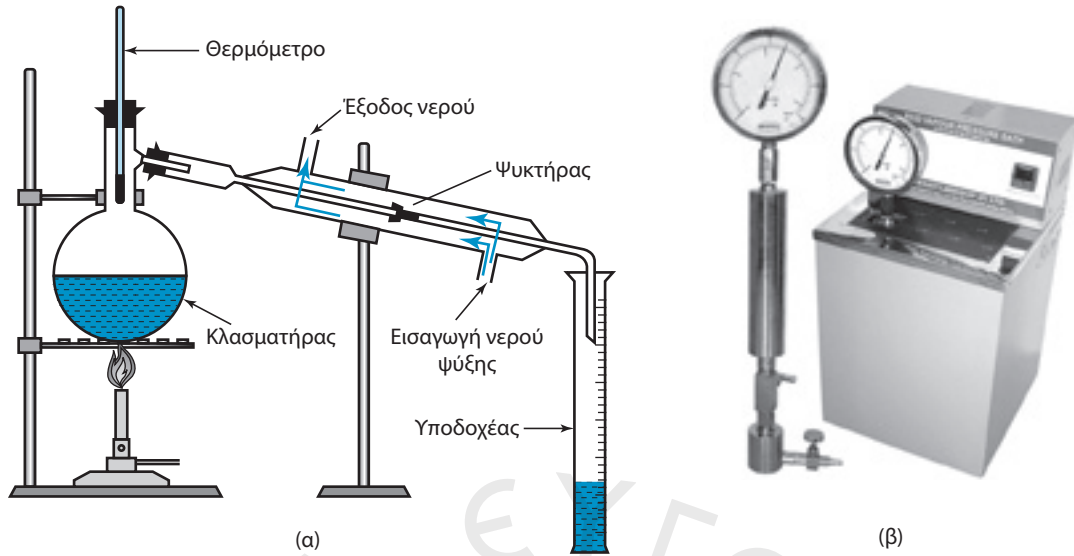
| Φάση λειτουργίας               | Αναλογία αέρα-καυσίμου (AFR) σε kg αέρα/kg καυσίμου | Χαρακτηρισμός μείγματος (στοιχειομετρική αναλογία 14,7) |
|--------------------------------|---|---|
| Εκκίνηση                       | 1 έως 7   | πολύ πλούσιο  |
| Επιτάχυνση                     | 12  | πλούσιο   |
| Κανονική ταχύτητα (οικονομική) | 14,5 έως 17   | κανονικό έως πτωχό                                      |
| Υψηλή ταχύτητα                 | 12 έως 14,5   | πλούσιο έως κανονικό                                    |

Για τιμές της αναλογίας στο 12, που είναι 20% περίπου πλουσιότερη από τη στοιχειομετρική, έχουμε τη μεγαλύτερη ισχύ της μηχανής, που χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση, ενώ για τιμές της αναλογίας στο 17, που είναι 20% περίπου πτωχότερη από τη στοιχειομετρική, έχουμε τη μικρότερη κατανάλωση, δηλαδή την οικονομικότερη λειτουργία της μηχανής.

Η πτητικότητα της βενζίνης ελέγχεται με δυο δοκιμές:

1) **Με την καμπύλη απόσταξης**. Σ' ένα κλασματήρα αποσπάται ορισμένη ποσότητα βενζίνης υπό συνθήκες που έχουν καθοριστεί με απόλυτη ακρίβεια σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D86-12. Η βενζίνη μετά την εξατμίση της συμπυκνώνεται σε υδρόψυκτο σωλήνα και συλλέγεται σε βαθμολογημένο ογκομετρικό κύλινδρο [σχ. 5.1(α)]. Καταγράφονται οι θερμοκρασίες, στις οποίες συλλέγονται ορισμένα ποσοστά του αρχικού δείγματος (10%, 50%, 90%) και με τα στοιχεία αυτά καταρτίζεται ένας πίνακας θερμοκρασιών-κλασμάτων ή χαράσσεται καμπύλη (γραφική παράσταση) που αποτελεί την καμπύλη απόσταξης. Τις τιμές απόσταξης για τους 70°C, 100°C και 150°C δίνει ο πίνακας προδιαγραφών της βενζίνης (πίν. 5.1), ενώ η συσκευή [στο σχ. 5.1(α)] περιγράφεται λεπτομερέστερα στο κεφάλαιο 12.

2) **Με την τάση ατμών (μέθοδος Reid)**. Σύμφωνα με τη μέθοδο Reid (πρότυπη μέθοδος ASTM D-323-20A) σε κλειστό μεταλλικό δοχείο Δ θερμαίνεται στους 38°C μια ποσότητα 100 cm<sup>3</sup> βενζίνης [σχ. 5.1(β)] και καταγράφεται η πίεση που αναπτύσσεται από τους παραγόμενους ατμούς της βενζίνης. Η πίεση αυτή (RVP) συνήθως κυμαίνεται από 35 ως 80 kPa. Τα ακριβή όρια τιμών καθορίζονται από τις αντίστοιχες προδιαγραφές (πίν. 5.1).



Σχ. 5.1

Συσκευές ελέγχου πτητικότητας.

(α) Συσκευή απόσταξης. (β) Συσκευή μέτρησης τάσης ατμών (Reid)

Τα όρια τιμών πτητικότητας της βενζίνης, τα οποία καθορίζουν οι σχετικές προδιαγραφές, πρέπει να τηρούνται με σχολαστικότητα, αλλιώς είναι δυνατόν να προκληθούν διάφορες ανωμαλίες στη μηχανή.

### 5.3.1 Χαμηλή πτητικότητα

Προδίδεται από:

1) Τάση ατμών κατά Reid (RVP) μικρότερη από τα ελάχιστα όρια που η αντίστοιχη προδιαγραφή καθορίζει.

2) Θερμοκρασία απόσταξης πάνω από τα ανώτατα όρια τιμών που αντιστοιχούν σε κάθε κλάσμα.

Οι συνέπειες για τη λειτουργία της μηχανής από τη χαμηλή πτητικότητα της βενζίνης είναι:

- Δυσχέρεια στην εκκίνηση.
- Κακή προθέρμανση.
- Μειωμένη επιτάχυνση.
- Κακή διανομή του καυσίμου στους κυλίνδρους.
- Ρύπανση του λαδιού με καύσιμο.

### 5.3.2 Υψηλή πτητικότητα

Προδίδεται από:

1) Τάση ατμών κατά Reid (RVP) μεγαλύτερη από τα ανώτατα όρια, που η αντίστοιχη προδιαγραφή καθορίζει.

2) Θερμοκρασία απόσταξης κάτω από τα ελάχιστα όρια τιμών που αντιστοιχούν σε κάθε κλάσμα.

Και η υψηλή πτητικότητα της βενζίνης είναι ανεπιθύμητη, γιατί έχει δυσάρεστες συνέπειες για τη λει-

τουργία της μηχανής, από τις οποίες σημαντικότερες είναι:

- Μεγάλες απώλειες λόγω εξαέρωσης.
- Κίνδυνος ατμόφραξης (vapour lock).

Με τον όρο **ατμόφραξη** καθορίζονται δύο φαινόμενα που, αν και είναι διαφορετικά μεταξύ τους, στην πράξη είναι γνωστά με το κοινό όνομα **μπούκωμα**. Τα φαινόμενα αυτά περιγράφονται ως εξής:

α) Η καθαυτό **ατμόφραξη** οφείλεται στη μεγάλη ποσότητα ατμών βενζίνης που συγκεντρώνεται στο δίκτυο του καυσίμου, κυρίως μεταξύ αποθήκης βενζίνης και αντλίας, τους οποίους η αντλία δεν μπορεί να μεταφέρει προς τον εξαεριωτήρα και συνεπώς η μηχανή θα σβήσει από κακή τροφοδότηση καυσίμου. Το φαινόμενο είναι ανάλογο προς το **ξέπιασμα** των υδραντλιών.

β) Συνηθέστερο φαινόμενο είναι η δυσκολία ή αδυναμία εκκίνησης της μηχανής ύστερα από μακρά και μάλιστα εντατική λειτουργία, που προκαλεί υψηλές θερμοκρασίες. Οι θερμοκρασίες αυτές αυξάνουν ακόμη περισσότερο την έκλυση ατμών βενζίνης, οπότε παράγεται τόσο πλούσιο μείγμα, ώστε η ανάφλεξη του να είναι αδύνατη.

### 5.4 Ποιότητα καύσης – Αριθμός οκτανίου

Η ποιότητα καύσης της βενζίνης καθορίζεται από την αντικροτική της ικανότητα, δηλαδή την αντοχή της βενζίνης σε συμπίεση. Είναι γνωστό ότι η θερμική απόδοση των βενζινομηχανών εξαρτάται απ' το βαθ-

μό συμπίεσης, όπως προκύπτει από τη γνωστή από τη θερμοδυναμική σχέση:

$$\eta_{\theta i} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

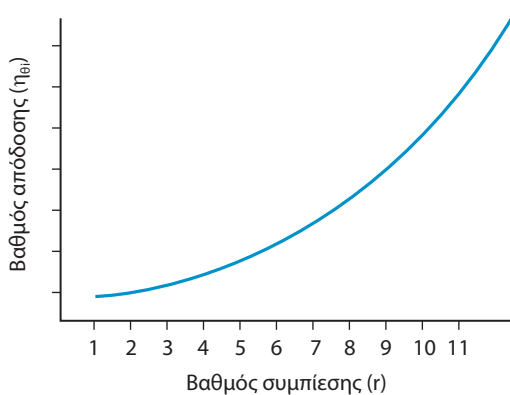
όπου:  $\eta_{\theta i}$  ο θεωρητικός ιδανικός θερμικός βαθμός απόδοσης,  $r$  ο βαθμός συμπίεσης ( $r = V_1/V_2$ ) και  $\gamma$  ο λόγος  $C_p/C_v$  (θεωρητική τιμή για τον αέρα 1,4)

Ο πίνακας 5.3 δίνει τις τιμές του βαθμού απόδοσης για τις διάφορες τιμές του βαθμού συμπίεσης  $r$ .

**Πίνακας 5.3**  
Σχέση συμπίεσης και απόδοσης για βενζινομηχανές

| Βαθμός συμπίεσης,<br>$r = V_1/V_2$ | Θεωρητικός ιδανικός<br>βαθμός απόδοσης $\eta_{\theta i}$ |
|------------------------------------|--|
| 6                                  | 0,51   |
| 7                                  | 0,54   |
| 8                                  | 0,56   |
| 10                                 | 0,60   |
| 12                                 | 0,63   |
| 14                                 | 0,65   |
| 18                                 | 0,68   |

Τα παραπάνω δεδομένα σε μια γραφική παράσταση δίνουν το διάγραμμα του σχήματος 5.2, από το οποίο φαίνεται ότι η βελτίωση του βαθμού απόδοσης είναι σημαντική μέχρι τιμή συμπίεσης 8, ενώ πέρα από αυτή το κέρδος σε απόδοση είναι μικρότερο. Παρόλα αυτά ο ανταγωνισμός των αυτοκινητοβιομηχανιών ανάγκασε τους κατασκευαστές μηχανών αυτοκινήτων να αυξήσουν το βαθμό συμπίεσης και πέρα από την τιμή 10 οπότε άρχισε να εμφανίζεται το φαινόμενο του **κτυπήματος** (knocking effect). Το μείγμα βενζίνης-αέρα στις πιέσεις που αναπτύσσο-



**Σχ. 5.2**

νται με τόσο υψηλή συμπίεση και στις θερμοκρασίες που τις ακολουθούν δεν αντέχει και υφίσταται προανάφλεξη ή εκρηκτική καύση με πολύ δυσάρεστες για τη μηχανή συνέπειες.

Τη σχέση μεταξύ βαθμού συμπίεσης, πίεσης στο τέλος της συμπίεσης και θερμοκρασίας στο τέλος της συμπίεσης δείχνει ο πίνακας 5.4.

**Πίνακας 5.4**  
Σχέσεις βαθμού συμπίεσης, τελικής πίεσης και θερμοκρασίας

| Βαθμός συμπίεσης (r) | Πίεση (bar)             | Θερμοκρασία (°C) |
|----------------------|-------------------------|------------------|
|                      | Στο τέλος της συμπίεσης |                  |
| 6                    | 10                      | 380              |
| 7                    | 13                      | 425              |
| 8                    | 16                      | 460              |
| 9                    | 20                      | 490              |
| 10                   | 22                      | 520              |
| 11                   | 25                      | 540              |
| 12                   | 28                      | 560              |
| 13                   | 30                      | 575              |
| 14                   | 32                      | 600              |

Στις συνθήκες λοιπόν πίεσης και θερμοκρασίας που αναπτύσσονται στο τέλος της συμπίεσης είναι δυνατόν να συμβούν:

1) **Προανάφλεξη**, δηλαδή έκρηξη του μείγματος πριν από το σπινθηρισμό (φαινόμενο **προσπινθηρικό**), δηλαδή πριν από το Α.Ν.Σ., πράγμα που με τη σημερινή ποιότητα των βενζινών είναι φαινόμενο μάλλον ασυνήθιστο και μόνο σε πολύ κακοσυντηρημένες βενζινομηχανές μπορεί να εμφανισθεί.

2) **Εκρηκτική καύση**, δηλαδή τοπικές εκρήξεις μετά τον σπινθηρισμό (φαινόμενο **μετασπινθηρικό**). Προέρχονται από τοπικές εστίες που δημιουργούνται σε διάφορα σημεία του άκαυστου μείγματος βενζίνης-αέρα. Τις εστίες αυτές δημιουργούν εναποθέσεις διαφόρων καταλοίπων στο εσωτερικό των κυλίνδρων, που μπορεί να πυρακτώνονται από τις ψηλές θερμοκρασίες, υποκαθιστώντας έτσι το σπινθηριστή (bougie) χωρίς να είναι δυνατός ο έλεγχός τους.

Είναι φανερό λοιπόν ότι το φαινόμενο του κτυπήματος θα είναι τόσο εντονότερο, όσο ο βαθμός συμπίεσης της μηχανής είναι μεγαλύτερος.

Συνέπειες του **κτυπήματος** είναι:

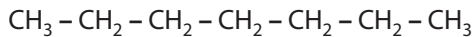
α) Απώλεια ισχύος από τα ωστικά κύματα που δημιουργούνται στον χώρο και που ενεργούν συχνά αντί-

θετα προς την εκτονωτική δράση του κύριου ωστικού κύματος που ενεργεί πάνω στο έμβολο.

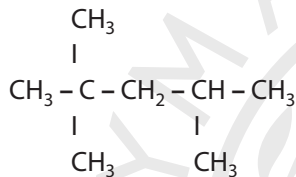
β) Καταπόνηση της μηχανής, που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φθάσει ως την πλήρη κατάρρευσή της.

Το **κτύπημα** στις βενζινομηχανές αντιμετωπίζεται εξασφαλίζοντας βενζίνη με κατάλληλη αντικροτική ικανότητα που μετρείται με την κλίμακα αριθμού οκτανίου. Συγκρίνεται δηλαδή η συμπεριφορά της βενζίνης ως προς την αντοχή της σε συμπίεση υπό ορισμένες συνθήκες, με την αντίστοιχη συμπεριφορά δυο προτύπων καυσίμων ή συνήθως, μείγματός τους, δηλαδή:

1) Του κανονικού επτανίου (n-επτάνιο):



2) Του ισο-οκτανίου:



Στην κλίμακα αυτή το n-επτάνιο βαθμολογείται με 0, λόγω της κακής του αντικροτικότητας, ενώ το ισο-οκτάνιο βαθμολογείται με 100, γιατί η αντοχή του σε συμπίεση είναι εξαιρετική. Η σύγκριση της βενζίνης με τα παραπάνω πρότυπα καύσιμα γίνεται σε μία πρότυπη μονοκύλινδρο βενζινομηχανή (CFR) που λειτουργεί με εντελώς καθορισμένες συνθήκες ως προς:

- 1) Τη θερμοκρασία του νερού ψύξης (100°C),
- 2) τη θερμοκρασία του εισαγόμενου αέρα, και
- 3) την προπορεία (avance) 13°.

Αυτή έχει εντελώς καθορισμένες διαστάσεις και ταχύτητα περιστροφής (600 rpm), ενώ ο βαθμός συμπίεσης μπορεί να μεταβάλλεται, ώσπου να επιτευχθεί έντονο κτύπημα, του οποίου την παρουσία δείχνει ειδική μαγνητοσυσταλτική μηχανή (knockmeter).

Στην παραπάνω πρότυπη μονοκύλινδρο μηχανή σε πρώτη φάση χρησιμοποιείται ως καύσιμο η βενζίνη που πρόκειται να μετρηθεί και καταγράφεται η ένδειξη του κτυπήματος. Κατόπιν η μηχανή τροφοδοτείται διαδοχικά με μείγματα ισοοκτανίου/n-επτάνιου σε γνωστές αναλογίες, ώσπου να βρεθεί η αναλογία εκείνη, με την οποία η μηχανή δίνει το κτύπημα που μετρήθηκε με την εξεταζόμενη βενζίνη.

Όστε **αριθμός οκτανίου** (octane number) βενζίνης είναι η κατά όγκο εκατοστιαία αναλογία ισο-οκτανίου σε μείγμα με n-επτάνιο που δείχνει την ίδια αντικροτικότητα με την υπό εξέταση βενζίνη σε ορισμένες συνθήκες δοκιμής. Η σύγκριση γίνεται σε πρότυπη μονοκύλινδρο βενζινομηχανή, όπου ο βαθμός συμπίεσής της μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη λειτουργία της. Ο βαθμός οκτανίου αναφέρεται συντομογραφικώς ως RON\* (Research Octane Number). Έτσι, αριθμός οκτανίου 90 (RON = 90) σημαίνει ότι η βενζίνη αυτή έχει την ίδια αντικροτικότητα (δηλ. την ίδια αντοχή σε συμπίεση) με εκείνη που θα είχε μείγμα αποτελούμενο κατά όγκο από 90% ισο-οκτάνιο και από 10% n-επτάνιο. Διευκρινίζεται ότι η βενζίνη αυτή μπορεί να μην έχει ως συστατικά καθόλου ισο-οκτάνιο ή n-επτάνιο, αλλά πληθώρα άλλων υδρογονανθράκων με αντίστοιχη προς αυτούς αντικροτικότητα.

#### 5.4.1 Επίδραση της ποιότητας του καυσίμου στο κτύπημα

Για τους συνηθισμένους βενζινοκινητήρες η απαιτούμενη αντικροτική ικανότητα (RON) της βενζίνης εξαρτάται κυρίως από τον βαθμό συμπίεσης, όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα 5.5.

**Πίνακας 5.5**  
**Σχέση βαθμού συμπίεσης (r)**  
**και αριθμού οκτανίου (RON)**

| r  | RON (ελάχιστος) |
|----|-----------------|
| 6  | 70              |
| 7  | 82              |
| 8  | 90              |
| 9  | 96              |
| 10 | 100             |

Διευκρινίζεται ότι η ελληνική βενζίνη, σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές διατίθεται σε δύο τύπους:

1) **Απλή** (premium αμόλυβδη) βενζίνη με ελάχιστο RON 95.

2) **Super** αμόλυβδη βενζίνη με ελάχιστο RON 100.

Οι προδιαγραφές της απλής premium αμόλυβδης βενζίνης αναφέρονται στον πίνακα 5.1.

Εκτός των δύο τύπων βενζίνης που αναφέρονται πιο πάνω, προσφάτως εμφανίστηκε και ενισχυμένη

\* RON = Research Octane Number: η ένδειξη R καθορίζει τις συνθήκες της δοκιμής.

αμόλυβδη βενζίνη με RON 97-98. Η βενζίνη αυτή δεν καλύπτεται από επίσημες προδιαγραφές· επί του παρόντος ισχύουν και γι' αυτήν οι προδιαγραφές απλής premium αμόλυβδης βενζίνης του πίνακα 5.1.

Αν ο αριθμός οκτανίου της βενζίνης είναι μικρότερος από τον κανονικό θα εμφανίζεται το κτύπημα με τις ολέθριες για τη μηχανή συνέπειες. Αντίθετα αριθμός οκτανίου μεγαλύτερος από τον κανονικό δεν προσφέρει κανένα όφελος.

Ο αριθμός οκτανίου στη βενζίνη εξαρτάται από:

1) Την **πρώτη ύλη**, δηλαδή τη δομή των υδρογονανθράκων που την αποτελούν.

Υδρογονάνθρακες με ευθεία αλυσίδα έχουν γενικά χαμηλή οκτανική απόδοση, ενώ υδρογονάνθρακες με διακλαδούμενη αλυσίδα ή αρωματικοί χαρακτηρίζονται από υψηλό αριθμό οκτανίου (πίν. 5.6). Η σύνθεση υδρογονανθράκων με υψηλό αριθμό οκτανίου επιτυγχάνεται με την αναμόρφωση της νάφθας.

Γενικά η κατάταξη των υδρογονανθράκων κατά φθίνουσα σειρά με βάση την αντικροτική ικανότητά τους είναι:

α) Υδρογονάνθρακες με **μεγάλη αντικροτικότητα**:

- Αρωματικοί
- Ισο-παραφίνες
- Ναφθενικοί

β) Υδρογονάνθρακες με **μικρή αντικροτικότητα**:

- Ολεφίνες
- Παραφίνες

Επειδή οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες και κυρίως το βενζόλιο ρυπαίνουν σοβαρά την ατμόσφαιρα

**Πίνακας 5.6**

**Αριθμός οκτανίου επιλεγμένων υδρογονανθράκων**

| Είδος υδρογονάνθρακα | Αριθμός οκτανίου (RON) |
|----------------------|------------------------|
| Μεθάνιο              | 120                    |
| Αιθάνιο              | 118                    |
| Προπάνιο             | 112                    |
| n-βουτάνιο           | 93                     |
| Ισο-οκτάνιο          | 100                    |
| n-εξάνιο             | 25                     |
| n-επτάνιο            | 0                      |
| Κυκλοεξάνιο          | 85                     |
| Τολουόλη             | 120                    |
| Αιθυλοβενζόλιο       | 107                    |
| Οκτυλένιο            | 60                     |
| n-πεντάνιο           | 62                     |
| Ισοπροπυλοβενζόλιο   | 113                    |

(έχει αποδειχθεί η καρκινογόνος δράση του βενζολίου) η παρουσία τους στη βενζίνη πρέπει να διατηρείται σε όσο το δυνατόν χαμηλά όρια. Για το βενζόλιο οι προδιαγραφές (πίν. 5.1) καθορίζουν ανώτατο επιτρεπτό όριο αυστηρά στο 1%. Την αντικροτική ικανότητα, δηλαδή τον αριθμό οκτανίου, βελτιώνουν άλλες ουσίες οξυγονούχες, όπως η MTBE (Methyl, Tertiary-Butyl-Ether) που προστίθενται σε αναλογία μέχρι 10%. Είναι η γνωστή «πράσινη» βενζίνη (οικολογική), που η χρήση της συνεχώς διευρύνεται για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των οικολογικών προβλημάτων που η χρήση της βενζίνης προκαλεί.

2) Τα **χημικά αντικροτικά πρόσθετα** (additives), δηλαδή ουσίες που προστίθενται σε μικρή αναλογία και αυξάνουν ως ένα σημείο με οικονομικό τρόπο την αντικροτική ικανότητα, δηλαδή τον αριθμό οκτανίου, της βενζίνης. Ως αντικροτικό, στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκε κυρίως ο τετρα-αιθυλικός μόλυβδος (TEL), με τύπο  $(C_2H_5)_4Pb$ . Η προσθήκη TEL μπορεί να αυξήσει τον αριθμό οκτανίου από 3 μέχρι 20 μονάδες.

Όμως ο μόλυβδος βρέθηκε ότι είναι τοξικός για τον άνθρωπο και σε συνάρτηση με τη χρήση καταλυτών σε καταλυτικούς μετατροπείς καυσαερίων για την απομάκρυνση CO, NOx και HC στις εκπομπές των κινητήρων οδήγησε στην ολική αφαίρεσή του από τις βενζίνες που διατίθενται στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης από τις αρχές του 2000 και σε όλες τις χώρες από τον Αύγουστο 2021.

Με βάση την απαγόρευση της χρήσης προϊόντων μολύβδου, τα εναλλακτικά οξυγονούχα αντικροτικά ανήκουν στις ομάδες των αλκοολών και των αιθέρων. Τα σημαντικότερα αντικροτικά πρόσθετα σήμερα είναι:

1) **Αλκοόλες**: μεθανόλη (MeOH), αιθανόλη (EtOH), ισοπροπανόλη (IPA), τ-Βουτανόλη (TBA).

2) **Αιθέρες**: Μεθυλο-τ-βουτυλαιθέρας (MTBE), τ-αμυλμεθυλαιθέρας (TAME), Αιθυλο-τ-βουτυλαιθέρας (ETBE).

Οι περισσότερες οξυγονούχες ενώσεις έχουν υψηλό αριθμό οκτανίου, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.7, και μπορούν σε μικρή ποσότητα να αυξήσουν τον αριθμό οκτανίου της βενζίνης κατά 3 με 5 μονάδες.

#### 5.4.2 Επίδραση της μηχανής στο κτύπημα

Πολλοί παράγοντες της μηχανής επιδρούν στην εμφάνιση και στην ένταση του κτυπήματος, που αν τους έχει υπόψη του ο χειριστής της μηχανής μπορεί να το αποφύγει ή να το περιορίσει.

Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να διαιρεθούν σε δυο κατηγορίες: **κατασκευαστικοί** και **λειτουργικοί**.

**Πίνακας 5.7**  
**Αριθμός οκτανίου**  
**οξυγονούχων πρόσθετων στη βενζίνη**

| Οξυγονούχα πρόσθετα στη βενζίνη | Αριθμός οκτανίου (RON) |
|---------------------------------|------------------------|
| MeOH                            | 112                    |
| EtOH                            | 112                    |
| IPA                             | 99                     |
| TBA                             | 117                    |
| MTBE                            | 110                    |
| TAME                            | 108                    |
| ETBE                            | 112                    |

### 1) Κατασκευαστικοί παράγοντες

Σπουδαιότεροι από τους παράγοντες της κατηγορίας αυτής είναι ο βαθμός συμπίεσης και ο θάλαμος καύσης. Αναλυτικότερα:

α) Η αύξηση του **βαθμού συμπίεσης** σε μια βενζινομηχανή προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του μίγματος αέρα-βενζίνης και συνεπώς επιταχύνει την εκρηκτική καύση, άρα και το φαινόμενο του κτυπήματος (πίν. 5.4). Αν λοιπόν η μηχανή δεν τροφοδοτείται με το κατάλληλο καύσιμο, δηλαδή με το καύσιμο που αντιστοιχεί στον βαθμό συμπίεσής της (πίν. 5.5) το κτύπημα και οι συνέπειες απ' αυτό θα είναι αναπόφευκτα. Περιορίζοντας τον βαθμό συμπίεσης, ελαττώνουμε και το βαθμό απόδοσης της μηχανής (πίν. 5.3). Η έλλειψη ή το υψηλό κόστος βενζινών με μεγάλη οκτανική απόδοση (RON μεγαλύτερο του 98) ανάγκασε τους κατασκευαστές των βενζινομηχανών, που προορίζονται για αυτοκίνητα, να περιορίσουν τον βαθμό συμπίεσης κάτω από το 10, όριο που σε προηγούμενες δεκαετίες είχε ξεπεραστεί με στόχο την καλύτερη απόδοση.

β) Το σχήμα και γενικά η σχεδίαση του **θαλάμου καύσης** επηρεάζουν αισθητά το κτύπημα κατά διάφορους τρόπους. Οι κύριοι παράγοντες αναλύονται παρακάτω.

α) Το σχήμα του θαλάμου καύσης σχεδιάζεται, ώστε να ελαττώνει τη διαδρομή του μετώπου της φλόγας περιορίζοντας έτσι την πιθανότητα εκρηκτικής καύσης.

β) Αν ο θάλαμος καύσης είναι σχεδιασμένος έτσι, ώστε να αυξάνει τον στροβιλισμό, θα αυξηθεί η ταχύτητα και συνεπώς έχουμε και πάλι περιορισμό της πιθανότητας εκρηκτικής καύσης.

γ) Το είδος, η μορφή και προπάντων η θέση του

σπινθηριστή (μπουζί) επιδρούν στο κτύπημα. Η θέση του σπινθηριστή πρέπει να είναι τέτοια που εξασφαλίζει τη μικρότερη διαδρομή για το μέτωπο της φλόγας.

### 2) Λειτουργικοί παράγοντες

Στην κατηγορία αυτή οι κυριότεροι παράγοντες είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα περιστροφής, η προπορεία και η αναλογία καυσίμου-αέρα. Αναλυτικότερα:

α) Επειδή η ταχύτητα ανάφλεξης του μίγματος μέσα στον κύλινδρο είναι ανάλογη με τη **θερμοκρασία** του, κάθε αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την πιθανότητα κτυπήματος από εκρηκτική καύση. Αντίθετα, σχετικά χαμηλότερες θερμοκρασίες περιορίζουν ένα τέτοιο ενδεχόμενο.

Υψηλές θερμοκρασίες, που επιτείνουν το **κτύπημα**, εμφανίζονται σε κυλίνδρους που στα τοιχώματά τους έχουν ανθρακούχα κατάλοιπα ή που το νερό ψύξης έχει σχετικά υψηλή θερμοκρασία.

Υψηλές θερμοκρασίες έχουμε ακόμα όταν η μηχανή αναγκάζεται να λειτουργήσει κάτω από μεγάλα φορτία. Παράδειγμα αποτελεί η κίνηση ενός φορτωμένου οχήματος σε ανηφορική διαδρομή, που προκαλεί καθώς γνωρίζουμε υπερθέρμανση της μηχανής, που συνοδεύεται από κτύπημα. Η μηχανή ανακουφίζεται στην περίπτωση αυτή μόνο με κατάλληλη ρύθμιση της σχέσης μετάδοσης ενέργειας από τη μηχανή στον άξονα, πράγμα που επιτυγχάνεται με το κιβώτιο ταχυτήτων. Χαμηλές θερμοκρασίες, που περιορίζουν την πιθανότητα κτυπήματος, μπορούν να επιτευχθούν ανάμεσα στ' άλλα με έγχυση νερού ή άλλων ψυκτικών μειγμάτων στον κύλινδρο. Ο τρόπος αυτός για την αντιμετώπιση του κτυπήματος έχει εφαρμοσθεί σε πειραματικούς κινητήρες με μείγματα νερού αλκοόλης 1:1, που προστίθενται στο καύσιμο σε αναλογία 1:4 περίπου (μείγμα : καύσιμο) και περιορίζει το κτύπημα σε βαθμό που να προκαλεί μια φαινομενική αύξηση της αντικροτικότητας κατά 25% περίπου. Δηλαδή βενζίνη με αριθμό οκτανίου 100, στην οποία προσθέτουμε μείγμα αλκοόλης-νερού σε ποσοστό 25%, συμπεριφέρεται όπως η βενζίνη με αριθμό οκτανίου 125.

β) **Ταχύτητα περιστροφής.** Όσο λιγότερες στροφές παίρνει η μηχανή τόσο μεγαλώνει ο χρόνος επαφής καυσίμου-αέρα, άρα αυξάνει η πιθανότητα να συμβεί εκρηκτική καύση. Μπορούμε, συνεπώς, να απομακρύνουμε το ενδεχόμενο εκρηκτικής καύσης, φροντίζοντας ώστε η μηχανή να παίρνει τόσο περισσότερες στροφές, όσο το φορτίο της επιτρέπει, πράγμα που και πάλι επιτυγχάνεται με τη μείωση της σχέσης μετάδοσης. Έτσι εξηγείται γιατί σε ανηφορική διαδρομή

δίνουμε περισσότερες στροφές στη μηχανή κατεβάζοντας την ταχύτητα (από 4η σε 3η ή 2α) για να μην χτυπάνε τα πειράκια, δηλαδή για να περιορίζεται το κτύπημα που η εκρηκτική καύση του μείγματος προκαλεί.

γ) Η **προπορεία** (avance), δηλαδή η ανάφλεξη του μείγματος βενζίνης-αέρα πριν από το ΑΝΣ αυξάνει την τελική πίεση μέσα στον κύλινδρο, άρα και τη θερμοκρασία του, πράγμα που μπορεί να προκαλέσει εκρηκτική καύση, δηλαδή **κτύπημα**. Η μείωση της προπορείας εξουδετερώνει τον κίνδυνο κτυπήματος, αλλά σε βάρος του βαθμού απόδοσης.

δ) Στις συνηθισμένες βενζινομηχανές και υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας η **αναλογία καυσίμου-αέρα** κυμαίνεται γύρω στο 14 (πίν. 5.2). Αν το μείγμα αυτό τείνει να παρουσιάσει εκρηκτική καύση, μπορούμε να διορθώσουμε την κατάσταση εμπλουτίζοντάς το σε καύσιμο, γιατί η επιπλέον βενζίνη κατά την εξάτμισή της απορροφά θερμότητα, πράγμα που προκαλεί πτώση της θερμοκρασίας και συνεπώς απομάκρυνση του κινδύνου εκρηκτικής καύσης. Αυτό επιδιώκεται με την **υπερτροφοδότηση** των βενζινομηχανών (supercharge), όπου η αναλογία καυσίμου-αέρα φθάνει το 10 (πλούσιο μείγμα). Έτσι παίρνουμε από τη μηχανή μεγαλύτερη ισχύ χωρίς κίνδυνο εκρηκτικής καύσης, και πάλι όμως σε βάρος του βαθμού απόδοσης.

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι κάθε τι που τείνει να αυξήσει τη θερμοκρασία του μείγματος ή τον χρόνο κατά τον οποίο το μείγμα αυτό διατηρεί σε επαφή τα συστατικά του, οδηγεί σε εκρηκτική καύση, δηλαδή αυξάνει την πιθανότητα **κτυπήματος**.

## 5.5 Βαθμός καθαρότητας

Ο βαθμός καθαρότητας των βενζινών επηρεάζει σημαντικά την απόδοση και γενικά την κατάσταση των μηχανών τις οποίες τροφοδοτούν.

Τα σημαντικότερα από τα ανεπιθύμητα συστατικά που προσδιορίζουν τον βαθμό καθαρότητας των βενζινών είναι **θειούχες ενώσεις** και κομμωδεις ουσίες.

Η περιεκτικότητα αυτών δεν πρέπει να υπερβαίνει τα ανώτατα όρια που καθορίζουν οι προδιαγραφές.

### 5.5.1 Θειούχες ενώσεις

Η βενζίνη ενδέχεται να περιέχει θειούχες ενώσεις, όπως μερκαπτάνες, σουλφίδια, δισουλφίδια και θεοφαινια. Η περιεκτικότητα της βενζίνης σε αυτές τις θειούχες ενώσεις πρέπει να είναι τόση, ώστε το συνολικό ποσοστό του θείου να μην υπερβαίνει το όριο των προδιαγραφών. Το όριο αυτό ποικίλλει στις διάφορες χώρες και συχνά μεταβάλλεται, γιατί επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως:

1) Τη βλαβερή επίδραση που έχει το θείο για τη μηχανή, αφού μετά την καύση μετατρέπεται σε  $SO_2$  και τελικά σε θειικό οξύ, που αποτελεί ισχυρότατο διαβρωτικό παράγοντα για τη μηχανή.

2) Το κόστος της αποθείωσης, δηλαδή της αφαίρεσης του θείου από τη βενζίνη, που είναι πολύ υψηλό.

3) Την ανάγκη περιορισμού της ρύπανσης της ατμόσφαιρας από το  $SO_2$  που παράγεται κατά την καύση.

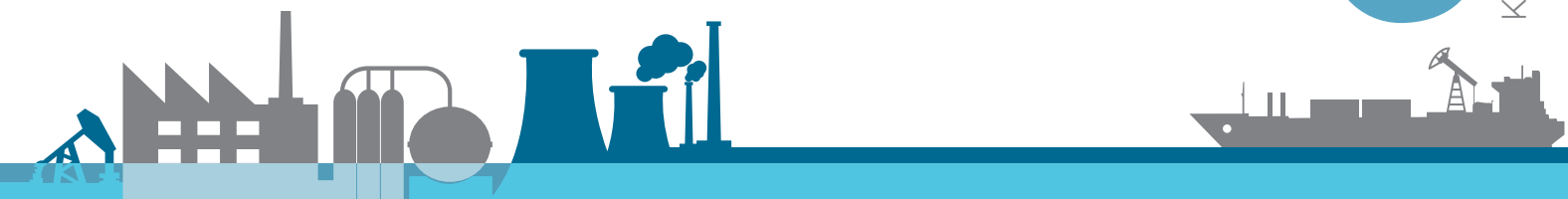
Η περιεκτικότητα σε θείο για τις βενζίνες που κυκλοφορούν στην Ελλάδα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ισχύουν σήμερα (πίν. 5.1), δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,001% ή 10 mg/kg.

Ο προσδιορισμός του θείου περιγράφεται στο κεφάλαιο 12.

### 5.5.2 Κομμωδεις ουσίες (gum)

Οι κομμωδεις ουσίες δημιουργούνται κατά την παραμονή της βενζίνης στις δεξαμενές ή σε δοχεία και οφείλονται στην οξειδωση των υδρογονανθράκων που περιέχει, ιδίως των ακορέστων. Η παρουσία τους δεν είναι εύκολα αντιληπτή, γιατί οι ουσίες αυτές είναι διαλυτές στη βενζίνη και εμφανίζονται κατά την εξάτμισή της σαν υπολείμματα (υπόλειμμα σαν γόμα/gum). Τα συστατικά αυτά είναι επικίνδυνα, γιατί μπορεί να προκαλέσουν αποφράξεις των σωληνίσκων τροφοδοσίας της βενζίνης του εξαερωτήρα και γενικά αποθέσεις στο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου της μηχανής. Η περιεκτικότητά τους σύμφωνα με τις προδιαγραφές βενζίνης (πίν. 5.1) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 5 mg/100 cm<sup>3</sup> βενζίνης.

Ο προσδιορισμός τους ακολουθεί τη μέθοδο ASTM D-873-12.



## 6.1 Γενικά

Το καύσιμο αυτό οφείλει το όνομά του στο γεγονός ότι αρχικά ήταν το μόνο καύσιμο που χρησιμοποιούνταν στις μηχανές diesel λόγω των ιδιοτήτων του και κυρίως:

1) Του χαμηλού ιξώδους, που επέτρεπε καλύτερο διασκορπισμό.

2) Του υψηλού βαθμού καθαρότητας, που εξασφάλιζε καύση χωρίς επιβλαβή κατάλοιπα.

Σήμερα χρησιμοποιείται μόνο για ταχύστροφες μηχανές μικρής σχετικά ισχύος, φερόμενο στο εμπόριο με το όνομα Gasoil ή diesel oil. Το όνομα Gasoil, οφείλεται στο γεγονός ότι πρόκειται για **έλαιο** (oil) που με εξαερίωση παράγει αέριο (gas).

Κύριο χαρακτηριστικό του, με το οποίο διακρίνεται από τις άλλες κατηγορίες καυσίμων που χρησιμοποιούνται στις μηχανές diesel, είναι ότι αποτελεί **απόσταγμα** του φυσικού πετρελαίου, ανήκει δηλαδή στα ευγενή προϊόντα του. Αυτό έχει ως συνέπεια να κατατάσσεται στα καλύτερα και ακριβότερα καύσιμα MEK. Χρησιμοποιείται λοιπόν ως καύσιμο μηχανών

diesel, όταν υπάρχουν ειδικοί λόγοι, που αποκλείουν τη χρήση των βαρύτερων καυσίμων (που παράγονται με βάση τα υπολειμματικά καύσιμα, π.χ. μαζούτ), όπως:

1) Υψηλή ταχύτητα περιστροφής.

2) Μικρές ιπποδυνάμεις.

3) Ευχέρεια προσαρμογής καύσης στις απαιτήσεις φορτίου της μηχανής, όπως συμβαίνει κατά τους χειρισμούς απόπλου ή κατάπλου ενός πλοίου και γενικά μιας δύσκολης ή ειδικής πορείας, όπου απαιτείται γρήγορη αυξομείωση της ισχύος της μηχανής, στην οποία μόνο το πετρέλαιο diesel μπορεί με ευχέρεια να ανταποκριθεί.

Το πετρέλαιο diesel αποτελεί το τελευταίο (βαρύτερο) κλάσμα του φυσικού πετρελαίου, και έχει όρια θερμοκρασιών ζέσης 200°–360°C. Συνήθως δεν χρειάζεται άλλη επεξεργασία μετά την απόσταξη, και χρησιμοποιείται όπως λαμβάνεται από τον πύργο απόσταξης. Η εξέλιξη των πετρελαιομηχανών για κίνηση επιβάλλει για το πετρέλαιο diesel ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες, που εξασφαλίζονται με τις αντίστοιχες προδιαγραφές (πίν. 6.1). Οι σπουδαιότερες από τις ιδιότητες

Πίνακας 6.1

Προδιαγραφές πετρελαίου Diesel (πετρέλαιο κίνησης)

| Κύρια χαρακτηριστικά   | Όρια τιμών                      | Μέθοδος ελέγχου                                 |
|--|---------------------------------|---|
| 1. Σημείο ανάφλεξης, °C  | 55 ελαχ.                        | ISO 4264:2018                                   |
| 2. Ανθρακούχο υπόλειμμα (επί 10% υπολείμματος), % κ.β.   | 0,30 μεγ.                       | ISO 10370:2014                                  |
| 3. Τέφρα, % κ.β.   | 0,01 μεγ.                       | ISO 6245:2001                                   |
| 4. Νερό, mg/kg   | 200 μεγ.                        | ISO 12397:1996                                  |
| 5. Διάβρωση ελάσματος χαλκού (3 ώρες, σε 50°C)   | 1 μεγ.                          | ISO 2160:1998                                   |
| 6. Θείο, %   | 0,2 μεγ.                        | ISO 14596:2007                                  |
| 7. Αριθμός κετανίου  | 46 ελαχ.                        | ISO 4263:2015                                   |
| 8. Πυκνότητα σε 15°C, kg/m <sup>3</sup>  | 820–845                         | ISO 3675:1998                                   |
| 9. Ιξώδες, σε 40°C, cSt  | 2–4,5                           | ISO 3104:2020                                   |
| 10. Απόσταξη<br>– απόσταγμα στους 250°C, % κ.ο.<br>– απόσταγμα στους 350°C, % κ.ο.<br>– συμπύκνωμα 95%, °C | 65 μεγ.<br>85 ελαχ.<br>360 μεγ. | ISO 3405:1998<br>ISO 3405:1998<br>ISO 3405:1998 |
| 11. Θερμοκρασία απόφραξης ψυχρού φίλτρου (CFPP), °C  | +5 (θερινό),<br>-5 (χειμερινό)  | EN 116  |



αυτές περιγράφονται παρακάτω και σχετίζονται με τα κύρια λειτουργικά γνωρίσματα των πετρελαιομηχανών: την εκτόξευση, την ανάφλεξη και την καύση.

Οι προδιαγραφές του πίνακα 6.1 αφορούν στο «πετρέλαιο κίνησης», δηλαδή στο καύσιμο που προορίζεται για τις ταχύστροφες πετρελαιομηχανές των αυτοκινήτων, και καλύπτονται τόσο από την ελληνική νομοθεσία όσο και από κανονισμούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι προδιαγραφές αυτές αποβλέπουν τόσο στην ικανοποιητική λειτουργία των πετρελαιομηχανών για τις οποίες το καύσιμο αυτό προορίζεται, όσο και στην προστασία του περιβάλλοντος, θέτοντας αυστηρά όρια σε ρυπογόνα συστατικά, όπως το θείο, για το οποίο η ανώτατη περιεκτικότητα καθορίζεται σε 0,20%, με προοπτική να περιορισθεί στο μέλλον ακόμα περισσότερο.

Ευνόητο είναι ότι οι απαιτήσεις και συνεπώς οι προδιαγραφές για άλλες εφαρμογές, όπως οι καυστήρες θέρμανσης, είναι πιο ελαστικές και καθορίζονται από ξεχωριστές προδιαγραφές.

Στον πίνακα 6.2 παρέχονται ενδεικτικά οι προδιαγραφές πετρελαίου diesel που προορίζεται για καυστήρες κεντρικής θέρμανσης – πετρέλαιο θέρμανσης.

Για το αποσταγματικό καύσιμο των ναυτικών πετρελαιομηχανών που αντιστοιχεί στο πετρέλαιο Diesel οι ιδιότητες, οι προδιαγραφές και οι διεργασίες πάνω στο πλοίο αναφέρονται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 8.

## 6.2 Ποιότητα καύσης - Αριθμός κετανίου

Η ποιότητα καύσης του πετρελαίου Diesel καθορίζεται από την ταχύτητα με την οποία αναφλέγεται μέσα στον κύλινδρο της μηχανής μετά την εκτόξευσή του από τον καυστήρα. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ εκτόξευσης και έναυσης (ανάφλεξης) πρέπει να είναι κατά το δυνατό μικρότερος. Επιβράδυνση της έναυσης θα έχει ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση στον θάλαμο καύσης υπερβολικής ποσότητας πετρελαίου Diesel, που η απότομη ανάφλεξή του θα δημιουργήσει απότομες αυξήσεις της πίεσης. Οι αυξήσεις αυτές γίνονται αντιληπτές σαν **κτύπημα** (knocking), δηλαδή κραδασμοί και δονήσεις που επιδρούν καταστρεπτικά στη μηχανή και μειώνουν την απόδοσή της. Ο χρόνος μεταξύ εκτόξευσης και ανάφλεξης, που είναι γνωστός σαν **καθυστέρηση ανάφλεξης** (delay period) επηρεάζει την εξέλιξη όλου του φαινομένου και εξαρτάται:

1) Από την ποιότητα του καυσίμου (αριθμός κετανίου), δηλαδή από το είδος και την αναλογία των υδρογονανθράκων που περιέχει.

2) Από τις συνθήκες που δημιουργούνται μέσα στον κύλινδρο κατά τη στιγμή της έγχυσης.

Είναι γνωστό ότι στην πετρελαιομηχανή η ανάφλεξη του καυσίμου γίνεται χωρίς σπινθηριστή, έχουμε δηλαδή **αυτανάφλεξη**, που για να συμβεί πρέπει να εξασφαλίσουμε κατάλληλες συνθήκες πίε-

**Πίνακας 6.2**  
**Προδιαγραφές πετρελαίου Diesel για θέρμανση**

| Κύρια χαρακτηριστικά  | Όρια τιμών                   | Μέθοδος ελέγχου                |
|---|------------------------------|--------------------------------|
| 1. Σημείο ανάφλεξης, °C   | 55 ελαχ.                     | ISO 4264:2018                  |
| 2. Ανθρακούχο υπόλειμμα (επί 10% υπολείμματος), % κ.β.                  | 0,30 μεγ.                    | ISO10370:2014                  |
| 3. Τέφρα, % κ.β.  | 0,01 μεγ.                    | ISO 6245:2001                  |
| 4. Νερό, mg/kg  | 200 μεγ.                     | ISO 12397:1996                 |
| 5. Διάβρωση ελάσματος χαλκού (3 ώρες, σε 50°C)                          | 3 μεγ.                       | ISO 2160:1998                  |
| 6. Θείο, %  | 0,2 μεγ.                     | ISO 14596:2007                 |
| 7. Αριθμός κετανίου   | 40 ελαχ.                     | ISO 4263:2015                  |
| 8. Πυκνότητα σε 15°C, kg/m <sup>3</sup>                                 | 830-855                      | ISO 3675:1998                  |
| 9. Ιξώδες, σε 40°C, cSt   | 6,0 μεγ.                     | ISO 3104:2020                  |
| 10. Απόσταξη<br>– απόσταγμα στους 350°C, % κ.ο.<br>– συμπύκνωμα 95%, °C | 85 ελαχ.<br>360 μεγ.         | ISO 3405:1998<br>ISO 3405:1998 |
| 11. Θερμοκρασία απόφραξης ψυχρού φίλτρου (CFPP), °C                     | -5                           | EN 116                         |
| 12. Σημείο ροής, °C   | -9 (χειμερινό)<br>0 (θερινό) | ASTM D97                       |

σης και θερμοκρασίας. Πράγματι ο βαθμός συμπίεσης  $r$  σε μια πετρελαιομηχανή κυμαίνεται από 14 έως 20, πράγμα που ανεβάζει τη θερμοκρασία του αέρα στο τέλος της συμπίεσης σε 450-500°C, αρκετή ώστε το καύσιμο, που ψεκάζεται λίγες μοίρες πριν από το ΑΝΣ, να υποστεί αυτανάφλεξη. Η αυτανάφλεξη αυτή που προκαλεί την καύση δεν είναι ακαριαία, γιατί το καύσιμο στη μηχανή diesel βρίσκεται υπό μορφή λεπτών σταγονιδίων, δηλαδή σε υγρή κατάσταση και πρέπει πριν την ανάφλεξη να προηγηθούν άλλες διεργασίες, όπως:

- 1) Πλήρης ανάμειξη των σταγονιδίων με τον αέρα.
- 2) Εξαερίωση των σταγονιδίων.
- 3) Ανάμειξη των ατμών του καυσίμου με τον αέρα.
- 4) Προφλογική οξειδωση του καυσίμου.
- 5) Τοπική ανάφλεξη,

μετά από τις οποίες ακολουθεί η καύση του όλου μείγματος με τη διάδοση του κύματος καύσης.

Ακόμα και στα αέρια καύσιμα η ανάφλεξη δεν είναι ακαριαία, είναι όμως πολύ ταχύτερη από ό,τι στο πετρέλαιο diesel.

Με τις ίδιες λειτουργικές και μηχανικές συνθήκες, η εξέλιξη του φαινομένου της καύσης, εξαρτάται πια από το καύσιμο και μάλιστα από την ιδιότητά του που χαρακτηρίζεται σαν **ποιότητα καύσης**: αυτή μετριέται με τον αριθμό κετανίου, που εξετάζεται στο κεφάλαιο αυτό.

Για την κατανόηση του φαινομένου εξετάζονται συνοπτικά τα κύρια στάδια της καύσης στις μηχανές diesel.

### Στάδιο 1. Καθυστερήση ανάφλεξης (delay period)

Είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από την έγχυση του καυσίμου ως την ανάφλεξη του και συνήθως δεν

υπερβαίνει τα 1,5-1,8 msec. Έχει καθοριστική σημασία για την εξέλιξη των επόμενων σταδίων καύσης, γιατί, αν ο χρόνος αυτός παραταθεί πέρα από τα παραπάνω όρια, η ποσότητα του άκαυστου καυσίμου που θα συγκεντρωθεί στον θάλαμο καύσης είναι αρκετή, ώστε η επόμενη φάση να πάρει μορφή έκρηξης, που εκδηλώνεται σαν κτύπημα. Το στάδιο αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία και για την ευχέρεια εκκίνησης της μηχανής.

### Στάδιο 2. Ταχεία ή ανεξέλεγκτη καύση (uncontrolled burning)

Αρχίζει από τη στιγμή της ανάφλεξης ως τη στιγμή που το πλεόνασμα του καυσίμου, που έχει συγκεντρωθεί στον θάλαμο καύσης κατά το προηγούμενο στάδιο, καίγεται, ώστε η καύση, που ακολουθεί στο στάδιο 3, να είναι ομαλή. Σ' αυτό το στάδιο η καύση είναι τόσο πιο γρήγορη και απότομη, όσο περισσότερο καθυστερεί η ανάφλεξη, όπως είπαμε παραπάνω. Οι πιέσεις αυξάνονται τόσο απότομα, ώστε μπορούν να οδηγήσουν σε εκρηκτική καύση, που γίνεται αντιληπτή σαν γδούπος ή κραδασμός της μηχανής (**κτύπημα**).

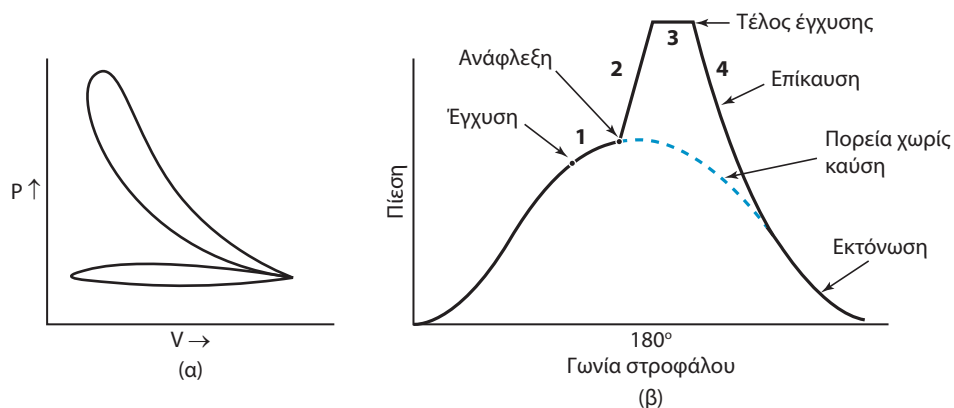
### Στάδιο 3. Ελεγχόμενη καύση

Σ' αυτό το στάδιο το καύσιμο που ψεκάζει ο καυστήρας καίγεται ομαλά, αμέσως μετά την είσοδό του στον θάλαμο καύσης, όπου συναντά την υψηλή θερμοκρασία από το καύσιμο που καίγεται ήδη. Η πίεση στο στάδιο αυτό παραμένει σχεδόν σταθερή.

### Στάδιο 4. Επίκαυση (afterburning)

Αντιστοιχεί στην καύση που συνεχίζεται και μετά τη διακοπή της έγχυσης, οπότε εξακολουθούν να καίγονται τα βαρύτερα κλάσματα του πετρελαίου diesel που, ως λιγότερο πτητικά, απαιτούν περισσότερο χρόνο για την εξαερίωσή τους αλλά και για την καύση τους.

Τα παραπάνω στάδια καύσης φαίνονται στο δι-



Σχ. 6.1

Διάγραμμα πορείας καύσης σε μηχανή Diesel

άγραμμα του σχήματος 6.1, στο οποίο η πορεία της καύσης καταγράφεται σε συνάρτηση της πίεσης και της γωνίας του στροφάλου.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η **ποιότητα καύσης** του πετρελαίου diesel σχετίζεται άμεσα με την **ταχύτητα ανάφλεξης**, που θα περιορίσει στα επιθυμητά όρια τη διάρκεια του σταδίου 1 (καθυστέρηση ανάφλεξης) και θα εξουδετερώσει τον κίνδυνο εκρηκτικής καύσης.

Μέτρο της ποιότητας καύσης του πετρελαίου diesel αποτελεί ο αριθμός κετανίου, για τον οποίο χρησιμοποιείται μια αυθαίρετη κλίμακα, σχετική με την κλίμακα του αριθμού οκτανίου, με την οποία βαθμολογείται η αντικροτικότητα της βενζίνης.

Στην κλίμακα του αριθμού κετανίου για τις ακραίες τιμές του 0 και του 100 χρησιμοποιούνται δυο γνωστοί υδρογονάνθρακες:

1) Το **κανονικό δεκαεξάνιο** (n-δεκαεξάνιο)  $C_{16}H_{34}$ , που λέγεται για χάρη συντομίας **κετάνιο**. Είναι ένας παραφινικός υδρογονάνθρακας (και τα 16 άτομα άνθρακα στη σειρά) που δεν παρουσιάζει σχεδόν καθόλου επιβράδυνση ανάφλεξης και στην παραπάνω κλίμακα βαθμολογείται με 100.

2) Η **α-μεθυλοναφθαλίνη** ( $C_{11}H_{10}$ ) που έχει πολύ μεγάλη επιβράδυνση ανάφλεξης και στην κλίμακα αριθμού κετανίου βαθμολογείται με 0.

Μείγματα των δυο παραπάνω υδρογονανθράκων σχηματίζουν την κλίμακα αριθμού κετανίου από 0 ως 100 (πίν. 6.3). Η σύγκριση του υπό μέτρηση πετρελαίου diesel με μείγμα κετανίου/α-μεθυλοναφθαλίνης γνωστής αναλογίας, γίνεται σε πρότυπη μονοκύλινδρη πετρελαιομηχανή, στην οποία συγκρίνεται η ένταση του

κτυπήματος του κινητήρα.

Ονομάζεται **αριθμός κετανίου** (cetane number – CN) η % περιεκτικότητα n-δεκαεξανίου σε μείγμα με α-μεθυλοναφθαλίνη, που έχει την ίδια ποιότητα καύσης, δηλαδή την ίδια καθυστέρηση ανάφλεξης, με το εξεταζόμενο δείγμα όταν η σύγκριση γίνεται σε πρότυπη πετρελαιομηχανή με βάση τη συχνότητα και την ένταση των κτυπημάτων που η μηχανή αυτή καταγράφει.



### Παράδειγμα

Πετρέλαιο Diesel με αριθμό κετανίου 35 (CN=35) σημαίνει ότι το πετρέλαιο Diesel αυτό έχει την ίδια ποιότητα καύσης, δηλαδή την ίδια καθυστέρηση ανάφλεξης, με μείγμα υδρογονανθράκων που περιέχει 35% n-δεκαεξάνιο (κετάνιο) και 65% α-μεθυλοναφθαλίνη. Βεβαίως, αντί για τους παραπάνω συγκεκριμένους υδρογονάνθρακες, τόσο το υπό εξέταση πετρέλαιο Diesel όσο και το μείγμα σύγκρισης μπορεί να περιέχει άλλους ισοδύναμους ως προς την ποιότητα καύσης υδρογονάνθρακες.

Η τιμή του αριθμού κετανίου, άρα και η ποιότητα καύσης ενός πετρελαίου diesel, εξαρτάται βασικά από το είδος των υδρογονανθράκων που το αποτελούν. Υδρογονάνθρακες παραφινικοί με ευθεία αλυσίδα, που σαν συστατικά βενζινών είναι ανεπιθύμητοι, γιατί μειώνουν τον αριθμό οκτανίου, εδώ ευνοούν την αύξηση του αριθμού κετανίου. Αυτό συμβαίνει γιατί αναφλέγονται εύκολα, ενώ αντίθετα οι υδρογονάνθρακες με διακλαδισμένη αλυσίδα ή με δακτύλιο στο μόριό τους (ναφθениκοί, αρωματικοί κ.λπ.) έχουν μικρό αριθμό κετανίου, γιατί η ανάφλεξή τους καθυστερεί. Μερικές αντιπροσωπευτικές τιμές για τον αριθμό κετανίου ορισμένων υδρογονανθράκων δίνει ο πίνακας 6.4.

Ο αριθμός κετανίου μπορεί να αυξηθεί επίσης με τη χρήση χημικών προσθέτων (additives) που προστίθενται στο πετρέλαιο σε μικρή αναλογία (γύρω στο 1%), όπως είναι το νιτρώδες αμύλιο, νιτρικό αιθύλιο, νιτρικό ισοπροπύλιο κ.λπ. Οι ενώσεις αυτές επιταχύνουν την ανάφλεξη αυξάνοντας έτσι τον αριθμό κετανίου, δεν έχουν όμως επικρατήσει μέχρι τώρα για τους εξής κυρίως λόγους:

1) Απαιτούν άσκοπη επιβάρυνση του κόστους του πετρελαίου, αφού το παραγόμενο από τα διυλιστήρια πετρέλαιο diesel, μπορεί ως τώρα άνετα να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της αγοράς ως προς τον αριθμό κετανίου.

**Πίνακας 6.3**  
**Κλίμακα αριθμού κετανίου**

| Αριθμός<br>κετανίου (CN) | Περιεκτικότητα %          |                   |
|--------------------------|---------------------------|-------------------|
|                          | n-δεκαεξάνιο<br>(κετάνιο) | α-μεθυλοναφθαλίνη |
| 100                      | 100                       | 0                 |
| 90                       | 90                        | 10                |
| 80                       | 80                        | 20                |
| 70                       | 70                        | 30                |
| 60                       | 60                        | 40                |
| 50                       | 50                        | 50                |
| 40                       | 40                        | 60                |
| 30                       | 30                        | 70                |
| 20                       | 20                        | 80                |
| 10                       | 10                        | 90                |
| 0                        | 0                         | 100               |

**Πίνακας 6.4**  
**Αριθμός κετανίου υδρογονανθράκων**

| Υδρογονάνθρακας   | Κατηγορία   | Αριθμός κετανίου (CN) |
|-------------------|-------------|-----------------------|
| n-οκτάνιο         | Παραφινικός | 65                    |
| n-δεκαεξάνιο      | Παραφινικός | 100                   |
| οκτένιο           | Ολεφινικός  | 40                    |
| δεκαεξένιο        | Ολεφινικός  | 84                    |
| δεκαλίνη          | Ναφθενικός  | 42                    |
| αμυλοβενζόλιο     | Αρωματικός  | 8                     |
| εξυλιοβενζόλιο    | Αρωματικός  | 28                    |
| α-μεθυλοναφθαλίνη | Αρωματικός  | 0                     |

2) Τα πρόσθετα αυτά είναι ενώσεις με μεγάλη τοξικότητα και εκρηκτικότητα και απαιτούν αυστηρά μέτρα ασφάλειας κατά τη διακίνησή τους.

Θετική και αποτελεσματική είναι η χρησιμοποίησή τους, για την επίτευξη εύκολης εκκίνησης των πετρελαιομηχανών σε χαμηλές θερμοκρασίες, αφού επιταχύνουν την ανάφλεξη, αν και για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται με συνεισπονή άλλα εύφλεκτα και πτητικά υγρά, π.χ. αιθέρας, αλδεΐδες, αλκοόλες κλπ.

### 6.3 Μέτρηση του αριθμού κετανίου

Η μέτρηση του αριθμού κετανίου του πετρελαίου μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους που κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες στους άμεσους ή μηχανικούς τρόπους, και στους έμμεσους ή εργαστηριακούς.

#### 6.3.1 Άμεσοι ή μηχανικοί τρόποι μέτρησης του αριθμού κετανίου

Σ' αυτήν την ομάδα κατατάσσονται οι διάφοροι τρόποι μέτρησης που βασίζονται σε πρότυπη πετρελαιομηχανή, στην οποία συγκρίνεται το υπό δοκιμή πετρέλαιο diesel με άλλο πρότυπο καύσιμο, του οποίου ο αριθμός κετανίου είναι γνωστός. Το πρότυπο καύσιμο ή είναι μείγμα γνωστής αναλογίας n-δεκαεξανίου (κετανίου) με α-μεθυλοναφθαλίνη ή άλλο καύσιμο ισοδύναμο ως προς την ποιότητα καύσης με μείγμα από τους παραπάνω δυο υδρογονάνθρακες. Υπάρχει σειρά από τέτοια μείγματα που αντιστοιχούν σε όλες τις πιθανές τιμές του αριθμού κετανίου (από 20 ως 60) που συγκρίνονται διαδοχικά με το άγνωστης ποιότητας καύσης πετρέλαιο diesel, ώσπου να βρεθεί εκείνο, του οποίου η ποιότητα καύσης συμπίπτει απόλυτα με το άγνωστο καύσιμο. Ανάλογα με το χαρακτηριστικό στοιχείο ως προς το οποίο γίνεται η σύγκριση διακρίνουμε τις εξής επί μέρους μεθόδους:

#### 1) Μέθοδος καθυστέρησης ανάφλεξης

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε μηχανή Diesel που λειτουργεί με σταθερό φορτίο και σταθερή ταχύτητα. Με ηλεκτρονικό μετρητή μετριέται η πραγματική καθυστέρηση ανάφλεξης, δηλαδή ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή που ανεβαίνει η βελόνα του εκνεφωτή ως τη στιγμή έναρξης της ανάφλεξης. Κάτω από τις ίδιες συνθήκες και στην ίδια μηχανή αναζητείται από τη σειρά προτύπων καυσίμων, δηλαδή με γνωστό αριθμό κετανίου, εκείνο το καύσιμο που έχει την ίδια ακριβώς καθυστέρηση ανάφλεξης με το μετρούμενο δείγμα. Ο αριθμός κετανίου του πρότυπου αυτού καυσίμου είναι ο ζητούμενος αριθμός κετανίου του μετρούμενου δείγματος.

#### 2) Μέθοδος ASTM D613

Για τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται μηχανή diesel στην οποία ο βαθμός συμπίεσης μπορεί να μεταβάλλεται, ώστε η ανάφλεξη να γίνεται πάντοτε στο ANΣ και ακριβώς 13° μετά την έγχυση. Η έγχυση δηλαδή γίνεται πάντοτε 13° πριν το ANΣ και η συμπίεση ρυθμίζεται έτσι, ώστε η ανάφλεξη να γίνεται ακριβώς μετά 13°, δηλαδή τη στιγμή που το έμβολο βρίσκεται στο ANΣ. Είναι ευνόητο ότι κάθε καύσιμο απαιτεί διαφορετική συμπίεση για να εξασφαλισθεί η ανάφλεξη στη διαδρομή από 13° προς 0° (0° = ANΣ). Έτσι θα χρειασθεί τόσο λιγότερη συμπίεση, όσο πιο εύκολα αναφλέγεται το καύσιμο, δηλαδή όσο μεγαλύτερο αριθμό κετανίου έχει. Αντίθετα, καύσιμα με μικρό αριθμό κετανίου, που αναφλέγονται δυσκολότερα, απαιτούν μεγαλύτερη συμπίεση για να εξασφαλισθεί ανάφλεξη ακριβώς στα όρια διαδρομής στροφάλου από 13° προς 0°. Αναζητείται λοιπόν το πρότυπο καύσιμο, που απαιτεί την ίδια συμπίεση για καθυστέρηση ανάφλεξης 13°, όση και το μετρούμενο δείγμα. Ο αριθμός κετανίου του πρότυπου αυτού καυσίμου είναι και ο αριθμός κετανίου του άγνωστου δείγματος.

#### 3) Πρότυπη μηχανή CFR (F<sub>5</sub>)

Η μηχανή αυτή βασίζεται στην ίδια αρχή που βασίζονται και οι μηχανές CFR (Cooperative Fuel Research) για τη μέτρηση του αριθμού οκτανίου. Με ειδική ηλεκτρονική συσκευή που διαθέτουν (knockmeter) συγκρίνονται τα κτυπήματα που παρουσιάζει η μηχανή όταν λειτουργεί με το άγνωστο καύσιμο, με τα κτυπήματα που με τις ίδιες συνθήκες καταγράφονται, όταν η μηχανή λειτουργεί με καύσιμο γνωστού αριθμού κετανίου.

### 6.3.2 Έμμεσοι ή εργαστηριακοί τρόποι μέτρησης του αριθμού κετανίου

Με μικρότερη ακρίβεια ο αριθμός κετανίου του πετρελαίου μπορεί να μετρηθεί με εργαστηριακές μεθόδους, που είναι πολύ απλούστερες από τις προηγούμενες. Η μέτρηση αυτή είναι έμμεση, δηλαδή βασίζεται σε άλλες ιδιότητες του πετρελαίου, που εξαρτώνται από τη δομή των υδρογονανθράκων που το αποτελούν και που, ως γνωστό, βρίσκεται σε άμεση σχέση με την ποιότητα καύσης, δηλαδή τον αριθμό κετανίου. Οι ιδιότητες αυτές είναι:

1) **Η πυκνότητα σε μονάδες API μετρούμενη στους 60°F.**

$$API = \frac{141,5}{\rho} - 131,5$$

όπου:  $\rho$  η πυκνότητα σε μονάδες του μετρικού συστήματος ( $\text{g/cm}^3$  ή  $\text{kg/l}$ )

2) Το **σημείο ανιλίνης (Aniline Point – A.P.)** σε °F, δηλαδή η ελάχιστη θερμοκρασία σε βαθμούς °F, πάνω από την οποία ίσοι όγκοι ανιλίνης και πετρελαίου αναμειγνύονται πλήρως σχηματίζοντας ομοιογενές διαφανές διάλυμα. Η μέθοδος περιγράφεται στο κεφάλαιο 12 (βλ. § 12.12).

3) Η **θερμοκρασία ( $T_{50}$ )** σε °F, δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία αποστάζει το 50% του πετρελαίου (σε °F).

Με βάση τις παραπάνω ιδιότητες η ποιότητα καύσης του πετρελαίου μπορεί να εκφραστεί με δυο τρόπους:

1) **Δείκτης diesel (diesel Index – DI)**, που βρίσκεται από τη σχέση:

$$DI = \frac{A.P. \times API}{100}$$

Ο δείκτης Diesel μετατρέπεται σε αριθμό κετανίου με τις εμπειρικές σχέσεις:

$$CN = DI - 3$$

$$CN = 0,72DI + 10$$

2) **Αριθμός ή δείκτης κετανίου από υπολογισμό (Calculated Cetane Index – CCI)**, που βρίσκεται με πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις ή με νομογραφήματα, που περιγράφονται στη μέθοδο ASTM D-976/IP 218.

Κατά προσέγγιση μπορεί να εφαρμοσθεί η σχέση:

$$CCI = 175,4 \times \log T_{50} + 1,98 \times API - 496$$

όπου: CCI ο αριθμός κετανίου από υπολογισμό,  $T_{50}$

η θερμοκρασία απόσταξης του 50% του πετρελαίου Diesel σε °F.

### 6.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το κτύπημα στις πετρελαιομηχανές

Είδαμε στην παράγραφο 6.2 ότι το κτύπημα στις πετρελαιομηχανές οφείλεται στην καθυστέρηση ανάφλεξης, που κατά κύριο λόγο εξαρτάται από το καύσιμο και μάλιστα από το είδος των υδρογονανθράκων που το αποτελούν. Το φαινόμενο αυτό, όμως, που έχει ιδιαίτερη σημασία για τη ζωή και την απόδοση της μηχανής, επηρεάζεται από μία σειρά λειτουργικών και μηχανικών παραγόντων της μηχανής, από τους οποίους οι σπουδαιότεροι εξετάζονται στην παράγραφο αυτή. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι κάθε παράγοντας που αυξάνει τη θερμοκρασία στον θάλαμο καύσης ή τον χρόνο επαφής καυσίμου-αέρα, περιορίζει το ενδεχόμενο κτυπήματος, ενώ αντίθετα παράγοντες που μειώνουν τη θερμοκρασία ή τον χρόνο επαφής αέρα-καυσίμου αυξάνουν την πιθανότητα κτυπήματος στη μηχανή. Τα παραπάνω εξηγούνται εύκολα από το γεγονός ότι η υψηλή θερμοκρασία και ο σχετικά μεγαλύτερος χρόνος επαφής καυσίμου-αέρα αυξάνουν την πιθανότητα έγκαιρης ανάφλεξης, που θα μπορούσε να περιορίσει ή και να εκμηδενίσει το ενδεχόμενο κτυπήματος στη μηχανή.

#### 6.4.1 Ταχύτητα περιστροφής

Η ταχύτητα περιστροφής βρίσκεται σε άμεση σχέση με το κτύπημα στη μηχανή. Μία ταχύστροφη μηχανή περιορίζει τον χρόνο επαφής καυσίμου-αέρα και συνεπώς απαιτεί καύσιμα με μεγάλο αριθμό κετανίου, που εξασφαλίζει μικρότερη επιβράδυνση ανάφλεξης. Αντίθετα οι βραδύστροφες μηχανές αρκούνται και σε λιγότερα κετάνια, ενώ ο διαθέσιμος για την ανάφλεξη χρόνος είναι μεγαλύτερος.

Ενδεικτικά οι απαιτήσεις σε αριθμό κετανίου σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, φαίνονται στον πίνακα 6.5.

#### 6.4.2 Συμπύεση

Ο βαθμός συμπίεσης  $r$  αυξάνει την τελική θερμοκρασία του αέρα στο τέλος της συμπίεσης, γι' αυτό και είναι αντιστρόφως ανάλογος προς την καθυστέρηση ανάφλεξης. Όσο πιο μεγάλος είναι ο βαθμός συμπίεσης  $r$ , τόσο ταχύτερη είναι η ανάφλεξη του καυσίμου μετά την έγχυση, συνεπώς τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα κτυπήματος.

**Πίνακας 6.5**  
**Σχέση ταχύτητας περιστροφής (rpm)**  
**και αριθμού κετανίου (CN)**

| Λειτουργία μηχανής | rpm      | Απαιτούμενος αριθμός κετανίου (CN) |
|--------------------|----------|------------------------------------|
| Βραδύστροφη        | < 500    | 25-35                              |
| Με μέση ταχύτητα   | 500-1000 | 35-45                              |
| Ταχύστροφη         | > 1000   | 45-60                              |

### 6.4.3 Στροβιλισμός

Αν ο θάλαμος καύσης είναι κατασκευασμένος έτσι, ώστε να ευνοεί την αύξηση του στροβιλισμού στο μείγμα καυσίμου/αέρα, το κτύπημα στον κινητήρα θα είναι μικρότερο.

### 6.4.4 Προπορεία έγχυσης (avance)

Η προπορεία έγχυσης είναι απαραίτητη στις μηχανές diesel, ώστε η αύξηση της πίεσης να συνεχίζεται και όταν το έμβολο φθάσει στο ΑΝΣ. Υπάρχει όμως ένα όριο προπορείας ( $10^{\circ}$ - $30^{\circ}$ ) ανάλογα με την κάθε περίπτωση, πέρα από το οποίο η προπορεία επιτείνει το κτύπημα. Αυτό οφείλεται στο ότι η πίεση και η αντίστοιχη θερμοκρασία δεν έχουν φθάσει σε τιμές που να εξασφαλίζουν άνετη αυτανάφλεξη. Την προπορεία της κάθε μηχανής καθορίζει ο κατασκευαστής της και αντιστοιχεί βεβαίως σε ορισμένο είδος καυσίμου, που επίσης υποδεικνύεται από τον κατασκευαστή.

### 6.4.5 Υπερπλήρωση (supercharge)

Η υπερπλήρωση στις μηχανές diesel περιορίζει το κτύπημα, γιατί αυξάνει την πίεση και τη θερμοκρασία του αέρα στο τέλος της συμπίεσης, συνεπώς ευνοεί την αυτανάφλεξη του καυσίμου.

### 6.4.6 Φορτίο

Όταν μία μηχανή diesel λειτουργεί με μεγάλα φορτία, έχουμε αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας στους κυλίνδρους, πράγμα που επιταχύνει την ανάφλεξη και συνεπώς περιορίζει το κτύπημα. Συνεπώς μία αφόρτιστη μηχανή ή μια μηχανή που λειτουργεί με μικρό φορτίο, μπορεί να παρουσιάζει κτύπημα, που με την αύξηση του φορτίου ελαττώνεται. Αν λοιπόν η μηχανή διαθέτει μειωτήρα ή γενικά έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της σχέσης μετάδοσης στροφών από τη μηχανή προς τον άξονα, είναι δυνατόν με κατάλληλους συνδυασμούς ο χειριστής να περιορίσει το κτύπημα και τις βλαβερές για τη μηχανή συνέπειές του.



### Συμπέρασμα

Οι παραπάνω παράγοντες δείχνουν τους τρόπους, με τους οποίους μπορεί να αντιμετωπισθεί το ενδεχόμενο κτυπήματος σε μία πετρελαιομηχανή. Μερικοί από αυτούς (στροφές, φορτίο, avance), παρέχουν τη δυνατότητα και στον χειριστή της μηχανής να αντιμετωπίσει ένα παρόμοιο ενδεχόμενο, εξαντλώντας όσα από τα παραπάνω μέσα έχει στη διάθεσή του, εφόσον φυσικά δεν έχει τη δυνατότητα να αλλάξει το καύσιμο, στο οποίο συνήθως οφείλεται το φαινόμενο του κτυπήματος.

## 6.5 Συνέπειες από τη χρήση καυσίμου με αντικανονικό αριθμό κετανίου

Τον αριθμό κετανίου που πρέπει να έχει το καύσιμο για μια συγκεκριμένη πετρελαιομηχανή, τον υποδεικνύει πάντοτε ο κατασκευαστής στα εγχειρίδια που συνοδεύουν τη μηχανή. Αν το καύσιμο που χρησιμοποιείται δεν ανταποκρίνεται στις υποδείξεις του κατασκευαστή ως προς τον αριθμό κετανίου, οι συνέπειες μπορεί να είναι σοβαρές για τη λειτουργία, την απόδοση ή τη ζωή της μηχανής. Από την άποψη αυτή διακρίνουμε τις ακόλουθες δύο περιπτώσεις:

### 6.5.1 Καύσιμα με αριθμό κετανίου μικρότερο από τον κανονικό (υποκετανικά)

Αριθμός κετανίου μικρότερος από τον κανονικό συνεπάγεται κατ' αρχήν καθυστέρηση ανάφλεξης, που οδηγεί στις εξής συνέπειες:

1) **Θορυβώδης λειτουργία** της μηχανής από το κτύπημα, που οφείλεται στη συσσώρευση πετρελαίου στον θάλαμο καύσης, όσο διαρκεί η καθυστέρηση ανάφλεξης.

2) **Μηχανική καταπόνηση**, την οποία προκαλεί το κτύπημα και που μπορεί να έχει καταστρεπτικά αποτελέσματα για τη μηχανή.

3) **Απώλεια ισχύος**, γιατί είναι πιθανό να μην είναι δυνατόν να απορροφηθεί όλη η ενέργεια που παράγεται από την απότομη αύξηση της πίεσης κατά τη διάρκεια της ανεξέλεγκτης καύσης ( βλ. § 6.2, Στάδιο 2).

4) **Δυσχέρεια εκκίνησης**. Αν και η εκκίνηση της μηχανής από την ψυχρή κατάσταση εξαρτάται κυρίως από την πτητικότητα του καυσίμου, ο ρόλος του αριθμού κετανίου είναι σημαντικός. Με αριθμό κετανίου μικρότερο από το κανονικό απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος για την εκκίνηση, αφού δυσχεραίνεται η ανά-

φλεξη, ιδίως τώρα που η μηχανή είναι κρύα. Ο πίνακας 6.6 δείχνει την επίδραση του αριθμού κετανίου στον χρόνο εκκίνησης σε μία πετρελαιομηχανή.

**Πίνακας 6.6**  
**Επίδραση του αριθμού κετανίου**  
**στο χρόνο εκκίνησης μηχανών diesel**

| Θερμοκρασία εκκίνησης (°C) | Χρόνος εκκίνησης (sec) |       |       |
|----------------------------|------------------------|-------|-------|
|                            | CN 40                  | CN 55 | CN 70 |
| -10                        | 90                     | 50    | 25    |
| -5                         | 50                     | 30    | 10    |
| 0                          | 20                     | 12    | 8     |
| 5                          | 10                     | 8     | 6     |
| 10                         | 6                      | 5     | 5     |

Από τον πίνακα φαίνεται ότι η επίδραση του αριθμού κετανίου στον χρόνο εκκίνησης ψυχρής πετρελαιομηχανής είναι σημαντικός για πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (< -5°C), ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες (10°C) είναι ασήμαντος.

### 6.5.2 Καύσιμα με αριθμό κετανίου μεγαλύτερο του κανονικού (υπερκετανικά)

Με υπερκετανικά καύσιμα όλες οι ανωμαλίες που περιγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο (6.5.1) εξαφανίζονται. Η μοναδική, αλλά αρκετά σοβαρή, συνέπεια από τη χρήση υπερκετανικών καυσίμων στις πετρελαιομηχανές είναι ότι λόγω της μεγάλης ταχύτητας ανάφλεξης, ο διαθέσιμος χρόνος για την ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα, είναι ανεπαρκής και η καύση είναι ατελής.

Η ατελής καύση έχει τις παρακάτω συνέπειες:

- 1) Εξαγωγή καπνού από την εξάτμιση (απαγωγή καυσαερίων) της μηχανής
- 2) Μείωση του βαθμού απόδοσης
- 3) Ρύπανση του κυλίνδρου. Τα εξανθρακώματα που σχηματίζονται από την ατελή καύση επικαθονται στο προστόμιο του καυστήρα, όπου σχηματίζουν αποθέσεις, συχνά αρκετά ογκώδεις. Τμήματα σκληρών αποθέσεων παρασύρονται και μπορεί να επικαθήσουν στις έδρες των βαλβίδων, προκαλώντας έτσι τη βαθμιαία φθορά τους. Αυτό γίνεται συχνά αιτία να καίγονται οι βαλβίδες, γιατί η επαφή με τη βάση τους δεν είναι πλήρους και συνεπώς η ψύξη τους είναι ανεπαρκής, πράγμα που οδηγεί σε υπερθέρμανση (κάψιμο).

### 6.6 Ιδιότητες του πετρελαίου diesel

Από τις ιδιότητες του πετρελαίου diesel (πέραν του

αριθμού κετανίου) οι σπουδαιότερες εξετάζονται συνοπτικά παρακάτω.

#### 6.6.1 Ιξώδες

Είναι ιδιότητα που σχετίζεται με τη ρευστότητα του πετρελαίου diesel και εκφράζει την εσωτερική αντίσταση λόγω τριβής μεταξύ των μορίων του πετρελαίου diesel κατά τη ροή του. Κάθε υγρό με μικρό ιξώδες ρέει ευκολότερα από άλλο υγρό, του οποίου το ιξώδες είναι μεγαλύτερο.

Για το πετρέλαιο diesel η τιμή του ιξώδους έχει ιδιαίτερη σημασία και πρέπει να βρίσκεται στα όρια που οι αντίστοιχες προδιαγραφές καθορίζουν (πίν. 6.1 και 6.2). Έξω από τα όρια αυτά εμφανίζονται οι εξής ανωμαλίες:

1) **Ιξώδες μικρότερο από το κανονικό** σημαίνει ότι το πετρέλαιο diesel είναι πολύ λεπτόρρευστο, πράγμα που οδηγεί σε κακή διείσδυση στον θάλαμο καύσης, όπου κατά τη στιγμή της έγχυσης επικρατούν υψηλές πιέσεις. Έτσι η ανάμειξη με τον αέρα δεν είναι καλή και η καύση είναι ατελής με όλα τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα (μαύρος καπνός στην εξαγωγή, ρύπανση των κυλίνδρων, μειωμένη απόδοση).

2) **Ιξώδες μεγαλύτερο από το κανονικό** προκαλεί δυσχέρειες στην άντληση και διακίνηση του πετρελαίου diesel, αλλά και μειωμένο διασκορπισμό (μεγάλου μεγέθους, χοντρά σταγονίδια) κατά την έγχυση στο θάλαμο καύσης, πράγμα που οδηγεί και πάλι σε ατελή καύση, με τις ίδιες όπως και στην προηγούμενη περίπτωση συνέπειες. Είναι γνωστό άλλωστε ότι ο βαθμός διασκορπισμού, δηλαδή το μέγεθος των σταγονιδίων, επηρεάζει άμεσα την επαφή καυσίμου αέρα και συνεπώς την πληρότητα της καύσης.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ιξώδους, παίρνουν την ονομασία τους από τη συσκευή με την οποία γίνεται η μέτρηση (μέθοδος Saybolt, Engler κ.λπ.). Οι συσκευές διαφέρουν μεταξύ τους κυρίως κατά την ποσότητα του δείγματος και το πάχος στρώματος του δείγματος και περιγράφονται στο κεφάλαιο 12. Η τιμή του ιξώδους πρέπει να συνοδεύεται πάντοτε και από τη θερμοκρασία, στην οποία αναφέρεται.

#### 6.6.2 Πτητικότητα

Αν και η πτητικότητα του πετρελαίου diesel δεν έχει τη σημασία που η ιδιότητα αυτή έχει για τη βενζίνη, εντούτοις επηρεάζει την καύση του σε έναν κινητήρα diesel, γιατί απ' αυτήν εξαρτώνται οι συνθήκες εκ νέωψης του πετρελαίου diesel, που επηρεάζει άμεσα και την ανάφλεξη και την καύση που ακολουθεί.

Μέτρο της πτητικότητας, που εξασφαλίζει καλή

εκνέφωση και συνεπώς κατάλληλες συνθήκες ανάφλεξης και καύσης, είναι η θερμοκρασία στην οποία αποσπάζουν διάφορα κλάσματα του πετρελαίου, και κυρίως:

- 1) Η θερμοκρασία στην οποία αποσπάζει το 50%.
- 2) Η θερμοκρασία στην οποία αποσπάζει το 90% και
- 3) το τέλος της απόσταξης.

Τα όρια των παραπάνω θερμοκρασιών καθορίζονται από τις ισχύουσες προδιαγραφές για κάθε τύπο πετρελαίου (πίν. 6.1 και 6.2).

### 6.6.3 Περιεκτικότητα θειούχων ενώσεων

Η περιεκτικότητα του πετρελαίου σε θείο (S) υπό οποιαδήποτε μορφή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα όρια που οι διάφορες προδιαγραφές καθορίζουν. Τα όρια αυτά ποικίλλουν ανάλογα με την περίπτωση. Σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των ορίων αυτών παίζει η προστασία του περιβάλλοντος από τη ρύπανση, που τα προϊόντα καύσης του θείου προκαλούν. Σ' αυτό το σημείο, όλο και περισσότερο γίνεται ο παράγοντας αυτός σημαντικότερος για τα καύσιμα των Ναυτικών Μηχανών. Η τιμή του πετρελαίου diesel μεταβάλλεται αντίστροφα προς την περιεκτικότητά του σε θείο και επειδή το κόστος των καυσίμων στην Εμπορική Ναυτία έχει τεράστια σημασία, η χρήση χαμηλού κόστους πετρελαίου diesel συντρέχει με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα των καυσίμων αυτών σε θείο, όσο οι διεθνείς κανονισμοί το επιτρέπουν. Τα επιτρεπόμενα όρια της περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο σήμερα σε γενικές γραμμές είναι:

- |   |              |
|---|--------------|
| 1) Πετρέλαιο diesel, γενικών                          | 1 % μέγιστο  |
| 2) Πετρέλαιο diesel για οδικές μεταφορές και θέρμανση | 0,2% μέγιστο |
| 3) Βαριά καύσιμα για ναυτικές μηχανές                 | 0,5% μέγιστο |

Πιο εμπειριστατωμένη ανάλυση σε αυτό το θέμα για τα ναυτιλιακά καύσιμα γίνεται στην παράγραφο 8.5.5.

Είναι γεγονός ότι όσο περισσότερο θείο περιέχει το πετρέλαιο τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διαβρωτική επίδραση των προϊόντων καύσης του ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) στα μεταλλικά μέρη της μηχανής, με τα οποία έρχονται σε επαφή. Η απομάκρυνση όμως του θείου από το πετρέλαιο (αποθείωση) επιβαρύνει το κόστος του σημαντικά και σε ορισμένες περιπτώσεις αποβαίνει αντιοικονομική και συνεπώς ασύμφορη.

Στις περιπτώσεις αυτές η επιβάρυνση από τη φθορά της μηχανής από τις θειούχες ενώσεις είναι προτιμότερη, παρά η προμήθεια καυσίμων με μικρότερη περιεκτικότητα σε θείο. Υπάρχουν άλλωστε τρόποι, με τους οποίους οι επιβλαβείς συνέπειες για τη μηχανή

από τις θειούχες ενώσεις που το πετρέλαιο περιέχει, μπορούν να αντιμετωπισθούν ικανοποιητικά. Μεταξύ αυτών σπουδαιότεροι είναι:

1) Διατήρηση του νερού ψύξης της μηχανής σε θερμοκρασίες που αποκλείουν τη συμπύκνωση των ατμών και τον σχηματισμό του διαβρωτικού θειικού οξέος. Η θερμοκρασία αυτή κυμαίνεται από 60 – 80°C. Η επίδραση της θερμοκρασίας του χιτωνίου στη διαβρωτική φθορά των προϊόντων καύσης του θείου φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 6.2.

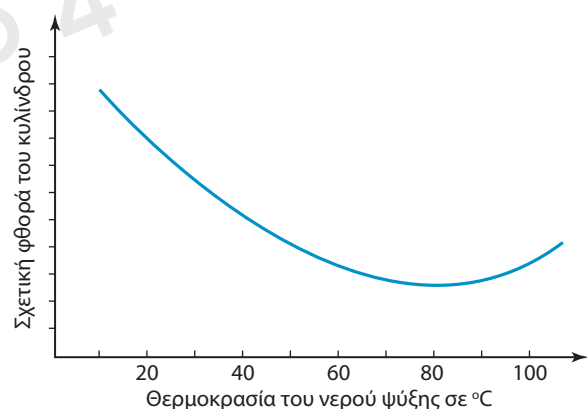
2) Χρήση λιπαντέλαιων ενισχυμένων με χημικά πρόσθετα αλκαλικής βάσης που εξουδετερώνουν το θειικό οξύ. Η αλκαλικότητα των λιπαντικών αυτών εκφράζεται με τον ολικό αριθμό αλκαλικότητας (Total Base Number – TBN). Η τιμή του TBN αποτελεί μέτρο του βαθμού μόλυνσης του λιπαντικού από τα όξινα συστατικά των καυσαερίων και συνεπώς μέτρο της προστασίας της μηχανής από τα επιβλαβή αυτά συστατικά.

3) Μεταλλουργική προστασία των επιφανειών που προσβάλλονται και που επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

α) Με επιχρωμίσωση των χιτωνίων.

β) Με την κατασκευή χιτωνίων από ανοξειδωτο χάλυβα.

Τα αποτελέσματα είναι ακόμα καλύτερα αν η επιχρωμίσωση έχει πορώδη υφή, που επιτυγχάνεται με επίδραση οξέος στο στρώμα του χρωμίου και που έχει ως αποτέλεσμα να συγκρατεί καλύτερα τη λιπαντική μεμβράνη που σχηματίζει το λιπαντέλαιο στα τοιχώματα του χιτωνίου. Πρέπει να διευκρινισθεί ότι τα ελατήρια του εμβόλου δεν επιχρωμίζονται γιατί η τριβή μεταξύ δύο επιχρωμιωμένων επιφανειών προκαλεί τη γρήγορη φθορά τους. Έτσι τα ελατήρια κατασκευάζονται από κοινό χυτοχάλυβα που φθείρεται ταχύτερα οπότε και αντικαθίστανται συχνότερα.



**Σχ. 6.2**

Επίδραση της θερμοκρασίας του νερού ψύξης στη φθορά του κυλίνδρου από τη διαβρωτική δράση των προϊόντων καύσης του θείου



### 6.6.4 Σημείο ανάφλεξης

Η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία οι ατμοί που σχηματίζονται κατά τη θέρμανση του καυσίμου αναφλέγονται προσεγγίζοντας τη φλόγα μιας ειδικής συσκευής, και υπό ειδικές συνθήκες, ονομάζεται **σημείο ανάφλεξης**. Η τιμή του για το πετρέλαιο diesel πρέπει για λόγους ασφάλειας να μην είναι κάτω από τους 50°C. Τυπικές τιμές σημείου ανάφλεξης είναι μεταξύ 62 – 65°C. Η τιμή του σημείου ανάφλεξης του πετρελαίου diesel επηρεάζεται (μειώνεται) σημαντικά όταν γίνει ανάμειξη με μικρές ποσότητες ελαφρύτερων κλασμάτων πετρελαίου, όπως κηροζίνη και βενζίνη. Ενδεικτικά, ανάμειξη με 0,5% βενζίνη μπορεί να μειώσει το σημείο ανάφλεξης κατά 10-15°C.

### 6.6.5 Βαθμός καθαρότητας

Το πετρέλαιο diesel, ως απόσταγμα του φυσικού πετρελαίου, διακρίνεται από τον υψηλό βαθμό καθαρότητας, στον οποίο κυρίως οφείλεται η υπεροχή του από τα άλλα είδη (υπολειμματικά) καυσίμων, που προορίζονται για τις MEK και έχουν ως βάση το μαζούτ. Έτσι και τα προϊόντα καύσης θα έχουν ανάλογη καθαρότητα και συνεπώς οι φθορές της μηχανής από επιβλαβείς προσμίξεις περιορίζονται στο ελάχιστο.

Ο βαθμός καθαρότητας του πετρελαίου diesel ελέγχεται με δυο κυρίως τρόπους:

1) Με **φυγοκέντριση ορισμένης ποσότητας δείγματος** (100 ml) υπό ορισμένες συνθήκες, προσδιορίζονται οι ακαθαρσίες που μαζί με το νερό περιέχονται στο πετρέλαιο diesel. Το σύνολό τους, που εκφράζεται ως νερό και ξένες ύλες μέσω φυγοκέντρισης (Bottom Sediment and Wate – BSW) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,05% και

2) Με **τον προσδιορισμό της τέφρας του πετρελαίου diesel**, της οποίας το ανώτατο όριο (0,01% κ.β.) τίθεται στις προδιαγραφές (πίν. 6.1 και 6.2).

### 6.6.6 Εξανθράκωμα (carbon residue)

Είναι το ανθρακούχο υπόλειμμα, που καταλείπει το πετρέλαιο diesel, όταν καίγεται ατελώς υπό εντελώς ορισμένες συνθήκες. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται συνήθως η συσκευή Conradson (βλ. § 12.11) στην οποία το εξανθράκωμα σε υπόλειμμα 10%, που προκύπτει μετά την απόσταξη του υπόλοιπου 90% του αρχικού δείγματος, δεν πρέπει για ένα καλής ποιότητας πετρέλαιο diesel να είναι μεγαλύτερο από 0,2%. Η τιμή του εξανθρακώματος φανερώνει κυρίως την τάση που έχει το πετρέλαιο να σχηματίζει ανθρακούχα κατάλοιπα κατά την καύση του.

Οι απαιτήσεις αυτές ως προς την καθαρότητα τού πετρελαίου diesel εξασφαλίζονται βέβαια κατά την αρ-

χική παραλαβή του από το διυλιστήριο ή από τον σταθμό ανεφοδιασμού. Είναι όμως δύσκολο η καθαρότητα αυτή να διατηρηθεί μέχρι τη στιγμή της καύσης. Είναι πιθανό κατά την παραμονή του στις δεξαμενές ή κατά τη μετάγγιση μέσω του δικτύου να έχουμε μόλυνση με νερό ή με ξένες ύλες, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πια συμφωνία με τις προδιαγραφές. Για την αντιμετώπιση του ενδεχομένου αυτού το πετρέλαιο diesel πριν από την είσοδό του στη μηχανή υποβάλλεται σε καθαρισμό με φυγοκέντριση ή με φίλτρα σε ειδικές εγκαταστάσεις που κάθε πλοίο διαθέτει (βλ. § 8.7.4 και 8.7.5).

### 6.6.7 Σημείο ροής

Η κατώτατη θερμοκρασία στην οποία το καύσιμο μπορεί να ρέει υπό ορισμένες συνθήκες ονομάζεται **σημείο ροής**. Η σημασία του σημείου ροής για την ποιότητα του πετρελαίου diesel έγκειται στο ότι αυτό έχει άμεση συνάρτηση με την αντλητικότητα του πετρελαίου. Υψηλές τιμές του σημείου ροής επηρεάζουν την αντλητικότητά του σε σημείο που η διακίνησή του στο δίκτυο είναι προβληματική. Για το πετρέλαιο θέρμανσης οι προδιαγραφές σημείου ροής (πίν. 6.2) αναφέρουν τα ανώτατα όρια ξεχωριστά για τη θερινή και τη χειμερινή περίοδο.

### 6.6.8 Πυκνότητα

Η τιμή της κυμαίνεται από 800 – 870 kg/m<sup>3</sup> και οι προδιαγραφές καθορίζουν στενότερα όρια (πίν. 6.1 και 6.2). Είναι και αυτή μέτρο της πτητικότητας του καυσίμου. Η μέτρησή της έχει ιδιαίτερη σημασία για τη διακίνηση του πετρελαίου diesel, όταν αυτή γίνεται σε **μονάδες μάζας**, γιατί η μάζα είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία, ενώ ο όγκος εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία μετριέται. Επειδή, λοιπόν, το πετρέλαιο diesel δεν μπορεί να ζυγισθεί, ενώ ο όγκος μετριέται ευκολότερα είτε με μετρητές είτε με την ογκομέτρηση των δεξαμενών, η μάζα βρίσκεται από τη σχέση:

$$\text{Μάζα} = \text{Όγκος} \times \text{πυκνότητα}$$

Αυτονόητο είναι ότι για να υπολογίσουμε την ακριβή τιμή της μάζας θα πρέπει ο όγκος και η πυκνότητα να έχουν μετρηθεί στην ίδια θερμοκρασία. Σήμερα η διακίνηση του πετρελαίου diesel γίνεται σε μονάδες όγκου (ℓ ή m<sup>3</sup>) στη θερμοκρασία αναφοράς των 15°C. Έτσι μπορεί να γίνει αναγωγή της πυκνότητας (μέσω τύπων) στη θερμοκρασία μέτρησης του όγκου ή να γίνει αναγωγή του όγκου του πετρελαίου diesel στους 15°C (μέσω ειδικών πινάκων), που είναι η θερμοκρασία αναφοράς πυκνότητας. Στο κεφάλαιο 12 εξετάζεται διεξοδικά η μετατροπή όγκου, καθώς γίνεται αναφορά και σε προβλήματα υπολογισμού μάζας καυσίμων.



## 7.1 Γενικά

Το μέρος του φυσικού πετρελαίου που δεν αποστάζει ως τους 360°C βγαίνει από τη βάση του πύργου απόσταξης του διυλιστηρίου και αποτελεί ένα πολύτιμο καύσιμο, που φέρεται με το γενικό όνομα **υπόλειμμα απόσταξης** (residual oil), περισσότερο γνωστό ως **μαζούτ**.

Το μαζούτ είναι ένα πολύτιμο καύσιμο, γιατί:

- 1) Αποτελεί συνήθως το 50% (κατά βάρος) του φυσικού πετρελαίου
- 2) Είναι φθινό (τουλάχιστον 30-50% χαμηλότερη τιμή από αυτή του πετρελαίου diesel).
- 3) Είχε ευρύτατη εφαρμογή ως καύσιμο λεβήτων, αλλά και ως καύσιμο πετρελαιομηχανών (βλ. κεφάλαιο 8).
- 4) Είναι η πρώτη ύλη για την παραγωγή των λιπαντικών.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο λεβήτων, δηλαδή στις μηχανές ατμού, όπου είχε εκτοπίσει τους γαιάνθρακες, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται ως το κύριο καύσιμο στις πετρελαιομηχανές του εμπορικού ναυτικού.

Η χρήση του μαζούτ ως καύσιμο λεβήτων οφείλεται στα αναμφισβήτητα **πλεονεκτήματα** που έχει σε σύγκριση με άλλα καύσιμα (στερεά και υγρά) μεταξύ των οποίων τα σημαντικότερα είναι:

- 1) Η ομοιομορφία της ποιότητας, που δεν απαιτεί συχνές αλλαγές ρύθμισης των συστημάτων καύσης, όπως συμβαίνει με τα στερεά καύσιμα.
  - 2) Η μεγάλη θερμαντική ικανότητα.
  - 3) Η δυνατότητα διακίνησης με αντλίες και σωληνώσεις, ώστε να είναι δυνατή η ελεγχόμενη μεταφορά του από τα σημεία (δεξαμενές) αποθήκευσης
  - 4) Η απόδοση καύσης και η ακτίνα ενέργειας είναι μεγαλύτερη, λόγω της μεγάλης πυκνότητάς του σε σύγκριση με άλλα υγρά και στερεά καύσιμα
  - 5) Η καθαρότητα του μηχανοστασίου και η ετοιμότητα έναρξης και παύσης της λειτουργίας της μηχανής σε ένα πλοίο που χρησιμοποιεί μαζούτ
  - 6) Η απαίτηση περιορισμένου προσωπικού μηχανής.
- Η χρήση μαζούτ στους λέβητες είναι απαραίτητη

όταν υπάρχει ανάγκη στο πλοίο για θέρμανση φορτίων, για λειτουργία μηχανημάτων για εκφόρτωση (βίτζια κ.λπ.) και για ειδικές καταστάσεις, όπως δέσιμο.

Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για πρόωση, δηλ. στις προωσθήριες εγκαταστάσεις πλοίων (παλινδρομικές - ατμοστρόβιλοι).

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι βασικές ιδιότητες του μαζούτ ως καυσίμου, ενώ οι διάφορες ποιότητες μαζούτ για τις ναυτικές πετρελαιομηχανές εξετάζονται ιδιαίτερα στο κεφάλαιο 8.

## 7.2 Ιδιότητες του μαζούτ

### 7.2.1 Ιξώδες

Η ιδιότητα αυτή επηρεάζει κυρίως τις συνθήκες διασκορπισμού του καυσίμου στους χώρους καύσης, άρα και την ποιότητα καύσης.

Αν το καύσιμο μαζούτ έχει ιξώδες μεγαλύτερο από το κανονικό, εκτός από τα προβλήματα διακίνησης που μπορεί να παρουσιαστούν λόγω μειωμένης αντλητικότητας, είναι πολύ πιθανόν να εμφανισθεί κακός διασκορπισμός, που τελικά οδηγεί σε ατελή καύση με αποτέλεσμα να παραμένουν κατάλοιπα άνθρακα στον χώρο καύσης.

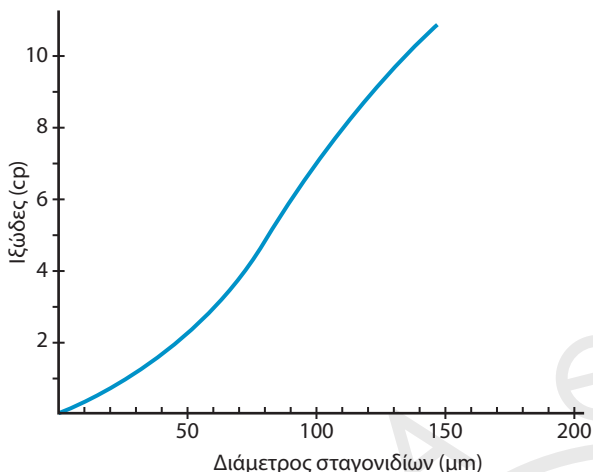
Την επίδραση του ιξώδους στο μέγεθος των σταγονιδίων, δηλαδή στον βαθμό διασκορπισμού του καυσίμου, δείχνει το σχήμα 7.1, όπου η διάμετρος των σταγονιδίων σε μη σχετίζεται με το απόλυτο ιξώδες του καυσίμου (σε  $cp$ , όπου  $1\text{ cp} = 1\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ).

Στο σχήμα 7.2 φαίνεται η επίδραση του ιξώδους στην πίεση του εκνεφωτή που απαιτείται για να επιτευχθεί ορισμένος βαθμός διασκορπισμού.

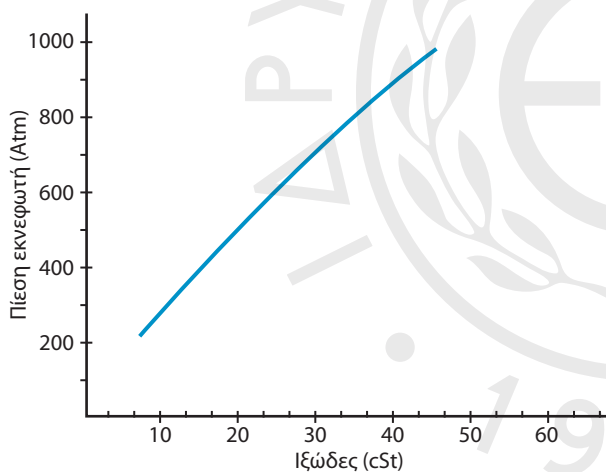
Για τις συνέπειες στον διασκορπισμό από την παροχή καυσίμου με ιξώδες εκτός των επιτρεπτών ορίων ισχύουν τα ακόλουθα.

Αν η τιμή ιξώδους του καυσίμου είναι τόσο υψηλή, ώστε να προκαλεί δυσχέρειες εκνέφωσης και επομένως κακή καύση, τότε επιβάλλεται προθέρμανση του καυσίμου, που μειώνει την τιμή του ιξώδους στα επιθυμητά όρια (βλ. § 8.5.2)

Αντίθετα, πολύ χαμηλό ιξώδες πιθανόν να προκαλέσει επιστροφή της φλόγας και ακανόνιστη καύση, που μπορεί να φθάσει ως την απόφραξη του εκνεφωτή.



**Σχ. 7.1**  
Συσχέτιση του ιξώδους  
με τον βαθμό διασκορπισμού του καυσίμου



**Σχ. 7.2**  
Σχέση του ιξώδους και της πίεσης εκνεφωτή

### 7.2.2 Θείο

Για το μαζούτ ισχύει ό,τι και για τα καύσιμα ναυτιλίας, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 8.5.5. Καθότι οι βλάβες που μπορούν να προκαλέσουν τα προϊόντα καύσης του θείου σ' όλη τη διαδρομή των καυσαερίων ως την εξαγωγή τους (καπνοδόχος) είναι λιγότερο δραστικές από αυτές μέσα στην πετρελαιομηχανή, η καύση μαζούτ ακολουθεί τους ίδιους κανονισμούς, όπως περιγράφονται στην παράγραφο 8.5.5.

### 7.2.3 Σταθερότητα

Το μαζούτ είναι μείγμα πολλών και ποικίλων συστατικών, κυρίως υδρογονανθράκων και γι' αυτό σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζει ευπάθεια ως προς τη σταθερότητά του, που εκδηλώνεται με βαθμιαία συσσωμάτωση. Τα συσσωματώματα ως βαρύτερα συστατικά, καθώς αποχωρίζονται, κατακάθονται στον πυθμένα της δεξαμενής και σχηματίζουν ένα παχύρρευστο στρώμα με ασφαλτική υφή που δύσκολα αντλείται, αλλά και όταν αντληθεί μπορεί να προκαλέσει έμφραξη των φίλτρων ή των διασκορπιστών ή ακόμη και ανωμαλίες κατά την καύση. Η τάση αυτή αποχωρισμού των συσσωματωμάτων του μαζούτ επιτείνεται κατά την προθέρμανση, πράγμα που μπορεί να προκαλέσει σχηματισμό καταλοίπων στον προθερμαντήρα.

Η **θερμική σταθερότητα του μαζούτ** (thermal stability), ελέγχεται με ειδική εργαστηριακή συσκευή, γνωστή ως N.B.T.L. Heater. Στη συσκευή αυτή το εξεταζόμενο δείγμα μαζούτ διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία 65°C, που είναι μια συνηθισμένη θερμοκρασία προθέρμανσης του μαζούτ. Μ' αυτήν τη θερμοκρασία το καύσιμο κυκλοφορεί με ειδική αντλία επί 20 ώρες σε κλειστό κύκλωμα. Στο δοχείο της συσκευής που περιέχει το δείγμα τοποθετείται χαλύβδινη ράβδος, που έχει λειανθεί, και, στο τέλος των 20 ωρών, εξετάζεται ο βαθμός ρύπανσης, που προκαλείται από τις σχηματιζόμενες ασφαλτούχες αποθέσεις στην επιφάνεια της ράβδου. Μεγάλες αποθέσεις καταλοίπων προδίδουν έλλειψη θερμικής σταθερότητας και επιβάλλουν λήψη μέτρων αύξησης της σταθερότητας του καυσίμου, όπως διασκορπιστικά πρόσθετα (βλ. § 8.6.1).

Με ανάλογο τρόπο ελέγχεται και η αναμειξιμότητα δυο ποσοτήτων του μαζούτ (compatibility). Συχνά μία δεξαμενή με μαζούτ χρειάζεται να συμπληρωθεί με μαζούτ άλλης προέλευσης. Η ανάμειξη αυτή μπορεί να μειώσει τη θερμική σταθερότητα του καυσίμου σε βαθμό που να προκαλέσει έντονες συσσωματώσεις με τα γνωστά προβλήματα από την αποβολή ασφαλτικών αποθέσεων. Στην περίπτωση αυτή η δοκιμή της θερμικής σταθερότητας που περιγράφεται παραπάνω γίνεται σε δείγμα που αποτελείται από μείγμα των δύο καυσίμων στην αναλογία με την οποία θα περιέχονται στη δεξαμενή, στην οποία θα αναμειχθούν. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ο ρόλος των ασφατενίων στη σταθερότητα του μαζούτ. Τα ασφατενία είναι μια ομάδα ακόρεστων υδρογονανθράκων μεγάλου μοριακού βάρους που είναι αδιάλυτα σε κορεσμένους

υδρογονάνθρακες, αλλά είναι διαλυτά στο βενζόλιο και στο τολουόλιο. Αυτά αποτελούν την προβληματικότερη ομάδα συστατικών στα βαριά κλάσματα του πετρελαίου, όπως το μαζούτ, επειδή μπορούν να διαχωριστούν εύκολα αν μεταβληθεί η σύσταση του καυσίμου. Μια τέτοια περίπτωση είναι η ανάμειξη μαζούτ με πετρέλαιο diesel που στοχεύει στη μείωση του ιξώδους αλλά και τη μείωση της περιεκτικότητας σε θείο για να περάσει τα νέα όρια που έχουν τεθεί (βλ. § 8.5.5). Η υψηλή περιεκτικότητα του μαζούτ σε ασφαλένια είναι προφανώς επικίνδυνη για τη σταθερότητα του μαζούτ και για αυτό θα πρέπει να ελέγχεται. Υπάρχουν εργαστηριακοί τρόποι μέτρησης της συγκέντρωσης ασφαλενίων. Αν και αυτή η ιδιότητα δεν περιέχεται στις βασικές προδιαγραφές, πολλές φορές ζητείται η αναγραφή της ιδιότητας αυτής στις αναλύσεις καυσίμων.

### 7.3 Ελληνικές προδιαγραφές του μαζούτ

Το μαζούτ που προορίζεται για καύση σε λέβητες πάνω στο πλοίο χαρακτηρίζεται από ελαστικότερα όρια προδιαγραφών, από αυτά των υπολειμματικών καυσίμων για ναυτικές μηχανές. Δεδομένης όμως της όλο και πιο περιορισμένης χρήσης των καυσίμων για λέβητες στο πλοίο, το καύσιμο που προορίζεται για χρήση σε λέβητες, ακολουθεί τις προδιαγραφές και τους κανονισμούς των υπολειμμάτων απόσταξης, οι οποίες παρουσιάζονται και αναλύονται στις παραγράφους 8.3 (πίν. 8.3) και 8.4.

Στον πίνακα 7.1 αναγράφονται οι προδιαγραφές μαζούτ που ισχύουν από τον Ιούλιο του 2016 για την Ελλάδα με την υπουργική απόφαση 128/2016 στο ΦΕΚ 3958/Β/2016 που εναρμονίζει την υπουργική απόφαση 42/1994 στο ΦΕΚ 320/Β/1994).

**Πίνακας 7.1**  
**Ελληνικές προδιαγραφές μαζούτ**

| Κύρια χαρακτηριστικά                            | Μαζούτ χαμηλού θείου |      | Μαζούτ υψηλού θείου |      |
|---|----------------------|------|---------------------|------|
|   | No1                  | No3  | No1                 | No3  |
| 1. Πυκνότητα, σε 15°C, kg/m <sup>3</sup> , μεγ. | 970                  | 980  | 991                 | 995  |
| 2. Σημείο ανάφλεξης, °C, ελαχ.                  | 66                   | 66   | 66                  | 66   |
| 3. Σημείο ροής, °C, μεγ.                        |                      |      |                     |      |
| α) Χειμερινή περίοδος (1/10 ως 15/5)            | 10                   | –    | 10                  | 30   |
| β) Θερινή περίοδος (10/5 ως 30/9)               | 15                   | –    | 15                  | 30   |
| 4. Ιξώδες, σε 50°C, cSt, ελαχ.                  | –                    | 181  | –                   | 181  |
| Ιξώδες, σε 50°C, cSt, μεγ.                      | 180                  | 380  | 180                 | 380  |
| 5. Ανθρακούχο υπόλειμμα, %, μεγ.                | 15                   | 15   | 15                  | 17   |
| 6. Νερό, %, μεγ.                                | 0,5                  | 0,5  | 0,5                 | 0,5  |
| 7. Τέφρα, %, μεγ.                               | 0,10                 | 0,10 | 0,10                | 0,15 |
| 8. Θείο, %, μεγ.                                | 1,0                  | 1,0  | 3,2                 | 3,2  |
| 9. Βανάδιο, ppm., μεγ.                          | 120                  | 150  | 220                 | 250  |
| 10. Νάτριο, ppm., μεγ.                          | 100                  | 100  | 100                 | 150  |
| 11. Ολικό ίζημα, %, μεγ.                        | 0,15                 | 0,15 | 0,15                | 0,15 |



### 8.1 Γενικά – Μηχανές πρόωσης και κατανάλωση καυσίμου

Ξεκινώντας από τη χρήση ατμού στις μηχανές ισχύος των πλοίων του 19<sup>ου</sup> αιώνα, η παραγωγή ισχύος συνεχώς βελτιώνεται στις ημέρες μας και οι διάφορες ρυθμίσεις στους κινητήρες έχει φτιάξει μια μεγάλη γκάμα ναυτικών μηχανών και επίσης τις σχετικές υπηρεσίες για την εγκατάσταση, τη συντήρηση και τις επισκευές. Σήμερα στη ναυσιπλοΐα χρησιμοποιούνται διάφορα είδη κινητήρων. Αυτοί είναι:

- 1) Κινητήρας diesel.
- 2) Αεριοστρόβιλος.
- 3) Ηλεκτροπρόωση.
- 4) Συνδυασμός των παραπάνω.

Για την επιλογή της κύριας μηχανής πρόωσης/κινητήρα ενός πλοίου λαμβάνονται υπόψη οι εξής παράγοντες:

- 1) Μέγεθος ισχύος.
- 2) Μέγεθος έλικας.
- 3) Σχεδιασμός υποσυστημάτων.
- 4) Βάρος εγκατάστασης κινητήρα.
- 5) Κόστος εγκατάστασης κινητήρα.
- 6) Κόστος λειτουργίας κινητήρα.
- 7) Κόστος συντήρησης κινητήρα.
- 8) Σχεδιασμός/επιλογή στοιχείων μετάδοσης ισχύος.

9) Χρήση φθηνού καυσίμου (μαζούτ).

9) Χρήση φθηνού καυσίμου (μαζούτ).

Ως επί το πλείστον τα σύγχρονα μεγάλα εμπορικά πλοία χρησιμοποιούν ως κύρια μηχανή είτε αργόστροφους δίχρονους κινητήρες με σταυρό ή τετράχρονες μηχανές και ηλεκτροπρόωση. Με βάση τα παραπάνω κριτήρια επιλογής βαρύνουσα θέση έχει το κριτήριο της δυνατότητας εξοικονόμησης καυσίμου (κατανάλωση καυσίμου και χρήση φθηνού καυσίμου) χωρίς να επηρεάζεται ο πλους και η ικανότητα μεταφοράς φορτίου. Ορισμένα μικρότερα σκάφη μπορούν να χρησιμοποιούν ταχύστροφους κινητήρες diesel.

Συγκρίνοντας τις επιλογές για την κύρια μηχανή

πρόωσης πλοίων μπορούμε να αναφέρουμε ως **πλεονεκτήματα**:

1) Για τον **ατμοστρόβιλο**:

- α) την απλούστερη και ευκολότερη συντήρηση,
- β) το μικρότερο αρχικό κόστος,
- γ) τη χρήση φθηνού καυσίμου (μαζούτ).

2) Για τον **κινητήρα diesel**:

- α) καλύτερος βαθμός απόδοσης,
- β) καλύτερη σχέση βάρους-ισχύος,
- γ) μικρότερο όγκο της προωστήριας εγκατάστασης, και
- δ) άμεση ετοιμότητα λειτουργίας.

3) Για την **ηλεκτροπρόωση**:

Τον πλήρη εξηλεκτρισμός του πλοίου, όπου όλα τα συστήματα χρησιμοποιούν ρεύμα για τη λειτουργία τους.

Πριν αναφερθούμε στους διάφορους τύπους καυσίμων για ναυτικές μηχανές, πρέπει να επισημανθεί ότι σήμερα υπάρχει πολύ μεγάλη ποικιλία καυσίμων για ναυτικές πετρελαιομηχανές. Επειδή το κόστος ταξιδιού (κυρίως καύσιμα) αποτελεί σήμερα το 40-60% του λειτουργικού κόστους ενός πλοίου είναι φανερό ότι η επιλογή καυσίμου έχει μεγάλη οικονομική σημασία.

Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας 1950-1960 άρχισε να δοκιμάζεται η λειτουργία των πετρελαιομηχανών με μαζούτ και γενικά με καύσιμα που ήταν μείγματα μαζούτ και πετρελαίου diesel, των οποίων το κόστος ήταν πολύ χαμηλότερο από το κόστος του ως τότε χρησιμοποιούμενου πετρελαίου diesel. Οι δοκιμές ήταν ενθαρρυντικές, γιατί οι ποιοτικές απαιτήσεις σε καύσιμο για τις βαριές και αργόστροφες ναυτικές μηχανές μπορούσαν να ικανοποιηθούν και με τα υπολείμματα απόσταξης, δηλαδή με μαζούτ, ώστε το τελευταίο να αποτελέσει το κύριο καύσιμο για τις ναυτικές πετρελαιομηχανές. Υπάρχουν ωστόσο περιπτώσεις που το μαζούτ δεν μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις απαιτήσεις καύσης, όπως συμβαίνει σε περιπτώσεις χειρισμού του πλοίου μέσα στο λιμάνι, όπου απαιτείται γρήγορη προσαρμογή της καύσης στο φορτίο της μηχανής, καθότι μόνο το πετρέλαιο-diesel μπορεί να

ανταποκριθεί ικανοποιητικά. Επίσης ορισμένοι τύποι μηχανών diesel απαιτούν καύσιμο με ορισμένες προδιαγραφές που καθορίζει ο κατασκευαστής. Η επιλογή του κατάλληλου καυσίμου αποτελεί ευθύνη του αρχιμηχανικού της εταιρείας, που ανήκει το πλοίο και εξαρτάται από τους ακόλουθους **παράγοντες**:

- 1) Τύπος και χαρακτηριστικά της μηχανής.
- 2) Κατάσταση της μηχανής και
- 3) Κόστος και διαθεσιμότητα καυσίμων.

Με σκοπό τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, οι προσπάθειες βελτιστοποίησης έχουν επικεντρωθεί στη γεωμετρία της γάστρας του πλοίου, στον εκσυγχρονισμό της κατασκευής, σκοπεύοντας στη μείωση της αντίστασης πρόωσης, στη συνεργασία σκάφους – έλικας και την εξασφάλιση της καθαρότητας των υφάλων με χρήση ειδικών προηγμένων πολυμερών χρωμάτων και τη βελτίωση των μηχανών πρόωσης.

## 8.2 Κατάταξη των ναυτιλιακών καυσίμων

Τα ναυτιλιακά καύσιμα σύμφωνα με το σχετικό πρότυπο ISO 8217 διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1) Στα **αποστάγματα** (distillates), δηλαδή τα κλάσματα του φυσικού πετρελαίου που αποστάζουν συνήθως υπό ατμοσφαιρική πίεση σε θερμοκρασίες 200-360°C. Σ' αυτά ανήκει και το πετρέλαιο diesel (diesel oil ή Gasoil), όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6. Αποτελεί την καλύτερη και ακριβότερη ποιότητα καυσίμου για πετρελαιομηχανές. Προορίζεται για χρήση στις ταχύστροφες πετρελαιομηχανές, που έχουν μικρή σχετικά ιπποδύναμη και απαιτούν καύσιμο με υψηλό βαθμό καθαρότητας και καλή ποιότητα καύσης (υψηλό αριθμό κετανίου). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και στις κοινές ναυτικές μηχανές σε ειδικές περιπτώσεις.

2) Στα **υπολείμματα απόσταξης** (residual oils), δηλαδή τα καύσιμα που παίρνουμε από τη βάση του πύργου απόσταξης, γιατί η απόσταξή τους δεν μπορεί να προχωρήσει πέρα από τους 360°C υπό ατμοσφαιρική πίεση. Σε αυτά ανήκει το μαζούτ, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 7. Διατίθενται στη διεθνή αγορά καυσίμων για την Εμπορική Ναυτιλία (bunkering) στους σταθμούς ανεφοδιασμού πλοίων σε πολύ μεγάλη ποικιλία. Αποτελούν τα κατ'εξοχή καύσιμα των ναυτικών πετρελαιομηχανών και λόγω της χαμηλής ποιότητάς τους έχουν και χαμηλότερη τιμή από τα αποστάγματα (30%-50% φθηνότερα σε σχέση με το πετρέλαιο diesel). Για να χρησιμοποιηθούν όμως σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης απαιτούν διάφορες επεξεργασί-

ες, που εξετάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Στο εμπόριο κυκλοφορούν με το όνομα Heavy Fuel Oil (βαρύ καύσιμο) και η κατάταξή τους σε διάφορες κατηγορίες γίνεται με βάση την τιμή του ιξώδους.

Με βάση τις αλλαγές στη ζήτηση στα καύσιμα μετά τους πρόσφατους κανονισμούς του IMO για τις εκπομπές θείου, τα διυλιστήρια έχουν να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα με το να προμηθεύουν καύσιμα διαφορετικών κατηγοριών ως προς τα παραπάνω. Αυτά τα καύσιμα και οι αντίστοιχες διεργασίες περιγράφονται παρακάτω:

α) **Ανάμιξη μαζούτ με πετρέλαιο diesel.** Η προσθήκη πετρελαίου diesel σε υπολείμματα αποβλέπει κυρίως στη μείωση του ιξώδους και γενικότερα στη βελτίωση της ποιότητας του μαζούτ, αλλά και τη μείωση της περιεκτικότητας σε θείο. Τέτοιο καύσιμο είναι το πετρέλαιο που χρησιμοποιείται στα στροβιλοκίνητα πλοία του πολεμικού ναυτικού, με την ονομασία Navy Special Fuel Oil (NSFO). Τα προβλήματα σταθερότητας και συμβατότητας (compatibility) που προκύπτουν σε τέτοια ανάμιξη περιγράφονται στην παράγραφο 7.2.3.

β) **Καύσιμο προερχόμενο από πυρόλυση ή πυροδιάσπαση** (cracking), δηλαδή από τη θερμική εκείνη κατεργασία με την οποία τα υπολείμματα μετατρέπονται σε ελαφρότερα κλάσματα, μεταξύ των οποίων είναι και η βενζίνη (αναλυτικά βλ. στην § 4.7.3). Με την κατεργασία αυτή, σε ορισμένες περιπτώσεις, εκτός από βενζίνη παράγεται και ένα μείγμα από βαρείς υδρογονάνθρακες, που έχει τα χαρακτηριστικά του μαζούτ. Τα καύσιμα της κατηγορίας αυτής είναι κατώτερης ποιότητας και μετά από προσεκτική επιλογή, επεξεργασία ή ανάμιξη με άλλα καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις ναυτικές μηχανές.

γ) **Καύσιμο προερχόμενο από ιξωδόλυση** (visbreaking), δηλαδή από μια διεργασία **θερμικής πυρόλυσης** η οποία γίνεται για να μειώσει το ιξώδες των βαρέων υπολειμμάτων είτε της ατμοσφαιρικής απόσταξης είτε της απόσταξης υπό κενό. Είναι γνωστό ότι η τιμή ιξώδους του καυσίμου έχει αποφασιστική σημασία για την απόδοσή του σε μία πετρελαιομηχανή. Από μία ορισμένη τιμή ιξώδους και πάνω η χρήση του καυσίμου σε μηχανές diesel είναι προβληματική. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται η **ιξωδόλυση** (μέθοδος visbreaking). Σε αυτήν τροφοδοτούμε το ατμοσφαιρικό υπόλειμμα ή το απόσταγμα υπό κενό μέσα σε ένα ειδικό αντιδραστήρα και γίνεται θέρμανση του καυσίμου στους 450-500°C σε κενό, οπότε επιτελείται διάσπαση των αλυσίδων των μεγάλων μορίων των

υδρογονανθράκων, που βρίσκονται μέσα στο βαρύ καύσιμο. Για την αύξηση της αποδοτικότητας της μεθόδου επιμηκύνεται ο χρόνος παραμονής του καυσίμου στη μονάδα visbreaker οπότε επιτελείται πιο έντονη και εκτεταμένη διάσπαση (more severe cracking). Έτσι καταφέρνουμε να μειώσουμε πολύ την ποσότητα των μέσων αποσταγμάτων για ανάμειξη με τα βαριά υπολείμματα και να επιτευχθεί η παραγωγή καυσίμων τύπου μαζούτ, με πλήρη τήρηση των προδιαγραφών της αγοράς. Με αυτή τη μέθοδο παράγονται τελικά χαμηλής ποιότητας πετρέλαιο diesel και residual oil με μικρότερο ιξώδες, μαζί με αέρια νάφθα.

Ενώ η σχάση των βαριών καυσίμων είναι αποδοτική, προκύπτει ένα άλλο θέμα με την σταθερότητα (stability) των προϊόντων της σχάσης, των υπολειμματικών καυσίμων, γιατί αυτά είναι ασταθή. Πρέπει να εξεταστεί πολλές φορές και η δυνατότητα ανάμειξης των προϊόντων της σχάσης με άλλα καύσιμα, γιατί από την αστάθεια που προκαλείται δημιουργείται λάσπη με προβλήματα στον τελικό χρήστη. Η λάσπη σχηματίζεται από διάσπαση κολλοειδών διασπορών μέσα σε αυτά τα καύσιμα.

Η υποβάθμιση της ποιότητας των καυσίμων ναυτιλίας μετά από επεξεργασία, όπως φαίνεται στον πίνακα 8.1<sup>1</sup>, που δείχνει πώς επηρεάζονται οι ιδιότητες που επεξηγούνται περαιτέρω στην παράγραφο 8.4.

**Πίνακας 8.1**

| Ιδιότητα             | Μετά από πυρόλυση | Μετά από ιξωδόλυση |
|----------------------|-------------------|--------------------|
| Πυκνότητα            | αυξημένη          | αυξημένη           |
| Ανθρακούχο υπόλειμμα | αυξημένο          |                    |
| Σημείο ροής          | χαμηλό            |                    |
| Σταθερότητα          | ανεπαρκής         |                    |
| Σχηματισμός ιζήματος | αυξημένος         |                    |
| Τέφρα                |                   | αυξημένη           |
| Ασφαλτένια           | αυξημένα          |                    |
| Ποιότητα καύσης      | ανεπιθύμητη       | ανεπιθύμητη        |

### 8.3 Ποιοτική κατηγοριοποίηση – πρότυπο ISO 8217

Τα καύσιμα που σήμερα χρησιμοποιεί σε παγκόσμια κλίμακα η Εμπορική Ναυτιλία αποτελούν το

6,1% της συνολικής παραγωγής των διυλιστηρίων και ανέρχονται σε 400 εκατ. τόνους τον χρόνο. Η ποιότητα των καυσίμων αυτών καλύπτει ένα ευρύτατο φάσμα ποιότητας, από το καθαρό πετρέλαιο diesel που διακινείται στη διεθνή αγορά σαν Marine Diesel Oil (MDO) ή Gasoil, έως τα βαρέα καύσιμα από τον χώρο υπολειμμάτων απόσταξης (μαζούτ). Η κατάταξη των καυσίμων αυτών, πλην του πετρελαίου Diesel, γίνεται ως τώρα με βάση την τιμή του ιξώδους.

Συγκεκριμένα, στη Διεθνή Αγορά καυσίμων διακινούνται οι εξής κατηγορίες-ποιότητες καυσίμου.

1) Marine Gas Oil (MGO) ή Marine Diesel Oil (MDO) που είναι απόσταγμα και αντιστοιχεί στο πετρέλαιο diesel.

2) Το μέσο υπόλειμμα απόσταξης (Intermediate Fuel Oil – IFO) με ιξώδες 180 - 380 cSt, γνωστό ως Bunker B και αντιστοιχεί σε μείγμα πετρελαίου diesel και βαρέος καυσίμου.

3) Βαρύ καύσιμο (Heavy Fuel Oil – HFO) με ιξώδες 380-700 cSt, που διακινείται ως Bunker C.

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση παραβλέπει άλλα βασικά χαρακτηριστικά των καυσίμων, όπως η περιεκτικότητα σε θείο και άλλες ξένες προσμείξεις ή συστατικά κ.ά. Έτσι η επιλογή των καυσίμων βασίζεται στην αξιοπιστία των εταιρειών από τις οποίες οι ναυτιλιακές εταιρείες προμηθεύονται τα καύσιμα των πλοίων τους ή στις ευκολίες ή άλλες παροχές που εξασφαλίζουν με τα συμβόλαια προμήθειας καυσίμων. Οι διάφορες εταιρείες καυσίμων παράγουν και προμηθεύουν πετρέλαιο με βάση δικές τους προδιαγραφές και μόνο ο ανταγωνισμός μεταξύ τους εξασφαλίζει την ποιότητα στην περιοχή των βαρέων καυσίμων.

Έτσι προέκυψε η ανάγκη ποιοτικής κατάταξης των καυσίμων για τις ναυτικές πετρελαιομηχανές με βάση διεθνείς προδιαγραφές που έχουν εκπονηθεί με τη συνεργασία διεθνούς κύρους οργανισμών, όπως είναι ο I.S.O. (International Standard Organisation), και που υιοθετούνται σε διεθνές επίπεδο. Για τα καύσιμα ναυτιλίας το πρότυπο ISO 8217 θεωρείται η προδιαγραφή αγοράς, αφού προσδιορίζει απαιτήσεις για τα ναυτιλιακά καύσιμα, όπως αυτά παραδίδονται στο πλοίο και πριν τον κατάλληλο καθαρισμό τους προτού χρησιμοποιηθούν. Η πιο πρόσφατη και αυστηρότερη προδιαγραφή είναι η ISO 8217:2017 (έκδοση 2017), καθώς οι προδιαγραφές ανανεώνονται κάθε 5 έτη. Οι προδιαγραφές αυτές επιδιώκουν να συνδυάσουν δύο επιθυμητούς παράγοντες, που εκ πρώτης όψης είναι

<sup>1</sup> Βασίλη και Δημήτρη Σταματόπουλου, *Καύσιμα Ναυτιλίας*, εκδόσεις ELSSI DRUG TESTING, LTD, Αθήνα, 2018.

διαμετρικά αντίθετοι: το χαμηλό κόστος και την υψηλή ποιότητα. Το αποτέλεσμα της προσπάθειας αυτής, όμως, αφορά σε τρεις άμεσα ενδιαφερομένους φορείς, με διαφορετικά και συχνά αλληλοσυγκρουόμενα συμφέροντα: τους εφοπλιστές, τα διυλιστήρια και τους κατασκευαστές ναυτικών μηχανών.

Τα κύρια φυσικοχημικά χαρακτηριστικά για τις διάφορες κατηγορίες ναυτικών καυσίμων (αποσταγμά-

των και υπολειμμάτων) που περιλαμβάνονται στις διεθνείς αυτές προδιαγραφές [ISO 8217 (έκδοση 2017)] παρατίθενται στους πίνακες 8.2 και 8.3<sup>1</sup>. Οι κατηγορίες με διακριτικά που αρχίζουν από DM αναφέρονται σε αποστάγματα, ενώ οι κατηγορίες με διακριτικά που αρχίζουν από RM αντιστοιχούν σε υπολειμματικά καύσιμα. Το τελευταίο γράμμα του διακριτικού δείχνει την κλάση του καυσίμου.

**Πίνακας 8.2**

**Προδιαγραφές αποσταγμάτων καυσίμων ναυτικών μηχανών κατά το πρότυπο ISO 8217:2017 (Distillate marine fuels) (με γαλάζιο οι αλλαγές ως προς το ISO8217:2012)**

| Ιδιότητα   | Μονάδα             | Όριο | Κατηγορία ISO-F          |       |         |       |         |       | Μέθοδος δοκιμής ή πρότυπο           |                       |
|--|--------------------|------|--------------------------|-------|---------|-------|---------|-------|-------------------------------------|-----------------------|
|  |                    |      | DMX                      | DMA   | DFA     | DMZ   | DFZ     | DMB   |                                     | DFB                   |
| Κινηματικό ιξώδες σε 40°C                                  | mm <sup>2</sup> /s | Max  | 5,5                      | 6,0   |         | 6,0   |         | 11,0  | ISO 3104                            |                       |
|  |                    | Min  | 1,4                      | 2,0   |         | 3,0   |         | 2,0   |                                     |                       |
| Πυκνότητα σε 15°C  | kg/m <sup>3</sup>  | Max  | —                        | 890,0 |         | 890,0 |         | 900,0 | ISO 3575                            |                       |
| Δείκτης Κετανίου   |                    | Min  | 45                       | 40    |         | 40    |         | 35    | ISO 4264                            |                       |
| Θείο   | % w/w              | Max  | 1,0                      | 1,0   |         | 1,0   |         | 1,5   | ISO 8754 ή ISO 14596, ASTM D4294-16 |                       |
| Σημείο ανάφλεξης   | °C                 | Min  | 43,0                     | 60,0  |         | 60,0  |         | 60,0  | ISO 2719                            |                       |
| Υδροθείο   | mg/kg              | Max  | 2,00                     | 2,00  |         | 2,00  |         | 2,00  | IP 570                              |                       |
| Ολικός αριθμός οξέος                                       | mgKOH/g            | Max  | 0,5                      | 0,5   |         | 0,5   |         | 0,5   | ASTM D654                           |                       |
| Ολικό ίζημα με φιλτράρισμα εν θερμώ                        | % w/w              | Max  | —                        | —     |         | —     |         | 0,10  | ISO 10307-1                         |                       |
| Σταθερότητα σε οξειδωση                                    | g/m <sup>3</sup>   | Max  | 25                       | 25    |         | 25    |         | 25    | ISO 12205                           |                       |
| Μεθυλεστέρας λιπαρών οξέων                                 | % v/v              | Max  | —                        | —     | 7,0     | —     | 7,0     | —     | 7,0                                 | ASTM D07963 ή IP 5479 |
| Μέθοδος micro  | % w/w              | Max  | 0,30                     | 0,30  |         | 0,30  |         | 0,30  | ISO 10370                           |                       |
| Σημείο θόλωσης   | χειμώνας           | °C   | Max                      | 16    | αναφορά |       | αναφορά |       | —                                   | ISO 3015              |
|  | καλοκαίρι          | °C   | Max                      | 16    | —       |       | —       |       | —                                   |                       |
| Σημείο απόφραξης ψυχρού φίλτρου (CFPP)                     | χειμώνας           | °C   | Max                      | —     | αναφορά |       | αναφορά |       | —                                   | IP 309 ή IP 612       |
|  | καλοκαίρι          | °C   | Max                      | —     | —       |       | —       |       | —                                   |                       |
| Σημείο ροής (ανώτερο)                                      | χειμώνας           | °C   | Max                      | —     | -6      |       | -6      |       | 0                                   | ISO 3016              |
|  | καλοκαίρι          | °C   | Max                      | —     | 0       |       | 0       |       | 5                                   |                       |
| Εμφάνιση   |                    |      | Διαυγές και ανοιχτόχρωμο |       |         |       |         |       |                                     |                       |
| Νερό   | % v/v              | Max  | —                        | —     |         | —     |         | 0,30  | ISO 3733                            |                       |
| Τέφρα  | % w/w              | Max  | 0,010                    | 0,010 |         | 0,010 |         | 0,010 | ISO 6245                            |                       |
| Διάμετρος αποτυπώματος φθοράς με διόρθωση λίπανσης σε 60°C | μm                 | Max  | 520                      | 520   |         | 520   |         | 520   | ISO 12156-1                         |                       |



**Πίνακας 8.3**  
**Προδιαγραφές υπολειμματικών καυσίμων ναυτικών μηχανών**  
**κατά το πρότυπο ISO 8217:2017 (Residual marine fuels)**

| Ιδιότητα                      | Μονάδα             | Όριο | Κατηγορία ISO-F               |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Μέθοδος δοκιμής ή πρότυπο           |                        |
|-------------------------------|--------------------|------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------|------------------------|
|                               |                    |      | RMA                           | RMB   | RMD   | RME   | RMG   |       |       | RMK   |       |       |                                     |                        |
| Κινηματικό ιξώδες σε 40°C     | mm <sup>2</sup> /s | Max  | 10                            | 30    | 80    | 180   | 180   | 180   | 180   | 380   | 500   | 700   | 700                                 | ISO 3104               |
|                               |                    |      | 10,00                         | 30,00 | 80,00 | 180,0 | 180,0 | 380,0 | 500,0 | 700,0 | 380,0 | 500,0 | 700,0                               |                        |
| Πυκνότητα σε 15°C             | kg/m <sup>3</sup>  | Max  | 920,0                         | 960,0 | 975,0 | 991,0 | 991,0 |       |       |       |       |       | 1010,0                              | ISO 3575 ή 12185       |
| Δείκτης αρωματικότητας (CCAI) |                    | Max  | 850                           | 860   | 860   | 860   | 870   |       |       |       |       |       | 870                                 |                        |
| Θείο                          | % w/w              | Max  | Απαιτήσεις διεθνών κανονισμών |       |       |       |       |       |       |       |       |       | ISO 8754 ή ISO 14596, ASTM D4294:16 |                        |
| Σημείο ανάφλεξης              | °C                 | Min  | 60,0                          | 60,0  | 60,0  | 60,0  | 60,0  |       |       |       |       |       | 60,0                                | ISO 2719               |
| Υδροθείο                      | mg/kg              | Max  | 2,00                          | 2,00  | 2,00  | 2,00  | 2,00  |       |       |       |       |       | 2,00                                | IP 570                 |
| Ολικός αριθμός οξέος          | mgKOH/g            | Max  | 2,5                           | 2,5   | 2,5   | 2,5   | 2,5   |       |       |       |       |       | 2,5                                 | ASTM D664              |
| Ολικό ίζημα - με παλαιοση     | % w/w              | Max  | 0,10                          | 0,10  | 0,10  | 0,10  | 0,10  |       |       |       |       |       | 0,10                                | ISO 10307-2            |
| Μέθοδος micro                 | % w/w              | Max  | 2,50                          | 10,00 | 14,00 | 15,00 | 18,00 |       |       |       |       |       | 20,00                               | ISO 10370              |
| Σημείο ροής (ανώτερο)         | Χειμώνας           | Max  | 0                             | 0     | 30    | 30    | 30    |       |       |       |       |       | 30                                  | ISO 3016               |
|                               | καλοκαίρι          | Max  | 6                             | 6     | 30    | 30    | 30    |       |       |       |       |       | 30                                  |                        |
| Νερό                          | % v/v              | Max  | 0,30                          | 0,50  | 0,50  | 0,50  | 0,50  |       |       |       |       |       | 0,50                                | ISO 3733               |
| Τέφρα                         | % w/w              | Max  | 0,040                         | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,100 |       |       |       |       |       | 0,150                               | ISO 6245               |
| Βανάδιο                       | mg/kg              | Max  | 50                            | 150   | 150   | 150   | 350   |       |       |       |       |       | 450                                 | IP 501, IP 470 ή 14597 |

## 8.4 Σημασία των προδιαγραφών

Οι τιμές των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών για τις διάφορες κατηγορίες καυσίμων, που καθορίζουν οι πίνακες προδιαγραφών 8.2 και 8.3 υπαγορεύονται από τη σημασία που έχουν τα χαρακτηριστικά αυτά για την ποιότητα των καυσίμων.

Ειδικότερα:

1) **Πυκνότητα**. Θερμοκρασία αναφοράς για την πυκνότητα είναι 15°C. Η οριακή τιμή 991 kg/m<sup>3</sup> υπαγορεύεται από τη δυνατότητα αποχωρισμού του νερού που περιέχεται στο πετρέλαιο με τους διάφορους φυγοκεντρικούς καθαριστές. Για καύσιμα με ειδικό βάρος πάνω από 991 kg/m<sup>3</sup> η απομάκρυνση του νερού με φυγοκέντρωση δεν είναι δυνατή. Για την κατηγορία RMK η πυκνότητα υπερβαίνει την παραπάνω οριακή τιμή γιατί το καύσιμο αυτό προορίζεται για εφαρμογές που δεν απαιτούν φυγοκεντρικό καθαρισμό.

2) **Ιξώδες**. Θερμοκρασία αναφοράς για το ιξώδες είναι οι 40°C για MDO και MGO, ενώ είναι 50°C για IFO και HFO. Η τιμή του έχει ιδιαίτερη σημασία για τον καθορισμό της θερμοκρασίας προθέρμανσης, που εξασφαλίζει τον επιθυμητό βαθμό ψεκασμού, ώστε η καύση από την άποψη αυτή να μην παρουσιάζει προβλήματα. Η θερμοκρασία προθέρμανσης βρίσκεται από διαγράμματα ιξώδους/θερμοκρασίας, όπως περιγράφονται στην παράγραφο 8.5.2.

3) **Σημείο ροής**. Δηλώνει τη χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία το καύσιμο ρέει. Κάτω από αυτήν την θερμοκρασία, που προδιαγράφονται για κάθε κατηγορία καυσίμων, η ροή είναι πολύ δύσκολη ακόμα και αδύνατη. Η πρακτική σημασία του σημείου ροής είναι μεγαλύτερη για το πετρέλαιο diesel, καθώς το καύσιμο αυτό δεν προθερμαίνεται πριν από την εισαγωγή στον κινητήρα. Γενικά οι απαιτήσεις είναι αυστηρότερες για την περίοδο Οκτώβριο έως Μάιο λόγω των μειωμένων θερμοκρασιών περιβάλλοντος που επικρατούν στο Βόρειο ημισφαίριο εκείνη την περίοδο.

4) **Τέφρα** (ash). Οφείλεται στα ανόργανα στερεά συστατικά που περιέχονται στο φυσικό πετρέλαιο και παραμένουν μέσα στα υπολειμματικά καύσιμα (μαζούτ) μετά τη διαδικασία της απόσταξης. Μπορεί επίσης να εισέλθουν στο καύσιμο κατά τα διάφορα στάδια επεξεργασίας και μεταφοράς. Συνήθως αποτελούνται από βανάδιο, νάτριο, νικέλιο, πυρίτιο και αλουμίνιο. Για μερικά από αυτά (βανάδιο, αλουμίνιο) καθορίζονται επί μέρους ανώτατα όρια.

5) **Αριθμός κετανίου**. Έχει ιδιαίτερη σημασία μόνο για τις κατηγορίες MDO και MGO, δηλαδή για αποστάγματα πετρελαίου diesel που προορίζονται για ταχύστροφες πετρελαιομηχανές, στις οποίες ο αριθμός κετανίου καθορίζει την ποιότητα καύσης. Για τα υπολειμματικά καύσιμα (IFO και HFO) που προορίζονται για αργόστροφες μηχανές, οι απαιτήσεις για αριθμό κετανίου είναι γενικά πολύ χαμηλές (CN = 20) και καλύπτονται άνετα από τα καύσιμα αυτά.

6) **Εξανθράκωμα** (carbon residue). Δηλώνει τις ανθρακούχες ενώσεις που θα σχηματιστούν μέσα στον κύλινδρο κατά τη διάρκεια της καύσης. Οι ενώσεις αυτές σχηματίζονται, καθώς οι πιο βαριοί υδρογονάνθρακες στο καύσιμο δεν οξειδώνονται, αλλά θερμοδιασπώνται και επικαθίζουν σε επιφάνειες μέσα στον κύλινδρο και στις βαλβίδες. Καύσιμα με υψηλό εξανθράκωμα είναι ανεπιθύμητα, καθώς προκαλούν σημαντική φθορά στους αεραγωγούς των μηχανών, και κυρίως στους λέβητές και τους στροβιλούπερπληρωτές. Το εξανθράκωμα αποτελεί έναν χρήσιμο δείκτη, αλλά όχι κρίσιμο.

7) **Ολικό ίζημα** (total sediment). Αυτό δείχνει τα συνολικά αδιάλυτα υπολείμματα στο καύσιμο που όμως δεν προέρχονται από το καύσιμο. Τέτοια είναι η άμμος, οι στερεοί ρύποι και η σκουριά. Το ίζημα αποτελεί ένδειξη της σταθερότητας του καυσίμου και γι' αυτό είναι ένας σημαντικός δείκτης. Μεγάλες τιμές θα προκαλέσουν απώλεια της σταθερότητας.

8) **Νερό**. Το νερό συνυπάρχει με το φυσικό πετρέλαιο. Επομένως δεν μπορεί να γίνει πλήρης διαχωρισμός στον πύργο απόσταξης. Μετά το διυλιστήριο μπορεί να βρεθεί μέσα στο καύσιμο στις διεργασίες επεξεργασίας του ή μέσω διαρροών στο σύστημα διανομής του και στο σύστημα θέρμανσης δεξαμενών με ατμό.

9) **Σημείο ανάφλεξης** (flash point). Είναι δείκτης ασφαλείας στη μεταφορά/διακίνηση και αποθήκευση των καυσίμων. Δηλώνει άμεσα τη χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία το καύσιμο αναφλέγεται (ξεκινά δηλ. την καύση του) όταν βρεθεί κοντά σε πηγή ανάφλεξης, όπως φλόγα ή θερμή επιφάνεια, και ξανασβήνει (σταματά την καύση του) κατά την απομάκρυνση της πηγής ανάφλεξης.

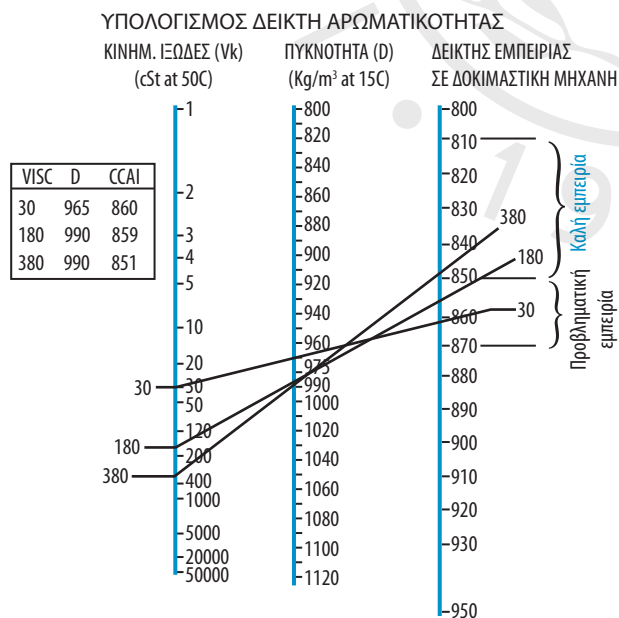
10) **Δείκτης αρωματικότητας** (CCAI). Είναι ένας εμπειρικός δείκτης της ποιότητας καύσης ενός καυσίμου. Επειδή η ποιότητα καύσης σχετίζεται με την καθυστέρηση ανάφλεξης κι αυτή συσχετίζεται με την αρωματικότητα του καυσίμου, οδηγούμαστε στην αρωματικότητα. Εξ ορισμού, η αρωματικότητα απο-

τελεί ένδειξη της περιεκτικότητας του καυσίμου σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Επειδή δεν μπορεί να μετρηθεί εύκολα, έχει προταθεί υπολογιστική σχέση που συσχετίζει την αρωματικότητα με άμεσα μετρούμενα μεγέθη του καυσίμου, όπως την πυκνότητα και το ιξώδες. Ο δείκτης CCAI μπορεί να υπολογιστεί γραφικά από το νομογράφημα του σχήματος 8.1 με βάση την πυκνότητα και το ιξώδες του καυσίμου.

Το νομογράφημα του σχήματος 8.1 είναι ενδεικτικό και μπορεί να πάρει διαφορετική μορφή ανάλογα με την κατηγορία καυσίμου και την περιεκτικότητα σε θείο.

Η κατάταξη των ναυτιλιακών καυσίμων με βάση τον δείκτη αρωματικότητας CCAI παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.4. Όταν η τιμή του δείκτη CCAI υπερβαίνει το 850-870 χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή διότι θα έχουμε επιβράδυνση της ανάφλεξης, υποβάθμιση της ποιότητας ανάφλεξης με συνέπεια την μείωση της ισχύος, τη θορυβώδη λειτουργία και την υψηλή πίεση στη μηχανή. Ο συνδυασμός μικρού ιξώδους και υψηλής πυκνότητας αυξάνει το δείκτη CCAI στα καύσιμα.

11) **Βανάδιο – Νάτριο.** Το νάτριο υπό μορφή αλάτων βρίσκεται στο θαλασσινό νερό που συνυπάρχει με το φυσικό πετρέλαιο πριν την εξόρυξή του. Όμοια και το βανάδιο συνυπάρχει με το φυσικό πετρέλαιο. Ένα μέρος από την ποσότητα νατρίου απομακρύνεται με την αφαλάτωση του φυσικού πετρελαίου. Από



Σχ. 8.1

Νομογράφημα υπολογισμού του Δείκτη CCAI από πυκνότητα και ιξώδες.

**Πίνακας 8.4**  
**Κατάταξη ναυτιλιακών καυσίμων με βάση τον δείκτη αρωματικότητας**

| Δείκτης CCAI | Ποιότητα ανάφλεξης     |
|--------------|------------------------|
| 790–830      | Πολύ καλή έως καλή     |
| 830–850      | Καλή έως ικανοποιητική |
| 850–870      | Μέτρια έως κακή        |
| 870–950      | Κακή έως μη αποδεκτή   |

την άλλη, το βανάδιο δεν μπορεί να διαχωριστεί από το φυσικό πετρέλαιο και έτσι όλη η ποσότητά του οδηγείται προς τα υπολειμματικά καύσιμα κατά τη διύλιση του φυσικού πετρελαίου.

### 8.5 Η χρήση χαμηλής ποιότητας καυσίμου στις μηχανές diesel

Τα 80% περίπου του καυσίμου που χρησιμοποιείται σήμερα στις ναυτικές πετρελαιομηχανές προέρχεται από υπολείμματα απόσταξης, δηλαδή από μαζούτ, το οποίο διακινείται με το γενικό τύπο Marine Fuel Oils (MFO). Ο λόγος είναι φυσικά το χαμηλό κόστος των καυσίμων αυτών σε σχέση με το πετρέλαιο diesel.

Η μετάπτωση από πετρέλαιο Diesel σε μαζούτ συνοδεύεται από πολλά προβλήματα λειτουργίας των ναυτικών μηχανών που έπρεπε να αντιμετωπισθούν τόσο από τους κατασκευαστές των μηχανών όσο και από τους πλοιοκτήτες/ναυτιλιακές εταιρείες. Τα προβλήματα αυτά οφείλονται στη χαμηλή ποιότητα του μαζούτ σε σύγκριση με το πετρέλαιο diesel, σε όλη την έκταση των φυσικοχημικών τους χαρακτηριστικών, και αντιμετωπίζονται με δύο τρόπους:

1) **Κατασκευαστικός τρόπος.** Οι σύγχρονες ναυτικές πετρελαιομηχανές είναι γενικά αργόστροφες και με μεγάλη ιπποδύναμη, εξοπλισμένες με σύστημα έντονου καθαρισμού και επεξεργασίας των καυσίμων, ώστε οι δυσμενείς επιδράσεις από τη χαμηλή ποιότητα των καυσίμων να περιορίζονται στο ελάχιστο.

2) **Λειτουργικός τρόπος.** Περιλαμβάνουν σειρά μέτρων που εκμηδενίζουν τα προβλήματα από την ποιότητα του καυσίμου, τα σημαντικότερα απ' τα οποία περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

#### 8.5.1 Σύστημα καθαρισμού

Ξένες ύλες, πέρα από ορισμένο όριο, μετατρέπονται κατά την καύση σε αποθέσεις, που ρυπαίνουν κρίσιμα μέρη της μηχανής, όπως τις βαλβίδες, τα χιτώνια,

το έμβολο και τα ελατήρια, με συνέπεια τη γρήγορη φθορά τους. Επιβάλλεται λοιπόν προσεκτικός καθαρισμός του καυσίμου, προτού οδηγηθεί στη μηχανή. Τα πλοία διαθέτουν ειδικά συστήματα καθαρισμού των καυσίμων χαμηλής ποιότητας, που περιλαμβάνουν:

1) Φυγοκεντρικά καθαριστήρια που διακρίνονται σε:

α) **Καθαριστές** (purifiers) οι οποίοι συγκρατούν το νερό και τα μεγαλύτερα ξένα σωματίδια.

β) **Διαυγαστές** (clarifiers), οι οποίοι αφαιρούν τα μικρότερα ξένα σωματίδια, και κυρίως τα ασφαλικά συσσωματώματα του πετρελαίου.

Τα φυγοκεντρικά καθαριστήρια λειτουργούν συνεχώς και αυτοκαθαρίζονται, ώστε να απαιτούν μικρή επίβλεψη και ελάχιστο προσωπικό.

2) **Φίλτρα**, που συμπληρώνουν τον καθαρισμό συγκρατώντας λεπτότατα σωματίδια που διαφεύγουν από το φυγοκεντρικό καθαρισμό.

Το δίκτυο του καυσίμου με τα συστήματα καθαρισμού του περιγράφεται στην παράγραφο 8.7.

### 8.5.2 Ιξώδες

Το ιξώδες των υπολειμματικών καυσίμων είναι γενικά πολύ υψηλό. Επομένως για να χρησιμοποιηθεί σε πετρελαιομηχανές πρέπει η τιμή του να ελαττωθεί προκειμένου να μπορέσουν να γίνουν οι ακόλουθες διεργασίες πάνω στο πλοίο:

1) Αντληση από τις δεξαμενές καυσίμων, με απαιτούμενο ιξώδες μέσα στην περιοχή 750-1000 cSt κατά μέγιστο.

2) Φυγοκεντρικός καθαρισμός, με απαιτούμενο ιξώδες 15 – 50 cSt.

3) Ικανοποιητικός διασκορπισμός στον ψεκασμό, που αποτελεί βασική προϋπόθεση για καλή καύση, με απαιτούμενο ιξώδες 10 – 18 cSt για μηχανές diesel και 15 – 28 cSt για καυστήρες λεβήτων.

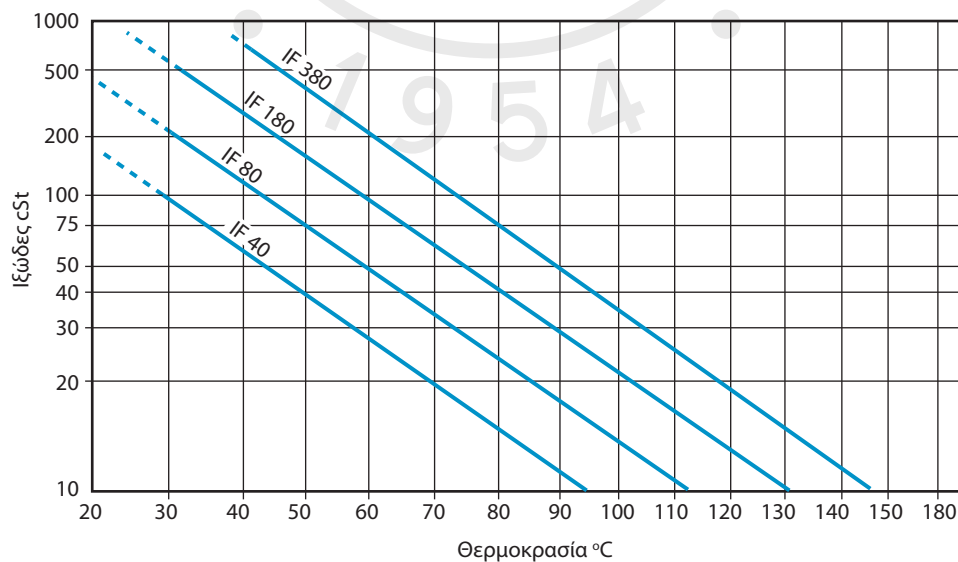
Έξω από τα όρια αυτά των τιμών ιξώδους θα υπάρχουν τα αντίστοιχα προβλήματα ψεκασμού ή αντλητικότητας. Πρέπει να τονισθεί ότι προθέρμανση πάνω από τα όρια αυτά (υπερθέρμανση) προκαλεί τα εξής ανεπιθύμητα αποτελέσματα:

1) **Ατμόφραξη των αντλιών** από τη δημιουργία ατμών λόγω εξάτμισης/βρασμού του καυσίμου.

2) **Πυροδιάσπαση του καυσίμου**, που προκαλεί αύξηση των εξανθρακωμάτων, ιδίως στα βαριά καύσιμα.

Αν η προθέρμανση στα θερμοκρασιακά όρια που επιτρέπονται δεν μειώνει το ιξώδες στις επιθυμητές τιμές, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν χημικά πρόσθετα που περιορίζουν τα εξανθρακώματα, μειώνουν τη θερμοκρασία των καυσαερίων και εξασφαλίζουν καλύτερη λίπανση για την αποφυγή του κολλήματος των ελατηρίων.

Για τον ακριβή καθορισμό της θερμοκρασίας προθέρμανσης χρησιμοποιούνται πίνακες ή διαγράμματα που δίνουν τις σχέσεις ιξώδους-θερμοκρασίας για τα διάφορα είδη καυσίμων, και επιτρέπουν έτσι τον καθορισμό της θερμοκρασίας, στην οποία το κάθε καύσιμο αποκτά το επιθυμητό ιξώδες. Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 8.2.



Σχ. 8.2

Διάγραμμα ιξώδους θερμοκρασίας υπολειμματικών καυσίμων



### Παράδειγμα

Για τύπους καυσίμου IF40, IF80, IF180 και IF380, χρησιμοποιείται το διάγραμμα του σχήματος 8.2 για τον καθορισμό προθέρμανσης για ικανοποιητική αντλητικότητα, αποτελεσματικό φυγοκεντρικό καθαρισμό και ικανοποιητικό ψεκασμό. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 8.5.

**Πίνακας 8.5**  
**Θερμοκρασίες προθέρμανσης**  
**υπολειμματικών καυσίμων πετρελαιομηχανών**

| Καύσιμο | Θερμοκρασία προθέρμανσης (°C) |                  |                              |
|---------|-------------------------------|------------------|------------------------------|
|         | Για αντλητικότητα             | Για φυγοκέντριση | Για ψεκασμό σε μηχανή Diesel |
| IF40    | Δεν απαιτείται                | 43 - 82          | 74 - 95                      |
| IF80    | Δεν απαιτείται                | 60 - 99          | 90 - 113                     |
| IF180   | 20 - 28                       | 75 - 118         | 108 - 131                    |
| IF380   | 35 - 40                       | 90 - 133         | 123 - 148                    |

Για τη διατήρηση σταθερής τιμής ιξώδους τοποθετούνται στο δίκτυο του καυσίμου ειδικές διατάξεις που είναι διεθνώς γνωστές ως ρυθμιστές ιξώδους viscorators. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην αρχή ότι το ιξώδες βρίσκεται σε άμεση σχέση με την πίεση του καυσίμου. Μείωση του ιξώδους λόγω θέρμανσης προκαλεί αντίστοιχη μείωση της πίεσης, που επενεργεί αυτόματα στην παροχή ατμού στον προθερμαντήρα, ώστε τελικά η θερμοκρασία να διατηρείται εντός των ορίων που εξασφαλίζουν το επιθυμητό ιξώδες.

### 8.5.3 Ποιότητα καύσης (αριθμός κετανίου)

Το βαρύ πετρέλαιο που προέρχεται κυρίως από υπόλειμμα απόσταξης (μαζούτ) έχει πολύ χαμηλό αριθμό κετανίου (20-30), επομένως εκτός των άλλων είναι ακατάλληλο για ταχύστροφες πετρελαιομηχανές, που απαιτούν αριθμό κετανίου πάνω από 45. Το βαρύ καύσιμο είναι κατάλληλο μόνο για αργόστροφες πετρελαιομηχανές, όπως είναι κατ' εξοχή οι πρωσθήριες μηχανές των πλοίων, όπου οι απαιτήσεις σε **κετάνια** είναι περιορισμένες.

Αυτό εξηγείται εύκολα από τη σημασία που έχει ο αριθμός κετανίου για την ποιότητα καύσης του πετρελαίου, που προορίζεται για τις MEK, και ειδικότερα για την καθυστέρηση ανάφλεξης με την οποία συνδέεται (βλ. § 6.2). Όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής της

μηχανής, τόσο ο χρόνος που το πετρέλαιο έχει στη διάθεσή του για την καύση είναι μικρότερος. Σε πετρελαιομηχανές με 1.000 rpm ο διαθέσιμος χρόνος για την καύση είναι το 20% του χρόνου που διατίθεται σε μηχανές που λειτουργούν στα 200 rpm. Είναι επομένως αμφίβολο αν το καύσιμο που καίγεται ικανοποιητικά στην αργόστροφη μηχανή των 200 rpm και που μπορεί να είναι μαζούτ, θα μπορεί να καίγεται το ίδιο ικανοποιητικά στην ταχύστροφη μηχανή των 1.000 rpm. Βέβαιο είναι, ότι είναι εντελώς ακατάλληλο για μηχανές με ακόμα μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής, όπου απαιτούνται καύσιμα με μικρότερη καθυστέρηση ανάφλεξης, δηλαδή με περισσότερα **κετάνια**.

Πάντως και στις αργόστροφες μηχανές, όταν εργάζονται με χαμηλό φορτίο, τα βαριά καύσιμα με τα λίγα κετάνια δημιουργούν προβλήματα, που οφείλονται στον ανεπαρκή χρόνο για την ανάφλεξη, ιδίως κατά την εκκίνηση της μηχανής. Μία λύση για τα προβλήματα αυτά είναι η προθέρμανση του αέρα σε θερμοκρασία γύρω στους 70°C.

### 8.5.4 Μεταλλικές προσμείξεις

Προέρχονται από τρεις πηγές:

1) Από το γαιώδες περιβάλλον των πετρελαιοπηγών από τις οποίες αντλείται το φυσικό πετρέλαιο (βανάδιο, νάτριο και άλλα μέταλλα).

2) Από τα διάφορα στάδια επεξεργασίας του πετρελαίου και κυρίως από τους καταλύτες που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες φάσεις της επεξεργασίας (αλουμίνιο και πυρίτιο).

3) Από τη διακίνηση του πετρελαίου (σίδηρος, πυρίτιο).

Η παρουσία των προσμείξεων αυτών στο καύσιμο των πετρελαιομηχανών είναι εξαιρετικά επιβλαβής, όταν η περιεκτικότητά τους υπερβαίνει ορισμένα όρια, που καθορίζουν οι αντίστοιχες προδιαγραφές που προαναφέρθηκαν.

Δρουν κατά δυο τρόπους, **πρώτον** προκαλούν διαβρώσεις στα μέρη της μηχανής όπου αποτίθενται και **δεύτερον** προκαλούν μηχανικές φθορές λόγω τριβών.

Οι σπουδαιότερες από τις μεταλλικές προσμείξεις και η σημασία τους είναι οι ακόλουθες:

1) Το **βανάδιο** και το **νάτριο** είναι μέταλλα που προέρχονται από το φυσικό πετρέλαιο και φυσικά παραμένουν στα βαριά καύσιμα, που είναι υπόλειμμα απόσταξης, ενώ σχεδόν απουσιάζουν από όλα τα αποστάγματα, όπως είναι το πετρέλαιο diesel ή περιέχονται σε ανεκτές αναλογίες.

Ο συνδυασμός των δύο αυτών μετάλλων αποτελεί μία χημική ένωση, που ονομάζεται **βαναδικό νάτριο**,

με έντονη διαβρωτική επίδραση, ιδίως στις βαλβίδες εξαγωγής, όπου αποτίθεται, τις οποίες βαθμιαία καταστρέφουν. Σ' αυτό συμβάλλει κυρίως και το γεγονός ότι το βαναδικό νάτριο είναι σχετικά εύτηκτο με σημείο τήξης 550°C. Έτσι στη θερμοκρασία των καυσαερίων λειώνει και αποτίθεται στις θερμές μεταλλικές επιφάνειες και κυρίως στις έδρες των βαλβίδων με μορφή υαλώδους επικάλυψης και προκαλεί τη διάβρωσή τους.

Ακόμα, από τις υαλώδεις επικαλύψεις δεν είναι δυνατή η καλή εφαρμογή των βαλβίδων στις έδρες τους, οπότε η ψύξη τους είναι ανεπαρκής, πράγμα που επιταχύνει τη δημιουργία μεγαλύτερων αποθέσεων και προκαλεί την ταχύτερη φθορά τους. Επίσης είναι δυνατόν με την πάροδο του χρόνου, μερικές από τις αποθέσεις να σπάζουν, αφήνοντας κενά, μέσα από τα οποία διέρχονται βίαια τα υψηλής πίεσης θερμά καυσαέρια, δημιουργώντας σοβαρές αυλακώσεις πάνω στις βαλβίδες.

Το πρόβλημα που προκαλείται από το βανάδιο αντιμετωπίζεται με τους εξής τρόπους:

α) Σχεδιάζοντας την κατασκευή της μηχανής έτσι, ώστε να εξασφαλίζεται θερμοκρασία των βαλβίδων εξαγωγής κάτω από τους 550°C, που είναι το σημείο τήξης του βαναδικού νατρίου, οπότε η ένωση αυτή παρασύρεται σαν σκόνη με τα καυσαέρια. Αυτό όμως μειώνει τη διαθέσιμη ισχύ της μηχανής, άρα και το βαθμό απόδοσής της.

β) Με ειδική επεξεργασία του πετρελαίου, εκχυλίζοντάς το επανειλημμένα με νερό που παρασύρει το μεγαλύτερο μέρος του νατρίου. Το βανάδιο που απομένει, μετά την καύση, μετατρέπεται σε πεντοξείδιο του βαναδίου ( $V_2O_5$ ) που έχει πολύ ψηλότερο σημείο τήξης (πάνω από 650°C), οπότε παρασύρεται και πάλι από τα καυσαέρια σαν σκόνη χωρίς να επηρεάζει τις βαλβίδες.

γ) Με τη χρήση χημικών προσθέτων που αυξάνουν το σημείο τήξης της τέφρας και κυρίως του βαναδικού νατρίου, οπότε η ένωση αυτή και πάλι παρασύρεται με τα καυσαέρια αφήνοντας τις βαλβίδες άθικτες. Στη διεθνή αγορά κυκλοφορούν πολλά είδη τέτοιων χημικών ιδιοσκευασμάτων με ποικίλες εμπορικές ονομασίες. Πρόκειται για χημικές ενώσεις που αποτελούνται από βάριο, μαγνήσιο, αλουμίνιο, ασβέστιο, πυρίτιο κ.λπ. και που αντιδρούν κατά την καύση με το βανάδιο σχηματίζοντας δύστηκτες χημικές ενώσεις. Η αναλογία των χημικών αυτών προσθέτων καθορίζεται από την ποσότητα του βαναδίου που οφείλεται

στο πετρέλαιο, και συνήθως κυμαίνεται από 10–50% της περιεκτικότητας σε βανάδιο, έτσι ώστε η επιβάρυνση του κόστους του καυσίμου λόγω των χημικών πρόσθετων ανέρχεται σε 0,5–1% της αρχικής τιμής του. Τα περισσότερα από τα προϊόντα αυτά έχουν ως βάση ενώσεις του πυριτίου, που δεσμεύουν το βαναδικό νάτριο, σχηματίζοντας αδρανή προϊόντα που εύκολα απομακρύνονται με τα καυσαέρια.

2) Το **αργίλιο (αλουμίνιο)** και το **πυρίτιο**. Τα δυο αυτά στοιχεία περιέχονται στο πετρέλαιο σε αναλογία που μπορεί να φθάσει μέχρι και 200 ppm (μέρη ανά εκατομμύριο) προερχόμενα από τους καταλύτες που προστίθενται κατά την καταλυτική πυρόλυση ορισμένων πρώτων υλών και παραμένουν στα βαριά κυρίως καύσιμα ακόμη και μετά τα διάφορα στάδια παραγωγής και επεξεργασίας του. Μετά την καύση μετατρέπονται σε πυριτικό αργίλιο, μία χημική ένωση που επειδή έχει μεγάλη σκληρότητα προκαλεί μηχανικές φθορές στα χιτώνια της μηχανής, αλλά και στο σύστημα έγχυσης του καυσίμου. Από τις προδιαγραφές για βαριά καύσιμα καθορίζονται ανώτατα επιτρεπτά όρια για τα στοιχεία αυτά και ειδικότερα για το αλουμίνιο, του οποίου η περιεκτικότητα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 30 ppm.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος των μηχανικών φθορών από τα κατάλοιπα καύσης που περιέχουν αλουμίνιο και πυρίτιο υπάρχουν οι εξής δυνατότητες:

α) Τοποθέτηση ηλεκτροστατικών φίλτρων που συγκρατούν τα παραπάνω στοιχεία

β) Εντονότερος καθαρισμός του καυσίμου με φίλτρα ή φυγοκεντρικούς καθαριστές

γ) Καλύτερη λίπανση των κυλίνδρων με ενισχυμένα λιπαντέλαια.

### 8.5.5 Περιεκτικότητα σε θείο

Το **θείο** (sulphur) αποτελεί χημικό στοιχείο που συνυπάρχει με το φυσικό πετρέλαιο από την εξόρυξή του. Σχεδόν όλη η ποσότητα θείου στο φυσικό πετρέλαιο συγκεντρώνεται στα υπολείμματα της ατμοσφαιρικής απόσταξης. Έτσι η περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων που προορίζονται για ναυτικές πετρελαιομηχανές εξαρτάται από δύο παράγοντες: πρώτον από το είδος του φυσικού πετρελαίου από το οποίο προήλθαν, δηλαδή τη συγκέντρωση θείου στο φυσικό πετρέλαιο (0,5 - 1 % κ.β) και δεύτερον από την απόδοση του φυσικού πετρελαίου σε υπόλειμμα, δηλαδή τη μάζα του υπολείμματος ανά μονάδα μάζας φυσικού

πετρελαίου (μεταξύ 20 και 40%). Έτσι η περιεκτικότητά σε θείο των ναυτικών καυσίμων μπορεί να φθάσει μέχρι 5%.

Το θείο που περιέχεται στα καύσιμα καίγεται για να σχηματίσει διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) στα καυσαέρια. Το αέριο διοξείδιο του θείου είναι όξινο και διαβρωτικό, ενώ όταν βρεθεί στην ατμόσφαιρα προκαλεί το φαινόμενο της όξινης βροχής. Σε περίπτωση που από την καύση σχηματιστεί τριοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_3$ ) η βλαβερή επίδραση της παρουσίας θείου στο καύσιμο μεγαλώνει γιατί αυτό με τους υδρατμούς των καυσαερίων θα μετατραπεί άμεσα σε θειικό οξύ ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Έτσι η παρουσία του θείου στα ναυτιλιακά καύσιμα προκαλεί επιβλαβείς συνέπειες κατ' αρχάς στη μηχανή και μετά στο περιβάλλον.

### 1) Αντιμετώπιση των δυσμενών συνεπειών στη μηχανή

Το θειικό οξύ, που δημιουργείται όπως προαναφέραμε, είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό για τις μεταλλικές επιφάνειες. Αυτό συμπυκνώνεται στα τοιχώματα των κυλίνδρων και γενικά στα εξαρτήματα καύσης, που βρίσκονται σε θερμοκρασία μικρότερη από τη **θερμοκρασία δρόσου του θειικού οξέος** ή **απλά σημείο δρόσου** (acid dew point). Έτσι όσο μειώνεται η θερμοκρασία στις επιφάνειες και τα τοιχώματα, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα οξέος συμπυκνώνεται. Η θερμοκρασία δρόσου του θειικού οξέος αυξάνει όσο αυξάνεται η πίεση στον κύλινδρο. Επιπλέον η παρουσία θειικού οξέος στα καυσαέρια θα επιτείνει τα προβλήματα διάβρωσης στην έξοδο των καυσαερίων και στους λέβητες. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η συμπύκνωση του θειικού οξέος σε ατμοσφαιρική πίεση πραγματοποιείται στους  $140^\circ\text{C}$ .

Εκτός από τις διαβρώσεις παρατηρούνται και μηχανικές φθορές από το συνδυασμό των ενώσεων του θείου με τα ανθρακούχα κατάλοιπα. Ο συνδυασμός αυτός καταλήγει στον σχηματισμό εξαιρετικά σκληρών εναποθέσεων με έντονες αποξεστικές επιδράσεις στα χιτώνια και στα άλλα τριβόμενα μέρη της μηχανής. Μερικές φορές αυτές οι εναποθέσεις εντοπίζονται στην κορυφή του εμβόλου περιορίζοντας έτσι τον χώρο του όγκου. Όταν αυξηθούν πάρα πολύ, θρυμματίζονται, προκαλώντας αποξέσεις στα χιτώνια και τα ελατήρια των εμβόλων ή ακόμα και κόλλημα των ελατηρίων των εμβόλων μέσα στα αυλάκια τους.

Με αυτά τα δεδομένα εφαρμόζονται τα ακόλουθα μέτρα:

α) **Διατήρηση της θερμοκρασίας των χιτωνίων σε σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες**, ώστε να αποφεύγεται η συμπύκνωση των ατμών του θειικού οξέος. Σε ατμώδη κατάσταση το θειικό οξύ είναι σχεδόν ακίνδυνο. Αυτό επιτυγχάνεται διατηρώντας το νερό ψύξης σε θερμοκρασία  $60-70^\circ\text{C}$  που είναι πάνω από το σημείο δρόσου του θειικού οξέος.

Οι θερμοκρασίες αυτές δεν πρέπει να εξασφαλίζονται περιορίζοντας τη ροή του νερού ψύξης, πράγμα που είναι εξαιρετικά επικίνδυνο, αλλά με την κυκλοφορία όλης της ποσότητας του νερού και τη διατήρηση της θερμοκρασίας του σε υψηλά επίπεδα με την επανακυκλοφορία του ή με άλλους τρόπους.

Σχεδόν όλες οι σύγχρονες πετρελαιομηχανές χρησιμοποιούν κλειστό σύστημα ψύξης των χιτωνίων με γλυκό νερό, του οποίου η θερμοκρασία εύκολα μπορεί να ρυθμιστεί στα επιθυμητά επίπεδα. Ικανοποιητική θεωρείται αν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας  $10^\circ\text{C}$  του νερού ψύξης ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του. Έτσι μειώνεται επίσης ο κίνδυνος ρωγμών στα πώματα των κυλίνδρων και στα χιτώνια.

β) **Υλικά κατασκευής**. Ορισμένα εξαρτήματα και κυρίως τα χιτώνια κατασκευάζονται από υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση, όπως είναι τα κράματα χυτοσιδήρου που περιέχουν χρώμιο, βανάδιο, τιτάνιο κ.λπ. Η επιχρωμίσωση των χιτωνίων, αλλά και του προσώπου των εμβόλων, εφαρμόζεται σήμερα σε ευρύτατη κλίμακα με άριστα αποτελέσματα. Το υψηλό κόστος κατασκευής αυτών των μηχανών αντισταθμίζεται από τη μείωση των φθορών, που αυξάνει σημαντικά το χρονικό όριο της ανάγκης επισκευής αυτών των μηχανών ή ακόμα και της ζωής τους.

### 2) Αντιμετώπιση των δυσμενών συνεπειών στο περιβάλλον

Η ναυτιλία συνεισφέρει περίπου στο 10% των συνολικών εκπομπών οξειδίων θείου από ανθρώπινες δραστηριότητες. Ο IMO (Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός) μέσω της MARPOL (Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τα πλοία) ορίζει το ανώτατο επιτρεπτό επίπεδο οξειδίων του θείου, που εκπέμπεται από τα πλοία. Στόχος είναι ο περιορισμός των εκπομπών οξειδίων του θείου για το 2025 στο 25% των εκπομπών του 2019. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

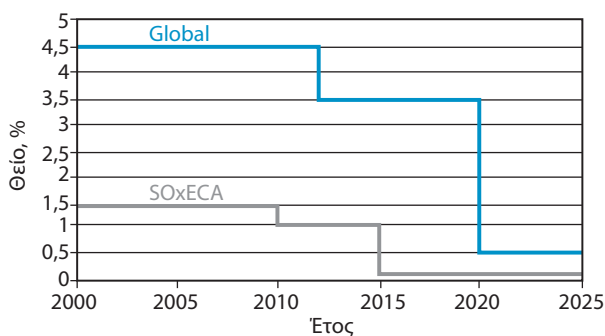
α) **Χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο**. Οι παραπάνω φορείς έχουν λάβει συγκεκριμένα μέτρα σχετικά με την πρόληψη μόλυνσης από το καύσιμο και τον έλεγχο μόλυνσης από επιβλαβείς

ουσίες, όπως είναι οι ρύποι πλοίων που περιλαμβάνουν τα οξειδία του θείου. Για τον σκοπό αυτό έχουν οροθετηθεί ορισμένες ειδικές περιοχές ελέγχου εκπομπών ρύπων (ECA), στις οποίες, για τεχνικούς λόγους σχετικούς με ωκεανογραφικά και οικολογικά στοιχεία, αλλά και με την κατάσταση των πλοίων που διέρχονται από αυτά, έχουν υιοθετηθεί ειδικές μέθοδοι πρόληψης της μόλυνσης.

Αυτές οι περιοχές φέρουν μεγαλύτερο επίπεδο προστασίας από τις υπόλοιπες και είναι θαλάσσιες περιοχές με τους λιμένες τους, στις οποίες υφίστανται περιορισμοί αναφορικά με την εκπομπή αέριων ρύπων, κυρίως οξειδίων του θείου. Οι πιο σημαντικές περιοχές είναι η Βαλτική θάλασσα, η Βόρεια θάλασσα και οι ακτές των ΗΠΑ.

Στο σχήμα 8.3 φαίνεται το όριο των εκπομπών οξειδίων του θείου, μέσω της περιεκτικότητας σε θείο, όπως διαμορφώνεται από τις διεθνείς συμφωνίες.

Από το σχήμα 8.3 παρουσιάζεται ότι στις αρχές του 2000 η διαφορά των ορίων ανάμεσα στις ελεύθερες περιοχές, παγκοσμίως, και τις ελεγχόμενες περιοχές, ECA, ήταν στο 3%. Ενώ τα επιτρεπτά όρια μειώνονται στο διάστημα μέχρι το 2020, εν τούτοις η διαφορά διατηρείται στα επίπεδα του 3–3,5%. Όμως την 1/1/2020 στις ελεύθερες περιοχές το ανώτατο επιτρεπτό όριο εκπομπών οξειδίων του θείου κατέβηκε στο 0,5% από 3,5%, ενώ στις περιοχές ECA παρέμεινε στο 0,1%, δηλαδή στο επίπεδο που ορίστηκε από το 2015. Το νέο χαμηλό όριο περιεκτικότητας καυσίμων σε θείο είναι μέρος της προσπάθειας των αρμόδιων διεθνών φορέων να αμβλύνουν τις διαφορές ανάμεσα στις δυο περιοχές και να μειώσουν όσο το δυνατόν τις επιπτώσεις των πλοίων στο περιβάλλον και την κλιματική αλλαγή. Επίσης, με την εξομάλυνση των ορίων ανάμεσα στις δυο περιοχές δίνεται η δυνατότητα στα πλοία να εφαρμόσουν ενοποιημένο σύστημα καυσίμων, ανε-



Σχ. 8.3

Ανώτατα επιτρεπτά όρια περιεκτικότητας καυσίμου σε θείο σε παγκόσμιο επίπεδο και στις περιοχές ελέγχου εκπομπών ρύπων

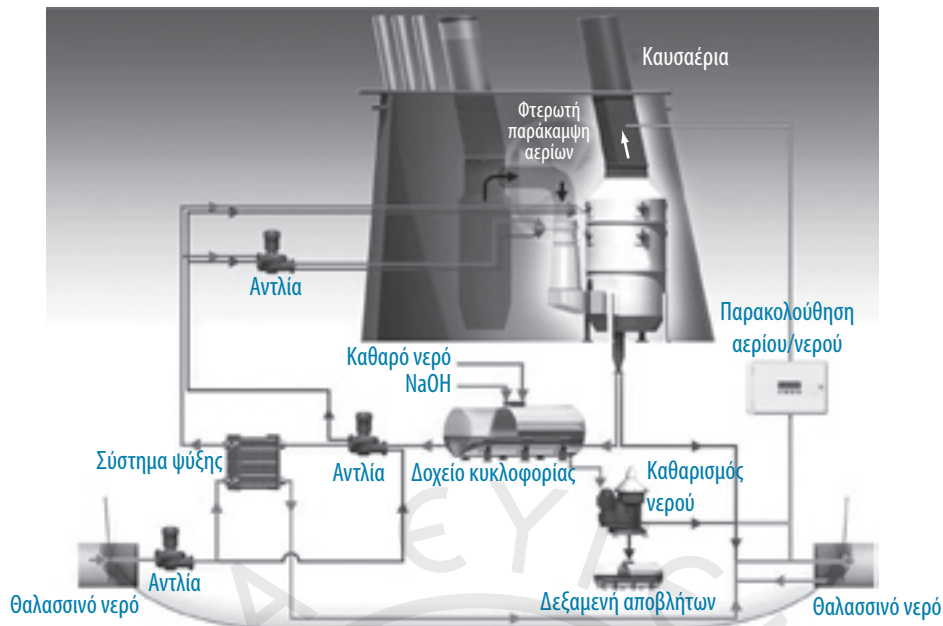
ξάρτητα με την περιοχή στην οποία ταξιδεύουν, και έτσι να ελαττώσουν τις οικονομικές επιπτώσεις, που μπορεί να υπάρξουν από την υιοθέτηση υβριδικών συστημάτων καυσίμων.

Παρ' όλες τις προσπάθειες των διεθνών οργανισμών, υπάρχουν ακόμη περιοχές όπου τα επιτρεπόμενα όρια είναι ακόμα πιο χαμηλά. Έτσι είναι δύσκολη η επιβολή ενός ενιαίου κανονιστικού πλαισίου που θα εξυπηρετούσε όλους τους παράγοντες της παγκόσμιας ναυτιλίας.

β) **Χρήση τεχνολογικών λύσεων για τη μείωση των εκπομπών βλαβερών ρύπων οξειδίων του θείου στον κλάδο της ναυτιλίας.** Μια από τις πιο διαδομένες λύσεις στην αντιμετώπιση της μόλυνσης της ατμόσφαιρας από επιβλαβή αέρια, όπως είναι τα οξειδία του θείου (SOx), είναι το σύστημα πλυντρίδων (scrubbers). Η αρχή λειτουργίας των πλυντρίδων βασίζεται στην αφαίρεση από τα παραγόμενα αέρια των επικίνδυνων σωματιδίων, που μπορούν να μολύνουν τον αέρα και να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία. Η αφαίρεση των επικίνδυνων ουσιών γίνεται με φυσικές ή χημικές μεθόδους. Τα συστήματα πλυντρίδων αποτελούν την κυρίαρχη μέθοδο καταπολέμησης αερίων, ειδικότερα εκείνων με μεγάλη οξύτητα και μολυσματική ικανότητα. Επειδή με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται και ο περιορισμός του διοξειδίου του θείου από τα καυσαέρια στις ναυτικές μηχανές, το σύστημα πλυντρίδων ονομάζεται και συσκευή **αποθείωσης καυσαερίων**.

Το σχήμα 8.4 παρουσιάζει τον τρόπο λειτουργίας της συσκευής αποθείωσης καυσαερίων σε ένα πλοίο. Όπως φαίνεται στο σχήμα, το σύστημα πλυντρίδων δεν εφαρμόζεται στα υγρά καύσιμα, αλλά εγκαθίσταται για να λειτουργήσει αφού γίνει η μετατροπή των καυσίμων σε καυσαέρια. Για τη μελέτη του συστήματος πλυντρίδων περιγράψουμε τη διάταξη από αριστερά προς τα δεξιά. Το βασικό συστατικό στη διεργασία είναι το θαλασσινό νερό, που εισέρχεται σε κατάλληλο μέρος του πλοίου, απ' όπου χρησιμοποιώντας αντλίες οδηγείται προς ένα σύστημα ψύξης. Εκεί γίνεται μέτρηση της ποσότητας νερού που θα μεταβεί στο επόμενο στάδιο, ενώ ταυτόχρονα το υπόλοιπο οδηγείται πίσω στη θάλασσα χωρίς να έχει υποστεί καμία αλλαγή. Στη συνέχεια του συστήματος ψύξης έχει εγκατασταθεί μια αντλία, στην οποία οδηγούνται αφ' ενός το θαλασσινό νερό από το προηγούμενο στάδιο και αφ' ετέρου μείγμα καθαρού νερού και υδροξείδιο του νατρίου (NaOH, καυστική σόδα). Μια τρίτη αντλία προωθεί το μείγμα που προκύπτει από την ανάμειξη





Σχ. 8.4

Σύστημα πλυντρίδων (αποθείωσης καυσαερίων) σε πλοίο (Πηγή: World Maritime News)

των δύο υγρών προς ανώτερα τμήματα του πλοίου, όπου βρίσκεται η εξαγωγή των καυσαερίων από τη μηχανή. Σε αυτό το σημείο το σύστημα αποθείωσης καυσαερίων με τη βοήθεια του μείγματος των χημικών απομακρύνει τα οξείδια του θείου από τα καυσαέρια του πλοίου. Το σύστημα πλυντρίδων περιλαμβάνει δυο εξόδους: η μια φιλτράρει τους υδρατμούς, τους συμπυκνώνει σε νερό και τους οδηγεί προς τη θάλασσα, ενώ η άλλη οδηγεί τους βλαβερούς ρύπους που συγκρατήθηκαν από το σύστημα προς δεξαμενή καθαρισμού. Σ' αυτήν τη δεξαμενή γίνεται ο τελικός διαχωρισμός καθαρού νερού από τους ρύπους του θείου και οι ρύποι συγκεντρώνονται σε μια μικρή δεξαμενή αποβλήτων. Έτσι φαίνεται ότι τα συστήματα αποθείωσης (scrubbers) καταλαμβάνουν αρκετό χώρο πάνω στο πλοίο ώστε να μπορέσουν να λειτουργήσουν με τον κατάλληλο τρόπο.

γ) **Προβλήματα που ανέκυψαν στην εφοδιαστική αλυσίδα από την επιβολή περιορισμών στη συγκέντρωση θείου στα ναυτιλιακά καύσιμα.**

Το επιβαλλόμενο όριο περιεκτικότητας σε θείο (έως 0,5%) στα ναυτιλιακά καύσιμα οδήγησε στο νέο καύσιμο χαμηλού θείου (Low Sulphur FO, LSFO), με συνέπεια μια σειρά θεμάτων για το κόστος (υψηλότερη τιμή ως προς το παραδοσιακό HSFO λόγω διαδικασιών αποθείωσης), την επάρκεια και την ασφάλεια. Τα διυλιστήρια θα πρέπει να παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες LSFO και κατάλληλες παρεμβάσεις να γίνουν

στις μηχανές, προκειμένου να δέχονται το νέο καύσιμο χωρίς προβλήματα. Η ανάμειξη καυσίμων πάνω στο πλοίο (πετρέλαιο diesel χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο με μαζούτ υψηλής περιεκτικότητας σε θείο) ώστε να παραχθεί καύσιμο με αποδεκτή συγκέντρωση θείου απαιτεί μεγάλη προσοχή από τον μηχανικό. Με ποσοστό ανάμειξης μαζούτ στο νέο καύσιμο γύρω στο 80%, το κόστος του νέου καυσίμου LSFO θα αυξηθεί κατά 50% σε σχέση με το παραδοσιακό HSFO. Πέρα από αυτό, όμως, η ανάμειξη καυσίμων από διαφορετικές πηγές και με διαφορετικές συνθέσεις μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη σταθερότητα του τελικού καυσίμου, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 7.2.3, με σοβαρές επιπτώσεις στη συντήρηση αλλά και στην ασφάλεια του πλοίου. Επιπλέον η αυξημένη ζήτηση σε αποστάγματα (χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο) θα αναγκάσει τα διυλιστήρια να παράγουν μικρότερες ποσότητες μαζούτ με υψηλότερη τιμή, κάτι που θα εξαλείψει το οικονομικό πλεονέκτημα του μαζούτ στις ναυτικές μηχανές.

## 8.6 Βελτίωση της ποιότητας του πετρελαίου με χημικά πρόσθετα

Η χαμηλή ποιότητα των υπολειμματικών καυσίμων, που χρησιμοποιούνται ως κύριο καύσιμο στις σύγχρονες πετρελαιομηχανές, μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση βελτιωτικών προσθέτων για την εξουδε-

τέρωση των δυσμενών επιδράσεων που θα μπορούσε το καύσιμο αυτό να έχει στη μηχανή. Τα σπουδαιότερα από τα πρόσθετα αυτά για τα οποία οι κατασκευαστές τους υποστηρίζουν τη βελτίωση των ιδιοτήτων είναι: τα διασκορπιστικά – σταθεροποιητικά, τα απογαλακτωματοποιητικά, οι καταλύτες καύσης και τα βελτιωτικά αριθμού κετανιού.

### 8.6.1 Διασκορπιστικά – Σταθεροποιητικά πρόσθετα

Είναι οργανικές χημικές ουσίες που όταν προστίθενται στο καύσιμο εμποδίζουν τον σχηματισμό ανθρακούχων καταλοίπων ασφαλικής βάσης, τα οποία εμφανίζονται στις δεξαμενές καυσίμων με τη μορφή λάσπης (sludge). Το φαινόμενο του σχηματισμού λάσπης ονομάζεται **sludge formation** και προκαλεί προβλήματα κατά την άντληση και διακίνηση του καυσίμου στο δίκτυό του, ακόμα δε και κατά την έγχυσή του στον καυστήρα, άρα και κατά την καύση του. Ο σχηματισμός των ασφαλικών αυτών καταλοίπων γίνεται εντονότερος και τα προβλήματα οξύτερα κατά την προθέρμανση του καυσίμου ή κατά την ανάμειξη δύο ποσοτήτων πετρελαίου διαφορετικής προέλευσης που επιτείνουν την αστάθεια, που προϋπάρχει στα καύσιμα αυτά, λόγω της σύστασής τους. Το φαινόμενο αυτό του σχηματισμού λάσπης είναι τόσο εντονότερο, όσο βαρύτερο είναι το καύσιμο. Επιτείνεται επίσης από την παρουσία παραφινικών συστατικών (wax) που αποβάλλονται σε χαμηλές θερμοκρασίες σχηματίζοντας συσσωματώματα (σχ. 8.5).

Για την αντιμετώπιση όλων αυτών των προβλημάτων χρησιμοποιούνται χημικά πρόσθετα που διατίθενται στο εμπόριο των πετρελαιοειδών με το γενικό



**Σχ. 8.5**

Συσσωματώματα ασφαλικών καταλοίπων υπολειμματικών καυσίμων

όνομα F.O.T. (Fuel Oil Treatment) και προστίθενται στις δεξαμενές του πετρελαίου σε αναλογία περίπου 1 μέρος στα 4.000 μέρη καυσίμου (0,25 στα χίλια). Τα πρόσθετα αυτά εμποδίζουν τον σχηματισμό της λάσπης ή ακόμα διαλύουν υπάρχοντα ασφαλικά κατάλοιπα στις δεξαμενές και τα δίκτυα του καυσίμου και γενικά συμβάλλουν στη διατήρηση της ομοιογένειας του καυσίμου, άρα και στην καλύτερη καύση του.

### 8.6.2 Απογαλακτωματοποιητικά πρόσθετα

Τα πρόσθετα αυτά είναι χημικές ουσίες που προκαλούν διάσπαση των γαλακτωμάτων που το νερό σχηματίζει με μερικά από τα συστατικά του πετρελαίου. Το νερό παραμένει στο καύσιμο και μπορεί να προκαλέσει διαβρώσεις στο δίκτυο ή στη μηχανή και ειδικότερα στα προστόμια των καυστήρων. Με τα πρόσθετα της κατηγορίας αυτής τα γαλακτώματα διασπώνται και το νερό συγκεντρώνεται στον πυθμένα των δεξαμενών απ' όπου εύκολα και κατά καιρούς απομακρύνεται. Συνήθως τα πρόσθετα αυτά διατίθενται σε μείγμα με τα πρόσθετα της προηγούμενης κατηγορίας και στο εμπόριο αναφέρονται με την επωνυμία dual purpose fuel treatment – DP-FOT (πρόσθετα καυσίμου διπλής ενέργειας). Μερικά από τα γνωστότερα πρόσθετα της κατηγορίας αυτής αναφέρονται στον πίνακα 8.6.

**Πίνακας 8.6**

#### Παραδείγματα βελτιωτικών προσθέτων καυσίμων

| Όνομασία            | Δράση   |
|---------------------|---|
| F2-21, KEM-DOT      | Βελτιωτικό καύσης μαζούτ  |
| F-83                | Καταλύτης καύσης, μειωτής καπνού                                    |
| F-83 Plus           | Μετατροπέας ιζήματος και/βελτιωτικό καύσης                          |
| Soot Remover Powder | Σκόνη καθαρισμού αιθάλης  |
| Kem-FOT             | Βελτιωτικό σταθερότητας, ρευστοποιητής καυσίμου                     |
| Kem-DP-FOT          | Ενισχυτικό πρόσθετο   |
| ANTIFROZEN-DP-FOT   | Όπως το KEM-DP-FOT αλλά επιπλέον υποβιβάζει το σημείο ροής καυσίμου |
| ANTIFROZEN-OIL-25   | Αντιπηκτικό – αντιπαγωτικό καυσίμου                                 |
| BIO-FUEL            | Μικροβιοκτόνο – αλγοκτόνο για δεξαμενές καυσίμων / λιπαντικών       |

### 8.6.3 Καταλύτες καύσης (combustion catalysts)

Είναι ουσίες που περιέχουν ενώσεις σιδήρου και άλλων μετάλλων, που όταν προστίθενται στο καύσιμο καθιστούν την καύση πιο γρήγορη και πιο πλήρη κι έτσι πιο αποδοτική. Η συνηθισμένη αναλογία τους κυμαίνεται γύρω στο 1 μέρος καταλύτη στα 8.300 μέρη καυσίμου (περίπου 0,12 στα χίλια). Αυτό επιβαρύνει το κόστος του καυσίμου κατά ποσοστό 0,25–0,50%. Η επιβάρυνση αυτή υπερκαλύπτεται από την αύξηση της θερμικής απόδοσης του καυσίμου, αλλά και από τη μείωση της φθοράς της μηχανής από προϊόντα ατελούς καύσης που ελαττώνουν σημαντικά το κόστος συντήρησης της μηχανής.

Η δράση των καταλυτών καύσης είναι τριπλή:

1) Κατά την έγχυση του καυσίμου προκαλείται λεπτός διαμερισμός, διασπάται δηλαδή το καύσιμο σε μικρά σταγονίδια, χάρη στην αυξημένη επιφανειακή τάση του καταλύτη, αυξάνοντας έτσι την επιφάνεια που εκτίθεται στην οξειδωτική δράση του αέρα και επιταχύνοντας την καύση.

2) Ο διαμερισμός συνεχίζεται σε δεύτερη φάση αμέσως μετά την έναυση με σειρά μικρο-εκρήξεων, οι οποίες κατατεμαχίζουν το άκαυστο μέρος του καυσίμου σε ακόμα μικρότερα σταγονίδια.

3) Τα δραστικά συστατικά του καταλύτη (κυρίως ενώσεις σιδήρου) που απελευθερώνονται στις προηγούμενες φάσεις, επιταχύνουν την ένωση του άνθρακα του καυσίμου με το οξυγόνο του αέρα κάνοντας την καύση πλήρη και αποδοτική.

Μερικά είδη καταλυτών καύσης γνωστών εταιρειών αναφέρονται στον πίνακα 8.6.

### 8.6.4 Βελτιωτικά αριθμού κετανίου

Είναι χημικές ενώσεις που ελαττώνουν την καθυστέρηση ανάφλεξης του καυσίμου κάτω από τις συνθήκες που επικρατούν στον θάλαμο καύσης των ναυτικών μηχανών και αυξάνουν έτσι τον αριθμό κετανίου του καυσίμου. Η χρήση τους είναι περιορισμένη γιατί είναι δαπανηρά, είναι δηλητηριώδη και τοξικά και γιατί τα καύσιμα που σήμερα παράγουν τα διυλιστήρια σπάνια έχουν ανάγκη από περισσότερα **κετάνια**, αν μάλιστα ληφθεί υπόψη ότι οι σύγχρονες πετρελαιομηχανές είναι κατασκευασμένες με τρόπο, ώστε να ικανοποιούνται με καύσιμα χαμηλής απόδοσης.

### 8.6.5 Τροποποιητές τέφρας (ash modifiers)

Είναι γνωστό ότι τα βαριά καύσιμα περιέχουν μεταλλικές προσμείξεις που μετά την καύση μετατρέπονται σε τέφρα, οι οποίες αποτίθεται κυρίως στις

βαλβίδες εξαγωγής, τις οποίες και καταστρέφουν. Από τα συστατικά της τέφρας τα πιο επικίνδυνα είναι οι ενώσεις του βαναδίου, για τον ρόλο των οποίων γίνεται λόγος στην παράγραφο 8.5.4. Οι τροποποιητές τέφρας είναι χημικά πρόσθετα, που μετατρέπουν τις εύτηκτες ενώσεις του βαναδίου (κυρίως το βαναδικό νάτριο) σε δύστηκτες, ώστε με μορφή σκόνης παρασύρονται με τα καυσαέρια, χωρίς να προσβάλλουν ευπαθή τμήματα της μηχανής, όπως είναι οι βαλβίδες εξαγωγής ή τα ελατήρια.

## 8.7 Το δίκτυο του καυσίμου

Το καύσιμο που χρησιμοποιείται στις ναυτικές μηχανές πρέπει να ανταποκρίνεται σε ορισμένες βασικής σημασίας απαιτήσεις ποιότητας, τις οποίες αρχικά υποδεικνύουν οι κατασκευαστές των μηχανών και οι οποίες εξασφαλίζονται από τις αντίστοιχες προδιαγραφές (βλ. πίνακες 8.2 και 8.3). Ορισμένα από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του καυσίμου αναγράφονται στο Δελτίο Ποιότητας του καυσίμου, που χορηγείται στον μηχανικό του πλοίου κατά την παραλαβή του από τα πετρελαιοφόρα ή από τους σταθμούς ανεφοδιασμού του πλοίου. Δεν είναι όμως βέβαιο ότι το καύσιμο θα διατηρήσει τα αρχικά του χαρακτηριστικά και κυρίως την επιθυμητή καθαρότητά του έως τη στιγμή της καύσης, αν δεν ληφθούν ορισμένα μέτρα, που αφορούν κυρίως το δίκτυο μεταφοράς του καυσίμου. Διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης του καυσίμου με ξένες ύλες (νερό, γαιώδη συστατικά, σκόνες, ασφαλτούχα κατάλοιπα κ.λπ.), που είναι δυνατόν να προκαλέσουν σοβαρές ανωμαλίες στη μηχανή ή να δυσχεράνουν την καύση και την απόδοση της μηχανής. Αλλά και αν ακόμα αποκλεισθεί το ενδεχόμενο εξωτερικής μόλυνσης του καυσίμου, η επεξεργασία του, ιδίως για τα βαριά καύσιμα, είναι αναγκαία, για να αποκτήσει καλύτερες ιδιότητες που θα διευκολύνουν την καύση του στις πετρελαιομηχανές.

Για την εξασφάλιση λοιπόν των απαιτήσεων αυτών και κυρίως του επιθυμητού βαθμού καθαρότητας, το δίκτυο του πετρελαίου περιλαμβάνει δεξαμενές αποθήκευσης, δεξαμενές χρήσης, προθερμαντήρες, φίλτρα και φυγοκεντρικούς καθαριστές.

### 8.7.1 Δεξαμενές αποθήκευσης

Οι περισσότερες από τις δεξαμενές καυσίμων των πλοίων βρίσκονται στα διπύθμενα του σκάφους, μικρό δε ποσοστό του καυσίμου αποθηκεύεται σε δεξαμενές που βρίσκονται πάνω από τα διπύθμενα. Το σοβαρότερο πρόβλημα ως προς την καθαρότητα του

πετρελαίου στις κύριες δεξαμενές αποθήκευσης είναι ο κίνδυνος μόλυνσης από το θαλασσινό νερό, και ειδικότερα στην περίπτωση που οι δεξαμενές αυτές χρησιμοποιούνται εναλλακτικά και για θαλασσέρματα. Το θαλασσινό νερό όταν αναμειχθεί με το πετρέλαιο δύσκολα απομακρύνεται στις επόμενες φάσεις καθαρισμού, γιατί σχηματίζει σταθερά γαλακτώματα, κυρίως με τα βαριά καύσιμα. Κατά την καύση, τα άλατα, που περιέχονται στο θαλασσινό νερό, δημιουργούν σκληρές εναποθέσεις που επικάθονται στις έδρες των βαλβίδων προκαλώντας κακή στεγανότητα και ταχεία φθορά. Το χλωριούχο νάτριο, που είναι το κύριο συστατικό του θαλασσινού νερού είναι διαβρωτικό για τα μέταλλα και η παρουσία του στο καύσιμο είναι εντελώς ανεπιθύμητη. Πρέπει, επομένως, οι δεξαμενές που έχουν χρησιμοποιηθεί για θαλασσέρματα, να καθαρίζονται επιμελώς και να στεγνώνονται προτού χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση καυσίμων.

### 8.7.2 Δεξαμενές χρήσης

Είναι γνωστές και ως **δεξαμενές καθίζησης** (settling tanks) ή **δεξαμενές ημερήσιας κατανάλωσης**, γιατί η χωρητικότητά τους είναι τέτοια, ώστε το καύσιμο που περιέχουν να επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες του πλοίου για ένα εικοσιτετράωρο. Συνήθως τα πλοία διαθέτουν δύο τέτοιες δεξαμενές στις οποίες το καύσιμο μεταφέρεται από τις κύριες δεξαμενές αποθήκευσης. Στις δεξαμενές αυτές το καύσιμο παραμένει αρκετό χρόνο, ώστε να κατακαθίσουν οι ξένες προσμείξεις στον πυθμένα, απ' όπου απομακρύνονται με ειδικό εξυδατωτικό κρουνό, που βρίσκεται στο κατώτατο σημείο των δεξαμενών. Έτσι, ενώ η μία δεξαμενή χρήσης τροφοδοτεί τις αντλίες με καύσιμο, στην άλλη γίνεται η καθίζηση, που συμβάλλει στον περαιτέρω καθαρισμό του καυσίμου.

Στις δεξαμενές χρήσης γίνεται και η προθέρμανση του καυσίμου, που διευκολύνει την καθίζηση των ξένων προσμείξεων, ιδίως των συσσωματωμάτων ασφαλικής υφής που περιέχονται στα βαριά καύσιμα.

Μία συνηθισμένη διάταξη του δικτύου πετρελαίου καύσης φαίνεται στο υπόδειγμα του Παραρτήματος Γ, όπου όμως οι δυο δεξαμενές χρήσης λειτουργούν διαφορετικά. Στη δεξαμενή ημερήσιας κατανάλωσης δεν γίνεται πια καθίζηση, αλλά το καύσιμο μεταφέρεται εκεί μετά το φυγοκεντρικό καθαρισμό του και στη συνέχεια οδηγείται μέσα στη μηχανή, αφού περάσει από το δεύτερο προθερμαντήρα ( $\Pi_2$ ) και από ένα συμπληρωματικό καθαρισμό από τα φίλτρα  $\Phi_3$ .

### 8.7.3 Προθερμαντήρες

Η προθέρμανση του καυσίμου γίνεται για πολλούς λόγους και σε πολλές φάσεις της διακίνησής του από τις δεξαμενές ως τις αντλίες έγχυσης.

1) Στις δεξαμενές η προθέρμανση αποβλέπει στην επιτάχυνση της καθίζησης των ξένων προσμείξεων και κυρίως των ασφαλικών συσσωματωμάτων, για τις συνέπειες των οποίων έγινε λόγος στην παράγραφο 8.6.1. Η καθίζηση επιταχύνεται με τη χρήση ειδικών χημικών προσθέτων (βλ. § 8.6.1).

2) Η προθέρμανση συνεχίζεται σ' όλο το δίκτυο με ατμό ή ηλεκτρικές αντιστάσεις (Hot-Foils) για να επιτευχθεί το ιξώδες που θα εξασφαλίζει κατάλληλη αντλητικότητα του καυσίμου.

3) Προθερμαντήρες υπάρχουν και πριν από τους φυγοκεντρικούς καθαριστές, που έχουν σκοπό να φέρουν το ιξώδες στα όρια τιμών 15-50 cSt και έτσι να μειώσουν την πυκνότητα του καυσίμου σε τιμές στις οποίες η λειτουργία των φυγοκεντρικών καθαριστών είναι πιο αποδοτική.

4) Οι προθερμαντήρες που υπάρχουν πριν τις αντλίες εγχύσεως ( $\Pi_2$ ) θερμαίνουν το καύσιμο σε θερμοκρασία ώστε να αποκτήσει ιξώδες 10 – 28 cSt που είναι η ευνοϊκότερη τιμή ιξώδους για ένα ικανοποιητικό διασκορπισμό.

Σε όλες τις περιπτώσεις η προθέρμανση γίνεται με ατμό ή ηλεκτρικές αντιστάσεις, με αυτόματη ρύθμιση της θερμοκρασίας, ώστε να εξασφαλίζονται τα επιθυμητά όρια τιμών ιξώδους και να αποφεύγονται οι δυσάρεστες συνέπειες από την υπερβολική μείωση ιξώδους και την υπερθέρμανση καυσίμου (βλ. § 8.5.2).

Η κατάλληλη θερμοκρασία προθέρμανσης για να αποκτήσει το καύσιμο το επιθυμητό ιξώδες σε κάθε περίπτωση βρίσκεται εύκολα με τα διαγράμματα ιξώδους-θερμοκρασίας (Viscosity-Temperature charts), όπως τα διαγράμματα του σχήματος 8.2.

### 8.7.4 Φίλτρα

Η τοποθέτηση φίλτρων στο δίκτυο καυσίμου αποτελεί ένα ακόμα βήμα για την απαλλαγή του από τις ανεπιθύμητες προσμείξεις που τυχόν περιέχει. Τα φίλτρα κατατάσσονται στις ακόλουθες δύο κατηγορίες:

#### 1) Διηθητικά φίλτρα

Αποτελούνται από το περίβλημα, που συνήθως έχει κυλινδρικό σχήμα και από τη γόμωση, που περιέχει υλικά ικανά να συγκρατήσουν τις ξένες προσμείξεις. Τα υλικά αυτά είναι συνήθως νήματα, υφάσματα, φυτικές ίνες ή διάφορα ανόργανα συστατικά, που

όταν κορεσθούν από ακαθαρσίες αντικαθίστανται εύκολα. Είναι επίσης δυνατό οι γομώσεις των διηθητικών φίλτρων να καθαρίζονται με διαλυτικά υγρά, π.χ. βενζίνη και να επανατοποθετούνται, πράγμα που μπορεί να γίνει αρκετές φορές πριν αχρηστευθούν τελείως, οπότε και αντικαθίστανται.

## 2) Μεταλλικά φίλτρα (strainers)

Αποτελούνται από διάτρητους δίσκους ή μεταλλικά πλέγματα τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο, μέσα από τα οποία το διερχόμενο καύσιμο καθαρίζεται εναποθέτοντας τις ξένες ύλες πάνω στις μεταλλικές επιφάνειες των φίλτρων. Οι διαστάσεις των οπών ή των ανοιγμάτων των μεταλλικών φίλτρων, καθώς και οι αποστάσεις μεταξύ των δίσκων εξαρτώνται από τη θέση του φίλτρου στο δίκτυο, από το είδος και την ποιότητα του καθοριζόμενου καυσίμου και από τον επιδιωκόμενο βαθμό καθαρισμού. Για τον καθαρισμό του πετρελαίου diesel για παράδειγμα, μετά την αντλία έγχυσης χρησιμοποιούνται φίλτρα με δικτυωτά που έχουν 1500 περίπου ανοίγματα ανά  $\text{cm}^2$ . Μ' αυτόν τον τρόπο προστατεύεται επαρκώς ο λεπτός μηχανισμός της βαλβίδας έγχυσης του πετρελαίου κατά τη μηχανική έγχυση.

Ειδική περίπτωση μεταλλικών φίλτρων αποτελούν τα λεγόμενα **αυτοκαθαριζόμενα φίλτρα** (self-cleaning strainers), που έχουν ευρύτατη χρησιμοποίηση σε πολλά δίκτυα καυσίμων, γιατί δίνουν την ευχέρεια καθαρισμού και εύκολης απομάκρυνσης των καταλοίπων που συλλέγονται (σχ. 8.6).

Τα κύρια σημεία του δικτύου που έχουν ανάγκη από φίλτρα καθαρισμού είναι:

α) Πριν από την αντλία μετάγγισης που βρίσκεται μεταξύ των κύριων δεξαμενών και των δεξαμενών χρήσης.

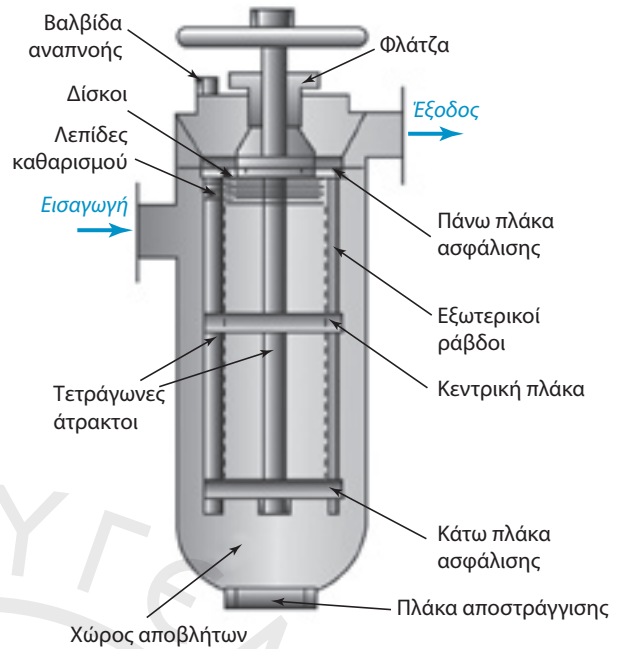
β) Πριν από τους φυγοκεντρικούς καθαριστές ( $\Phi_2$ )

γ) Πριν από την αντλία έγχυσης ( $\Phi_3$ ) όπως φαίνεται και στο Παράρτημα Γ.

### 8.7.5 Φυγοκεντρικός καθαρισμός

Η απαλλαγή του καυσίμου από ανεπιθύμητα επιβλαβή συστατικά και κυρίως από νερό, μεταλλικές προσμείξεις και ασφαλικά συσσωματώματα, συμπληρώνεται με διατάξεις που βασίζονται στη φυγοκεντρική επεξεργασία και είναι γνωστές με το γενικό όνομα **φυγοκεντρικοί αποχωριστές** (centrifugal separators) και κατατάσσονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

1) **Φυγοκεντρικοί καθαριστές** (purifiers) που



Σχ. 8.6

Αυτοκαθαριζόμενο φίλτρο

απαλλάσσουν το καύσιμο από το νερό και από ξένες προσμείξεις με σχετικά μεγαλύτερες διαστάσεις, και

2) **Φυγοκεντρικοί διαυγαστές** (clarifiers) που απαλλάσσουν το καύσιμο από τις λεπτότερες ακαθαρσίες και τις προσμείξεις που περιέχει.

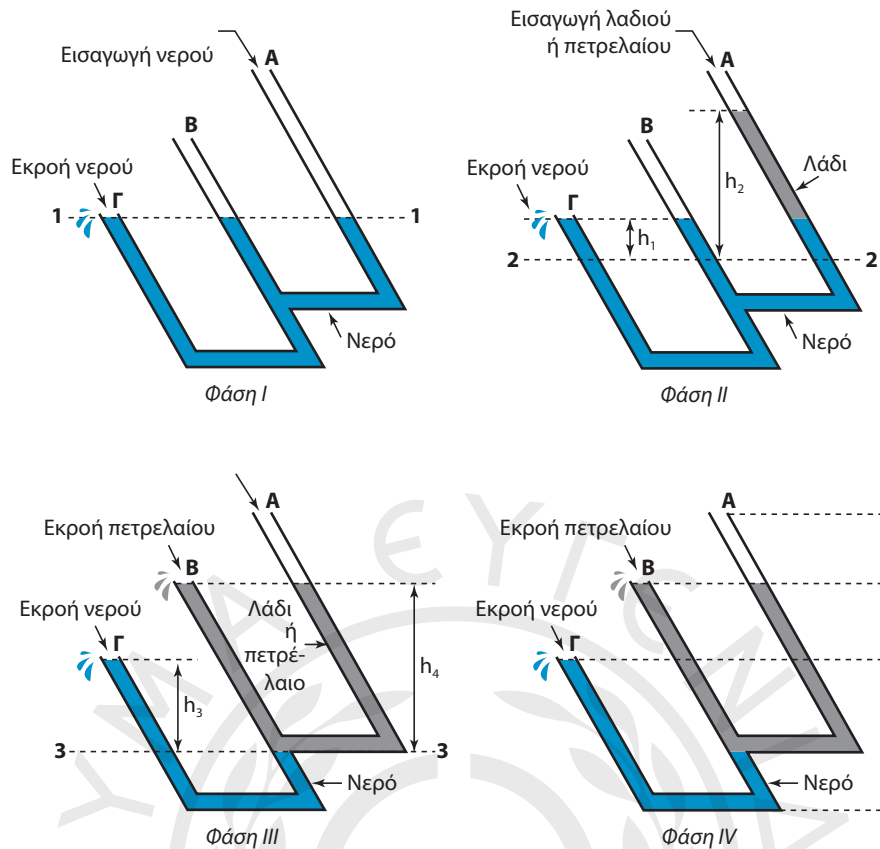
### 1) Φυγοκεντρικοί καθαριστές (purifiers).

Υπάρχουν αρκετοί τύποι φυγοκεντρικών καθαριστών από τους οποίους συνηθέστεροι είναι οι καθαριστές τύπου De Laval. Βασίζονται στη διαφορά που υπάρχει μεταξύ της πυκνότητας του πετρελαίου και των προσμείξεών του. Λόγω της διαφοράς αυτής υπάρχει μία φυσική τάση διαχωρισμού λόγω βαρύτητας, που ενισχύεται με την επίδραση της φυγόκεντρης δύναμης.

Η αρχή στην οποία βασίζεται η λειτουργία των φυγοκεντρικών καθαριστών απεικονίζεται στο σχήμα 8.7 σε 4 φάσεις:

α) **Φάση I.** Στο σκέλος Α του τριπλού σωλήνα που έχει σχήμα ανάποδου Μ, ρίχνουμε νερό, που όταν αρχίσει να εκρέει από το σκέλος Γ θα βρίσκεται στην ίδια στάθμη και στα τρία σκέλη, λόγω της αρχής των συγκοινωνούντων δοχείων.

β) **Φάση II.** Από το σκέλος Α προσθέτουμε στον σωλήνα λάδι ή καύσιμο ή άλλο υγρό ελαφρύτερο του νερού, οπότε από το σκέλος Γ θα εκρέει νερό, που εκτοπίζεται από το υγρό που προσθέσαμε στο σκέλος Α. Η στάθμη στα σκέλη Β και Γ θα παραμένει η



Σχ. 8.7

Στοιχειώδης αρχή λειτουργίας φυγοκεντρικού καθαριστήρα τύπου De Laval

ίδια αφού περιέχουν το ίδιο υγρό (νερό), ενώ στο Α θα είναι υψηλότερη αφού περιέχει ελαφρύτερο υγρό.

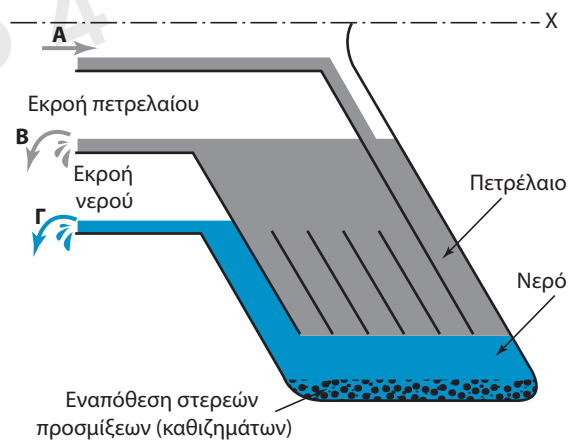
γ) **Φάση III.** Συνεχίζοντας αργά την εισαγωγή λαδιού ή καυσίμου και νερού από το σκέλος Α θα παρατηρήσουμε ότι το νερό εξακολουθεί να εκρέει από το σκέλος Γ, αναπληρούμενο από το νερό που υπάρχει στο σκέλος Β και στο τμήμα μεταξύ Β και Γ του ενδιάμεσου σωλήνα. Έτσι έρχεται στιγμή που ο σωλήνας Β γεμίζει με καύσιμο και αρχίζει να εκρέει από το επάνω στόμιο του.

δ) **Φάση IV.** Από το στόμιο του σκέλους Α ρίχνουμε αργά ακάθαρτο καύσιμο, που περιέχει νερό και άλλες προσμείξεις και παρατηρούμε ότι από το σκέλος Γ εκρέει νερό και από το Β καύσιμο, ενώ οι βαρύτερες προσμείξεις κάθονται στον πυθμένα του δοχείου.

Σ' αυτήν την αρχή βασίζεται η κατασκευή των φυγοκεντρικών διαχωριστών καυσίμου με τη διαφορά ότι, αντί της βαρύτητας χρησιμοποιείται η φυγόκεντρη δύναμη, γιατί διαφορετικά θα χρειαζόνταν πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα για ένα ικανοποιητικό διαχωρισμό.

Αν φαντασθούμε πολλούς τέτοιους σωλήνες ενω-

μένους, έχουμε το σύστημα που εικονίζεται στο σχήμα 8.8, που έχει το ίδιο διαχωριστικό αποτέλεσμα και αποτελεί τη βάση των διαχωριστών De Laval. Προϋπόθεση διαχωρισμού του νερού από το καύσιμο είναι η αρχική ύπαρξη ενός στρώματος νερού, αλλιώς από όλα τα σημεία Β και Γ θα εκρέει το καύσιμο, ώσπου να



Σχ. 8.8

Αρχή λειτουργίας φυγοκεντρικών διαχωριστών τύπου De Laval

σχηματισθεί μόνο του νερό που αποβάλλεται από το εισαγόμενο καύσιμο.

Αν φαντασθούμε ότι το σύστημα του σχήματος 8.8 περιστρέφεται γύρω από ένα κατακόρυφο άξονα AA, έχουμε την τομή ενός κυπέλλου φυγοκεντρικού διαχωριστή De Laval, που έχει την ίδια αρχή λειτουργίας (σχ. 8.9). Αντί συστήματος σωλήνων, έχουμε εδώ επάλληλους δίσκους, σε αποστάσεις που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του καθοριζόμενου καυσίμου και κυρίως την πυκνότητά του. Συνήθως οι αποστάσεις μεταξύ των δίσκων κυμαίνονται από 0,5–0,6 mm.

Τα κύρια μέρη ενός φυγοκεντρικού καθαριστή (purifier), του οποίου η τομή σκαριφηματικά φαίνεται στο σχήμα 8.10, είναι:

- 1) Ο κεντρικός άξονας Α.
- 2) Ο σωλήνας εισαγωγής του καυσίμου Ε.
- 3) Το κύπελλο  $K_{\pi}$  που αποτελείται από επάλληλα τοποθετημένους δίσκους.
- 4) Το εξωτερικό περίβλημα Π.

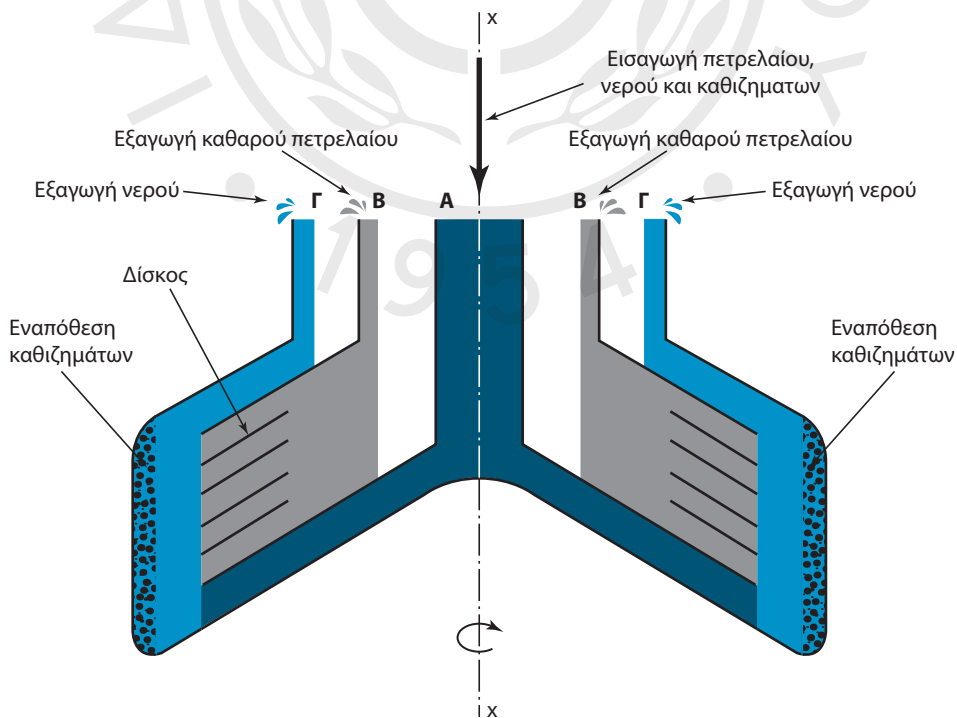
Το καύσιμο εισάγεται στη συσκευή από τον σωλήνα εισαγωγής Ε, που είναι παράλληλος προς τον κεντρικό άξονα και οδηγείται προς τους δίσκους του κυπέλλου, που βρίσκεται σε συνεχή περιστροφική κίνηση, με ταχύτητα 8.000–10.000 rpm. Οι δίσκοι έχουν κωνικό σχήμα και στην περιφέρεια έχουν οπές από τις οποίες περνάνε το νερό και οι ξένες προσμείξεις.

Ο τελευταίος προς τα πάνω δίσκος δεν έχει οπές και αποτελεί ένα είδος καλύμματος του κυπέλλου Κ.

Το καύσιμο ανάμεσα στους δίσκους υφίσταται ένα λεπτό διαμερισμό. Με την επίδραση της φυγόκεντρης δύναμης τα βαρύτερα συστατικά (νερό, προσμείξεις) εξωθούνται προς τα τοιχώματα του θαλάμου Θ, απ' όπου το νερό ανεβαίνει προς την έξοδο  $\Gamma_1$  που σχηματίζεται μεταξύ του καπακιού Β και της οριζόντιας προεξοχής του καλύμματος Κ του κυπέλλου. Οι άλλες ακαθαρσίες συγκεντρώνονται στον πυθμένα του εσωτερικού θαλάμου Θ, απ' όπου και απομακρύνονται. Στους μοντέρνους φυγοκεντρικούς καθαριστές η απομάκρυνση της λάσπης και των άλλων ακαθαρσιών από τον πυθμένα γίνεται αυτόματα, χωρίς να απαιτείται διακοπή της λειτουργίας του καθαριστή. Το καύσιμο που απομένει σχεδόν καθαρό, άρα με μικρότερο ειδικό βάρος, δέχεται μικρότερη φυγόκεντρη δύναμη και από τον εσωτερικό αγωγό  $\Gamma_2$  ανεβαίνει προς το στόμιο εκροής Σ, απ' όπου και διοχετεύεται προς το υπόλοιπο δίκτυο. Ο αγωγός  $\Gamma_2$  σχηματίζεται μεταξύ του σωλήνα εισαγωγής Ε και του τελευταίου προς τα πάνω δίσκου Κ.

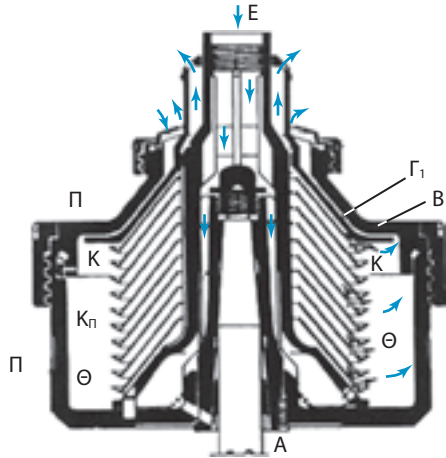
## 2) Φυγοκεντρικοί διαυγαστές

Μετά τους φυγοκεντρικούς καθαριστές, ο καθαρισμός του πετρελαίου συμπληρώνεται σε μία παρόμοι-



Σχ. 8.9

Κύπελλο φυγοκεντρικού διαχωριστή τύπου De Laval



Σχ. 8.10

Φυγοκεντρικός καθαριστής (purifier)

A: κεντρικός άξονας, B: πώμα, Γ<sub>1</sub>: εσωτερικός αγωγός, E: σωλήνας εισαγωγής καυσίμου, Θ: εσωτερικός θάλαμος Κ: δίσκοι κυπέλλου Κ<sub>π</sub>: δίσκοι καθαριστή, Π: εξωτερικό περίβλημα

ου τύπου συσκευή, που ονομάζεται **φυγοκεντρικός διαυγαστής** (clarifier) (σχ. 8.11), όπου απαλλάσσεται από λεπτότερες ακαθαρσίες που έχουν ξεφύγει από τους καθαριστές.

Οι σπουδαιότερες διαφορές των διαυγαστών σε σχέση με τους καθαριστές είναι οι εξής:

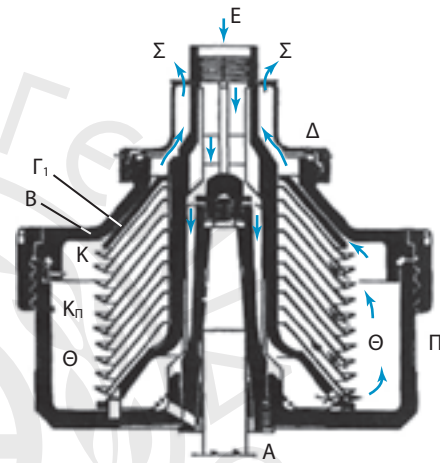
- 1) Οι δίσκοι δεν έχουν οπές στην περιφέρεια.
- 2) Δεν υπάρχει οριζόντια προεξοχή του καλύμματος.
- 3) Δεν υπάρχει ιδιαίτερος αγωγός εξαγωγής του νερού.

Η αρχή λειτουργίας των διαυγαστών είναι η ίδια με την αρχή λειτουργίας των φυγοκεντρικών καθαριστών, όπως δείχνει και το σχήμα 8.12. Το καύσιμο που βγαίνει από τον καθαριστή, εισάγεται στο διαυγαστή από τον κατακόρυφο αγωγό. Από το σωλήνα Β βγαίνει το καθαρό καύσιμο, ενώ οι προσμείξεις παραμένουν στα άκρα των δίσκων. Δίοδος νερού, όπως στους διαχωριστές δεν υπάρχει, αφού το νερό έχει ήδη αφαιρεθεί στον καθαριστή. Αν η δίοδος αυτή παρέμενε ανοικτή, θα είχαμε απ' αυτήν απώλεια καυσίμου.

Για να ανταποκριθούν οι μοντέρνοι φυγοκεντρικοί διαχωριστές στις απαιτήσεις ποιότητας των καυσίμων που χρησιμοποιεί σήμερα η Εμπορική Ναυτιλία, θα πρέπει κατά τη λειτουργία τους να τηρούνται ορισμένοι βασικοί κανόνες. Οι δυσκολίες που αντιμετωπίζονται στον τομέα αυτό οφείλονται στη χαμηλή ποιότητα καυσίμων, που ολοένα υποβαθμίζεται, στην προσπάθεια να εξασφαλίζονται φθηνότερα καύσιμα για τη ναυτιλία. Ειδικότερα στην απόδοση των φυγο-

κεντρικών διαχωριστών επιδρούν δυσμενώς τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του καυσίμου:

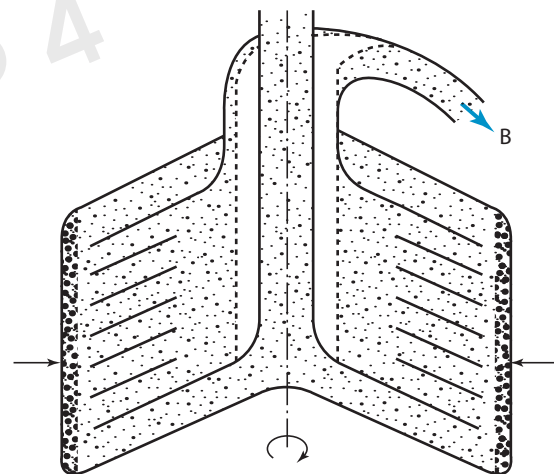
- 1) Το ιξώδες, η τιμή του οποίου σε μερικές περιπτώσεις ξεπερνάει τα 1.000 cSt.
- 2) Η πυκνότητα, που σε πολλές περιπτώσεις φτάνει αυτή του νερού (περίπου 1.000 kg/m<sup>3</sup>) καθιστώντας τον διαχωρισμό πολύ δύσκολο.
- 3) Η παρουσία πολύ λεπτών σωματιδίων από ενώσεις αργιλίου και πυριτίου, που προέρχονται από την κατεργασία βαριών καυσίμων και που πολύ δύσκολα απομακρύνονται.



Σχ. 8.11

Φυγοκεντρικός διαυγαστής (clarifier)

A: κεντρικός άξονας, B: πώμα, Γ<sub>1</sub>: εσωτερικός αγωγός, Δ: δίοδος, E: σωλήνας εισαγωγής καυσίμου, Θ: εσωτερικός θάλαμος Κ: δίσκοι κυπέλλου, Κ<sub>π</sub>: δίσκοι καθαριστή, Π: εξωτερικό περίβλημα, Σ: στόμιο εκροής



Σχ. 8.12

Αρχή λειτουργίας φυγοκεντρικού διαυγαστή (clarifier)



Έτσι για την αποτελεσματική λειτουργία των φυγοκεντρικών καθαριστών, θα πρέπει να ρυθμιστούν αναλόγως οι παρακάτω παράγοντες:

1) Η θερμοκρασία του καυσίμου, που πρέπει με την κατάλληλη προθέρμανση να ρυθμίσει το ιξώδες στις τιμές που διευκολύνουν τον διαχωρισμό, όπως περιεγράφηκε (βλ. § 8.5.2).

2) Η παροχή του καυσίμου στους καθαριστές (όσο μικρότερη είναι τόσο ο καθαρισμός είναι αποτελεσματικότερος).

3) Η απόσταση μεταξύ των δίσκων του καθαριστή.

4) Ο τρόπος διάταξης του συστήματος του φυγοκεντρικού καθαρισμού. Ως προς το σημείο αυτό υπάρχουν τρεις δυνατότητες:

α) ένας μόνο διαχωριστής,

β) δύο διαχωριστές στη σειρά, συνήθως ένας καθαριστής ακολουθούμενος από ένα διαυγαστή, ή

γ) δύο διαχωριστές τοποθετημένοι παράλληλα.

Από τους τρεις συνδυασμούς αποτελεσματικότερος είναι ο τρίτος (η παράλληλη σύνδεση), κυρίως για την απομάκρυνση σωματιδίων αργιλίου που προέρχονται από καταλύτες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή Gasoil και παραμένουν μετά την επεξεργασία ορισμένων κατηγοριών βαριών καυσίμων. Η απομάκρυνσή τους έχει ιδιαίτερη σημασία, γιατί πρόκειται για ουσίες πολύ σκληρές, που μπορεί να προκαλέσουν

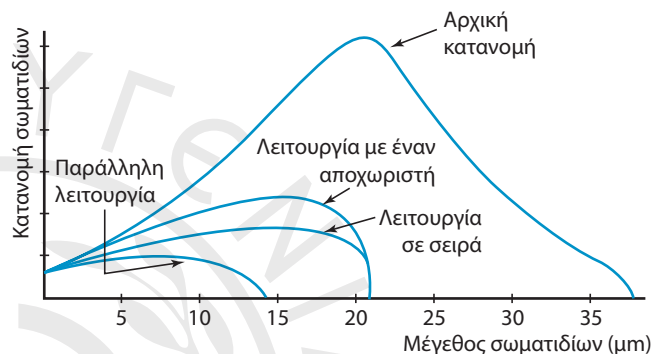
σημαντικές φθορές στα τριβόμενα μέρη της μηχανής.

Συγκριτικά τα αποτελέσματα για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις διάταξης φυγοκεντρικών καθαριστών φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 8.13, όπου παρατηρούμε ότι:

1) Για σωματίδια μεγέθους άνω των 25μm η απομάκρυνση είναι πλήρης σε όλες τις περιπτώσεις.

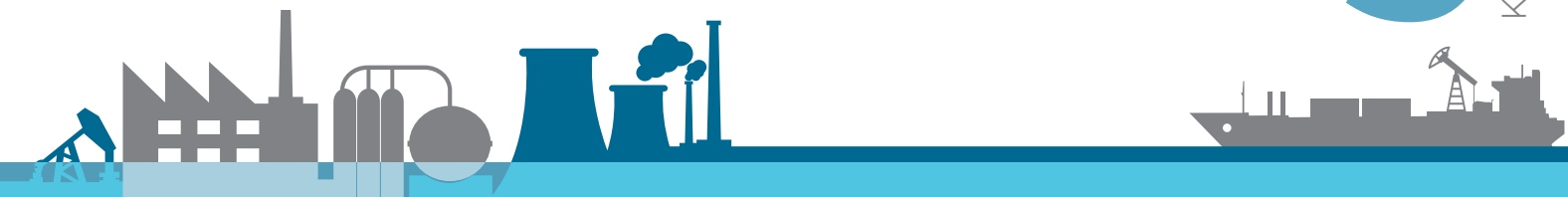
2) Με την παράλληλη σύνδεση τα σωματίδια που απομακρύνονται εντελώς είναι μεγέθους μέχρι 15μm.

3) Στις άλλες δύο περιπτώσεις (ένας διαχωριστής ή δύο στη σειρά) τα σωματίδια που παραμένουν μετά τον καθαρισμό και περισσότερα είναι και μεγαλύτερα.



**Σχ. 8.13**

Κατανομή σωματιδίων που παρέμειναν στο καύσιμο μετά τη λειτουργία φυγοκεντρικών καθαριστών με διαφορετική διάταξη



## 9.1 Γενικά – Η χημεία της καύσης

Η καύση έχει ορισθεί (βλ. § 2.1) ως η ένωση των διαφόρων σωμάτων με το οξυγόνο, με ταυτόχρονη εμφάνιση φλόγας.

Στην περίπτωση του πετρελαίου diesel, η καύση συνίσταται στη χημική ένωση του οξυγόνου με τα συστατικά του πετρελαίου diesel και κυρίως με τον άνθρακα (C) και το υδρογόνο (H), αλλά και το (S) που παρίσταται με τις εξής χημικές αντιδράσεις:



Από τις αντιδράσεις αυτές συμπεραίνουμε ότι, αν παραλείψουμε την αντίδραση καύσης του θείου (δεδομένου ότι η περιεκτικότητα του πετρελαίου diesel σε θείο είναι χαμηλή), τα κύρια προϊόντα καύσης του πετρελαίου είναι διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) και νερό ( $H_2O$ ). Συγχρόνως, παράγεται θερμότητα από τις παραπάνω εξώθερμες αντιδράσεις, την οποία η μηχανή μετατρέπει σε έργο. Το ποσό της θερμότητας που παράγεται από την καύση του άνθρακα είναι 8.100 kcal/kg (34.000 kJ/kg), ενώ από την καύση του υδρογόνου παράγονται 34.400 kcal/kg (144.000 kJ/kg).

Ο αέρας που απαιτείται για την καύση μπορεί εύκολα να υπολογισθεί από τις παραπάνω εξισώσεις (1) και (2), αν ληφθεί υπόψη ότι τα στοιχεία που συμμετέχουν στις παραπάνω αντιδράσεις (άνθρακας, υδρογόνο, οξυγόνο) αντιπροσωπεύονται με τα γραμμομόριά τους [ένα γραμμομόριο (mol) = μάζα σε g ίση με το μοριακό βάρος].

Έτσι έχουμε:

1) Για την καύση άνθρακα (εξίσωση 1) και από τη στοιχειομετρία:

$$1 \text{ mol C} = 12 \text{ g C απαιτεί}$$

$$1 \text{ mol } O_2 = 32 \text{ g } O_2$$

και με διαίρεση των ποσοτήτων μάζας με 12 και μετατρέποντας τα g σε kg προκύπτει:

$$1 \text{ kg C απαιτεί για την καύση του } 2,67 \text{ kg } O_2$$

και επειδή το οξυγόνο αποτελεί το 23% κ.β. του ατμοσφαιρικού αέρα, προκύπτει:

$$1 \text{ kg C απαιτεί για την καύση του } 2,67 \times 100/23 = 11,61 \text{ kg αέρα}$$

2) Για την καύση υδρογόνου (εξίσωση 2) και από τη στοιχειομετρία:

$$1 \text{ mol } H_2 = 2 \text{ g } H_2 \text{ απαιτεί}$$

$$0,5 \text{ mol } O_2 = 0,5 \times 32 \text{ g } O_2 = 16 \text{ g } O_2$$

και με διαίρεση των ποσοτήτων μάζας με 2 και μετατρέποντας τα g σε kg προκύπτει:

$$1 \text{ kg } H_2 \text{ απαιτεί για την καύση του } 8,00 \text{ kg } O_2$$

και επειδή το οξυγόνο αποτελεί το 23% κ.β. του ατμοσφαιρικού αέρα, προκύπτει:

$$1 \text{ kg C απαιτεί για την καύση του } 8,00 \times 100/23 = 34,78 \text{ kg αέρα.}$$

Επομένως ο αέρας A που απαιτείται για να καεί 1 kg πετρελαίου diesel με περιεκτικότητα C σε άνθρακα και H σε υδρογόνο είναι θεωρητικά:

$$A_0 = 11,61 \times C + 34,78 \times H \text{ kg αέρα/kg καυσίμου} \quad (4)$$

Οι υπολογισμοί αυτοί τροποποιούνται ελάχιστα αν το πετρέλαιο diesel περιέχει θείο S, για το οποίο οι αντίστοιχοι υπολογισμοί είναι:

Από τη στοιχειομετρία:

$$1 \text{ mol S} = 32 \text{ g S απαιτεί } 1 \text{ mol } O_2 = 32 \text{ g } O_2$$

και με διαίρεση των ποσοτήτων μάζας με 32 και μετατρέποντας τα g σε kg προκύπτει:

$$1 \text{ kg S απαιτεί για την καύση του } 1,00 \text{ kg } O_2$$

και επειδή το οξυγόνο αποτελεί το 23% κ.β. του ατμοσφαιρικού αέρα, προκύπτει:

1 kg S απαιτεί για την καύση του  
 $1,00 \times 100/23 = 4,35$  kg αέρα.

Αν λοιπόν το καύσιμο, εκτός από C και H περιέχει και S, με περιεκτικότητα S, τότε η εξίσωση (4) παίρνει τη μορφή της παρακάτω εξίσωσης (5):

$$A_{\theta} = \frac{11,61 \times C + 34,78 \times H + 4,35 \times S \text{ kg αέρα}}{\text{kg καυσίμου}} \quad (5)$$

Αν τέλος, το καύσιμο περιέχει και οξυγόνο, η ποσότητά του αέρα πρέπει να μειωθεί κατά το οξυγόνο που χρειάζεται για την καύση του υδρογόνου, οπότε η εξίσωση (5) παίρνει την παρακάτω τελική της μορφή:

$$A_{\theta} = \frac{11,61 \times C + 34,78 \times (H - O/8) + 4,35 \times S \text{ kg αέρα}}{\text{kg καυσίμου}} \quad (6)$$

Οι διαφορές πάντως στην ποσότητα αέρα που απαιτείται για την καύση με την παρουσία θείου ή οξυγόνου στο καύσιμο δεν είναι σημαντικές, ώστε η εξίσωση (4) είναι αρκετή για να υπολογίζεται με ικανοποιητική προσέγγιση η ποσότητα του αέρα που θεωρητικά απαιτείται για την καύση οιοδήποτε καυσίμου, όπως φαίνεται από το ακόλουθο παράδειγμα.



### Παράδειγμα

Δίνεται πετρέλαιο diesel με την ακόλουθη στοιχειακή ανάλυση:

Άνθρακας C: 83%, υδρογόνο H: 12%, θείο S: 3% και οξυγόνο O: 1%

Η ποσότητα του αέρα που απαιτείται θεωρητικά για την καύση του πετρελαίου diesel είναι:

α) Χωρίς τον υπολογισμό οξυγόνου και θείου (εξίσωση 4):

$$A_{\theta} = 11,61 \times C + 34,78 \times H = 11,61 \times 0,83 + 34,78 \times 0,12 = 13,81 \text{ kg αέρα/kg καυσίμου}$$

β) Λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία του θείου (εξίσωση 5):

$$\begin{aligned} A_{\theta} &= 11,61 \times C + 34,78 \times H + 4,35 \times S = \\ &= 11,61 \times 0,83 + 34,78 \times 0,12 + 4,35 \times 0,03 = \\ &= 13,94 \text{ kg αέρα/kg καυσίμου} \end{aligned}$$

γ) Με την πλήρη σύνθεση του καυσίμου, τέλος, απαιτείται θεωρητικά ποσότητα αέρα σύμφωνα με την εξίσωση 6:

$$\begin{aligned} A_{\theta} &= 11,61 \times C + 34,78 \times (H - O/8) + 4,35 \times S = \\ &= 11,61 \times 0,83 + 34,78 \times (0,12 - 0,01/8) + 4,35 \times 0,03 = 13,90 \text{ kg αέρα/kg καυσίμου} \end{aligned}$$

Για την εξασφάλιση τέλει καύσης, που τόσο μεγάλη σημασία έχει για κάθε θερμική μηχανή και ιδιαίτερα για τις μηχανές diesel (βαθμός απόδοσης, ρύπανση) δεν αρκεί η ποσότητα του αέρα που υπολογίζεται θεωρητικά με βάση τις παραπάνω εξισώσεις. Απαιτείται η παροχή μιας **περίσσειας αέρα**, που κυμαίνεται από 5-10% της ποσότητας που υπολογίζεται θεωρητικά.

**Συντελεστής περίσσειας λ** ονομάζεται ο λόγος της ποσότητας αέρα που απαιτείται για την τέλεια καύση, προς τον αέρα που υπολογίζεται θεωρητικά.

Αν για το προηγούμενο **παράδειγμα** παρέχονται  $A_{\pi} = 16,00$  kg αέρα/kg καυσίμου, ο συντελεστής περίσσειας λ θα είναι:

$$\lambda = 16,00/13,90 = 1,15 \text{ ή περίσσεια } 15\%.$$

Αν επιθυμούμε να δώσουμε περίσσεια αέρα 10% ή  $\lambda = 1,10$ , ο παρεχόμενος αέρας  $A_{\pi}$  θα είναι:

$$A_{\pi} = 1,10 \times 13,90 = 15,29 \text{ kg αέρα/kg καυσίμου}$$

Η ατελής καύση γίνεται αντιληπτή κυρίως από το μαύρο χρώμα των καυσαερίων, που οφείλεται στα λεπτότατα σωματίδια άκαυστου άνθρακα. Το υδρογόνο, επειδή έχει μεγαλύτερη χημική συγγένεια με το οξυγόνο σε σύγκριση με τον άνθρακα, καίγεται ευκολότερα, επομένως οι συνέπειες από την ανεπάρκεια αέρα πηγαίνουν κατά κανόνα στον άνθρακα. Αποτελέσματα της ατελούς καύσης είναι η ρύπανση των κυλίνδρων της μηχανής και η μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης, που οδηγεί σε μεγαλύτερες καταναλώσεις καυσίμου.

Για να βρεθεί ο όγκος αέρα που απαιτείται για την καύση, πράγμα που είναι απαραίτητο γιατί η μάζα ενός αερίου δύσκολα μετριέται, αρκεί να διαιρεθεί η μάζα με την πυκνότητα του αέρα που είναι  $1,293 \text{ kg/m}^3$ .

$$V_{\theta} = \frac{m_{\alpha\epsilon\rho\alpha}}{1,293} \quad (7)$$

Η ποσότητα αυτή προσαρμόζεται στις πραγματικές τιμές, ανάλογα με τη θερμοκρασία και την πίεση, με βάση τον τύπο:

$$V_{\pi\pi} = V_{\theta} \frac{T + 273}{273} \cdot \frac{760}{P}$$

όπου:  $V_{\pi\pi}$  ο όγκος του αέρα στις πραγματικές συν-

θήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στη δεδομένη περίπτωση,  $V_{\theta}$  ο όγκος της θεωρητικής ποσότητας του αέρα που προκύπτει από τη μάζα αέρα όπως υπολογίστηκε από τους τύπους (4), (5) ή (6) και από τη μετατροπή με την (6),  $\theta$  η θερμοκρασία του αέρα, σε °C και  $P$  η πίεση του αέρα, σε mm στήλης Hg.

Έτσι για το καύσιμο του **παραδείγματος** ο όγκος  $V_{\theta}$  υπολογίζεται ως:

$$V_{\theta} = \frac{13,90}{1,293} = 10,75 \text{ m}^3 \text{ αέρα/kg καυσίμου}$$

και ο όγκος του αέρα σε θερμοκρασία 27°C και πίεση 765 mm Hg υπολογίζεται ως:

$$V_{pp} = 10,75 \cdot \frac{27 + 273}{273} \cdot \frac{760}{765} = 11,74 \text{ m}^3 \text{ αέρα/kg καυσίμου}$$

και με  $\lambda = 1,10$ , θα έχουμε 12,91 m<sup>3</sup> αέρα/kg καυσίμου.

## 9.2 Σημασία της καύσης

Η καύση έχει πρωταρχική σημασία για κάθε θερμική μηχανή, της οποίας την απόδοση επηρεάζει με δυο τρόπους:

1) **Ποσοτικά**, γιατί η τέλεια καύση εξασφαλίζει και μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης της μηχανής.

2) **Ποιοτικά**, γιατί μεταξύ των προϊόντων καύσης μπορεί να υπάρχουν συστατικά επικίνδυνα για τη μηχανή, όπως τα εξανθρακώματα, η παρουσία των οποίων εξαρτάται κυρίως από την αρχική ποιότητα του καυσίμου, αλλά και απ' τις συνθήκες καύσης.

Η καύση του πετρελαίου diesel στις μηχανές diesel παρουσιάζει συχνά αρκετά προβλήματα, για τα οποία γίνεται λόγος στο κεφάλαιο 8. Τα προβλήματα αυτά επηρεάζονται από τους εξής κυρίως παράγοντες, που εξετάζονται στην επόμενη παράγραφο:

- 1) Την ποιότητα καυσίμου,
- 2) τις συνθήκες καύσης,
- 3) το σύστημα έγχυσης, και
- 4) τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

## 9.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την καύση του πετρελαίου σε μηχανές diesel

### 9.3.1 Βαθμός συμπίεσης

Ο βαθμός συμπίεσης  $r$ , δηλαδή η σχέση  $V_1/V_2$ , όπου  $V_1$  είναι ο αρχικός όγκος στον κύλινδρο πριν τη συμπίεση και  $V_2$  είναι ο τελικός όγκος στο τέλος της συμπίεσης, σχετίζεται με τις τιμές της τελικής πίεσης

$P_2$  και της τελικής θερμοκρασίας  $T_2$ , που επιτυγχάνονται στο τέλος της συμπίεσης, όπως προκύπτει και από τον τύπο της αδιαβατικής αλλαγής, που με αρκετή προσέγγιση ισχύει για τη συμπίεση στις μηχανές εσωτερικής καύσης:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (1)$$

$$\text{ή } \frac{V_1}{V_2} = r = \frac{P_2 \cdot T_2}{P_1 \cdot T_1} \quad (2)$$

όπου:  $T$  είναι η θερμοκρασία σε K (= 273 +  $\theta$ , όπου  $\theta$  είναι η θερμοκρασία σε °C) και  $P$  η πίεση σε Pa ή bar.

Για να εξασφαλισθεί θερμοκρασία αέρα αρκετή ώστε να προκαλέσει αυτανάφλεξη του καυσίμου που ψεκάζεται από τον εγχυτήρα στον κύλινδρο (400-500°C) πρέπει η τελική πίεση να είναι περίπου 30 bar, για την οποία απαιτείται βαθμός συμπίεσης πάνω από 12:1.



### Παραδείγματα

1. Να υπολογιστεί η τελική θερμοκρασία που θα προκληθεί όταν μείγμα αέρα καυσίμου αρχικής θερμοκρασίας 67°C και πίεσης 1 bar δεχτεί βαθμό συμπίεσης 12:1 και φτάσει σε τελική πίεση 30 bar.

Η αρχική θερμοκρασία θα είναι:

$$T_1 = 67 + 273 = 340 \text{ K}$$

και θα έχουμε τελική θερμοκρασία  $T_2$  σύμφωνα με την παραπάνω σχέση (2):

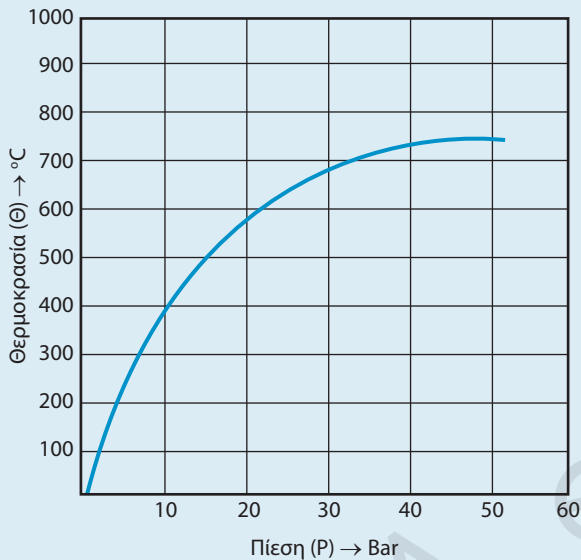
$$T_2 = T_1 \cdot \frac{P_2 \cdot V_2}{P_1 \cdot V_1} = 340 \cdot \frac{30}{1} \cdot \frac{1}{12} = 850 \text{ K}$$

Έτσι η τελική θερμοκρασία θα είναι:

$$\theta_2 = 850 - 273 = 577^\circ\text{C}$$

και παρά τις απώλειες θερμότητας που μειώνουν τη θερμοκρασία  $\theta_2$ , η θερμοκρασία αυτή είναι ικανή να αναφλέξει εύκολα το ψεκαζόμενο καύσιμο.

Τη σχέση μεταξύ τελικής πίεσης στο τέλος της συμπίεσης και της θερμοκρασίας που ο συμπιεζόμενος αέρας αποκτά, δείχνει το διάγραμμα του σχήματος 9.1.



Σχ. 9.1

Σχέση συμπίεσης και θερμοκρασίας

2. Για αρχική θερμοκρασία αέρα 45°C και αρχική πίεση 1 bar, για να επιτευχθεί τελική πίεση 40 bar για την οποία απαιτείται βαθμός συμπίεσης  $r = 13:1$ , η τελική θερμοκρασία του αέρα θα είναι:

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{P_2 \cdot V_2}{P_1 \cdot V_1} = (273 + 45) \cdot \frac{40}{1} \cdot \frac{1}{13} = 978 \text{ K} = 978 - 273^\circ\text{C} = 705^\circ\text{C}$$

Έτσι εξηγείται γιατί οι πετρελαιομηχανές έχουν πολύ μεγαλύτερο βαθμό συμπίεσης (12:1 μέχρι 22:1) σε σχέση με τις βενζινομηχανές, όπου ο βαθμός συμπίεσης δεν ξεπερνάει το 10:1. Πρέπει όμως να διευκρινισθεί ότι για τις βενζινομηχανές συμπίεση μεγαλύτερη από 10:1 ούτε χρειάζεται χάρη στον σπινθηριστή που εξασφαλίζει άνετη ανάφλεξη, αλλά και ούτε είναι δυνατή, γιατί το φαινόμενο του κτυπήματος στη μηχανή πάνω από το όριο 10:1 δύσκολα αντιμετωπίζεται από τις βενζίνες που σήμερα παράγουν τα διυλιστήρια.

Για τις μηχανές diesel η μεγάλη τιμή του βαθμού συμπίεσης έχει τις παρακάτω συνέπειες:

1) Καταργεί τους σπινθηριστές.

2) Έχει μεγαλύτερο βαθμό θερμικής απόδοσης, άρα μικρότερη κατανάλωση, και μάλιστα σε καύσιμο φθηνότερο από αυτό που χρησιμοποιεί η βενζινομηχανή, άρα κόστος λειτουργίας πολύ χαμηλότερο για την ίδια ιπποδύναμη. Η κατανάλωση καυσίμου για μία βενζινομηχανή είναι 200-250 g/HP.h, ενώ για μία αντίστοιχη μηχανή diesel είναι 140-180 g/HP.h, που

οδηγούν σε βαθμούς απόδοσης  $\eta_{\theta} = 0,25-0,31$  για τη βενζινομηχανή και  $\eta_{\theta} = 0,35-0,45$  για τη μηχανή diesel.

3) Απαιτεί ισχυρότερη κατασκευή, για να αντιμετωπίζονται ικανοποιητικά οι θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις που αναπτύσσονται απ' τις υψηλότερες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας.

### 9.3.2 Διασκορπισμός του καυσίμου

Ο βαθμός διασκορπισμού ή ψεκασμού του καυσίμου είναι ανάλογος προς τον αριθμό των σταγονιδίων, στα οποία ορισμένη ποσότητα ενός καυσίμου διασπάται κατά την έγχυση στον θάλαμο καύσης της μηχανής. Επιδιώκεται, ώστε ο αριθμός αυτός των σταγονιδίων, δηλαδή ο **βαθμός διασκορπισμού** του καυσίμου, να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος, ώστε η εξωτερική επιφάνεια που το καύσιμο παρουσιάζει σε επαφή με τον αέρα να είναι αρκετή προκειμένου να εξασφαλίζεται τέλεια καύση.

Επειδή η ανάφλεξη του καυσίμου γίνεται στην επιφάνεια που βρίσκεται σε επαφή με τον αέρα, επόμενο είναι η ταχύτητα με την οποία η καύση προχωρεί να εξαρτάται απ' την εκτεθειμένη επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο όρος **ειδική επιφάνεια**, που μαθηματικά ορίζεται με τη σχέση:

$$S = \frac{E}{V}$$

όπου: E η εξωτερική επιφάνεια του καυσίμου που βρίσκεται σε επαφή με τον αέρα, σε  $\text{cm}^2$ , V ο όγκος του καυσίμου, στον οποίο η επιφάνεια E ανήκει, σε  $\text{cm}^3$ , S η ειδική επιφάνεια σε μονάδες  $\text{cm}^{-1}$  ( $= \text{cm}^2/\text{cm}^3$ ).

### Άσκηση

Να βρεθεί η μεταβολή στην ειδική επιφάνεια μίας σταγόνας πετρελαίου diesel με διάμετρο  $d_o = 1,24 \text{ cm}$  που διασπάται κατά τον διασκορπισμό σε 1.000.000 ισομεγέθη σφαιρικά σταγονίδια.

Η σταγόνα πριν το διασκορπισμό θα έχει όγκο

$$V_o = \frac{1}{6} \pi \cdot d_o^3 = \frac{1}{6} \cdot 3,14 \cdot 1,24^3 = 1,00 \text{ cm}^3$$

και εξωτερική επιφάνεια

$$E_o = \pi \cdot d_o^2 = 4,83 \text{ cm}^2$$

Μετά τον διασκορπισμό η σταγόνα αυτή θα διασπαστεί σε 1.000.000 σταγονίδια και τότε το καθένα απ' αυτά θα έχει όγκο

$$V_{\sigma\tau} = \frac{1}{10^6} = 10^{-6} \text{ cm}^3$$

και διάμετρο

$$d_{\sigma\tau} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_d}{\pi}} = 0,0124 \text{ cm}$$

και εξωτερική επιφάνεια σταγονιδίου

$$E_{\sigma\tau} = \pi \cdot d_{\sigma\tau}^2 = 0,00000483 \text{ cm}^2$$

και συνολική επιφάνεια

$$E_{\delta} = 10^6 \cdot E_{\sigma\tau} = 483 \text{ cm}^2$$

Άρα μετά τον διασκορπισμό τα 1.000.000 σταγονίδια συνολικά θα έχουν επιφάνεια  $E_{\delta}$ , δηλαδή 100 φορές μεγαλύτερη από όση επιφάνεια  $E_{\sigma}$  είχε η μία σταγόνα. Ο όγκος παραμένει ο ίδιος  $V_{\delta} = V_{\sigma}$ .

Προ διασκορπισμού η ειδική επιφάνεια είναι:

$$S_{\sigma} = \frac{E_{\sigma}}{V_{\sigma}} = \frac{4,83}{1} = 4,83 \text{ cm}^{-1}$$

ενώ μετά το διασκορπισμό θα είναι:

$$S_{\delta} = \frac{E_{\delta}}{V_{\delta}} = \frac{483}{1} = 483 \text{ cm}^{-1}$$

δηλαδή **εκατό φορές μεγαλύτερη**.

Οι εγχυτήρες έχουν ως αποστολή τον ψεκάσμο του πετρελαίου σε βαθμό, ώστε η ειδική επιφάνεια να έχει τιμές πάνω από  $1500 \text{ cm}^{-1}$ .

Ο βαθμός διασκορπισμού του πετρελαίου diesel στις μηχανές diesel εξαρτάται από τους εξής παράγοντες.

α) **Πίεση έγχυσης**. Είναι η πίεση με την οποία το πετρέλαιο ψεκάζεται με την αντλία έγχυσης στον θάλαμο καύσης της μηχανής. Η πίεση αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 300 bar.

β) **Πίεση αέρα**. Η πίεση του αέρα, όπως έχει διαμορφωθεί από τη συμπίεση στον κύλινδρο της μηχανής επηρεάζει επίσης τον βαθμό διασκορπισμού. Πίεση συμπίεσης πάνω από 30 bar προκαλεί αρκετή αντίσταση στα σταγονίδια κατά την έγχυση στον κύλινδρο, διαμορφώνοντας ευνοϊκά τον αρχικό διασκορπισμό.

γ) **Ιξώδες του καυσίμου**. Ο βαθμός διασκορπισμού εξαρτάται άμεσα από την τιμή του ιξώδους του καυσίμου προς την οποία είναι αντιστρόφως ανάλογος. Με τη σωστή προθέρμανση εξασφαλίζεται τιμή ιξώδους που δίνει τον καλύτερο διασκορπισμό και είναι 10-18 cSt. Η προθέρμανση αυτή καθορίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια από τα διαγράμματα ιξώδους-θερμοκρασίας

(βλ. § 8.5.2), που οι διάφορες εταιρείες θέτουν στη διάθεση των μηχανικών.

δ) **Είδος του εγχυτήρα**. Με την κατάλληλη ρύθμιση του αριθμού των ανοιγμάτων/οπών, του μεγέθους και του σχήματος που έχουν, καθώς επίσης και της κλίσης, με την οποία είναι τοποθετημένες, επιδιώκεται ώστε το καύσιμο να μην κάνει έγχυση σαν κυλινδρική δέσμη, αλλά τα σταγονίδια του να σχηματίζουν νέφος κωνικού σχήματος, που εξασφαλίζει καλύτερη επαφή των διασκορπιζομένων σταγονιδίων με τον αέρα.

### 9.3.3 Διείσδυση

Εκτός από τον βαθμό διασκορπισμού, αποφασιστική σημασία έχει για την καύση και η δυνατότητα του καυσίμου να διεισδύει σε αρκετό βάθος μέσα στον αέρα που βρίσκεται στον θάλαμο καύσης κατά την έγχυση και μάλιστα με υψηλή σχετικά πίεση (30-50 bar). Η **ικανότητα διείσδυσης** εξαρτάται από την κινητική ενέργεια των σταγονιδίων, δηλαδή από την ταχύτητα και τη μάζα τους ( $E_k = mv^2/2$ ), άρα και από το μέγεθός τους. Είναι φανερό λοιπόν ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των σταγονιδίων, δηλαδή όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός διασκορπισμού, τόσο η ικανότητα διείσδυσης είναι μικρότερη. Αν η διεισδυτικότητα είναι πολύ μικρή, είναι πιθανό η ανάφλεξη του καυσίμου να γίνει κοντά στο προστόμιο του καυστήρα, και να έχουμε ατελή καύση με τα γνωστά δυσάρεστα επακόλουθα (ρύπανση, μειωμένη απόδοση).

Και η ικανότητα διείσδυσης του καυσίμου, εξαρτάται από το ιξώδες του, κατά τρόπο όμως αντίθετο από τον βαθμό διασκορπισμού, δηλαδή αυξάνεται όσο το ιξώδες του καυσίμου είναι μεγαλύτερο.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι οι δύο αυτές απαιτήσεις για την καλή καύση του πετρελαίου στις μηχανές diesel, δηλαδή ο βαθμός διασκορπισμού και η διεισδυτικότητα, είναι ασυμβίβαστες μεταξύ τους, αφού η μία απαιτεί μεγάλο ιξώδες ενώ η δεύτερη χαμηλές τιμές ιξώδους. Για τον λόγο αυτό οι προδιαγραφές για το πετρέλαιο diesel καθορίζουν ανώτατα και κατώτατα όρια τιμών ιξώδους (πίνακας 8.2). Για το μαζούτ και γενικά για τα βαριά καύσιμα μόνον ανώτατα όρια ιξώδους καθορίζονται (πίνακας 8.3) γιατί συνήθως προθερμαίνονται.

### 9.3.4 Χρόνος έγχυσης (προπορεία)

Η έγχυση του καυσίμου στον θάλαμο καύσης της μηχανής ρυθμίζεται, ώστε να γίνεται λίγες μοίρες πριν από το ANΣ, δηλαδή πριν από το τέλος της συμπίεσης. Έτσι έχουμε μία **προπορεία έγχυσης** (avance)

που έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη αύξηση της τελικής πίεσης, άρα καλύτερη απόδοση. Η προπορεία αυτή ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο της μηχανής και καθορίζεται με ακρίβεια από τον κατασκευαστή της.

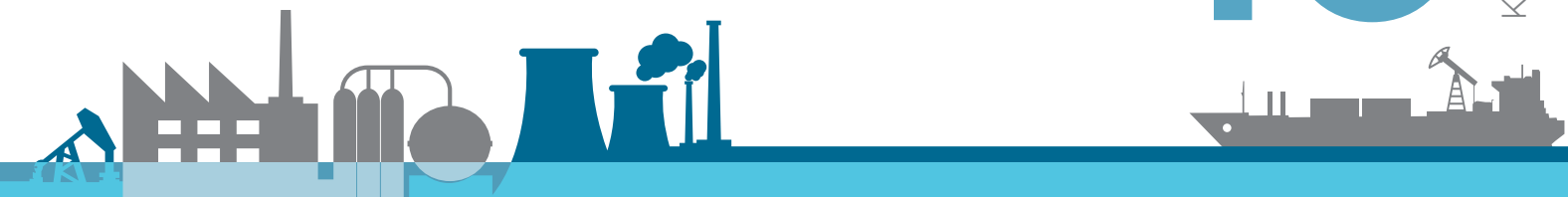
Ως προς την προπορεία έγχυσης διακρίνουμε δύο περιπτώσεις ανωμαλιών:

1) **Προπορεία μικρότερη της κανονικής**, δηλαδή καθυστέρηση της έγχυσης πέρα από εκείνη που ο κατασκευαστής προβλέπει, επιφέρει μείωση της τελικής πίεσης, άρα ελάττωση της ισχύος, που όπως είναι γνωστό εξαρτάται από τη (μέση) πίεση. Μπορεί ακόμα

να έχουμε καθυστέρηση ανάφλεξης, ιδίως όταν η ποιότητα καύσης του πετρελαίου (αριθμός κετανίου) είναι κάτω της κανονικής (βλ. § 6.2).

2) **Προπορεία μεγαλύτερη της κανονικής**, δηλαδή έγχυση του καυσίμου νωρίτερα από τα προβλεπόμενα, έχει ως συνέπεια αύξηση της τελικής πίεσης μεγαλύτερη από εκείνη που επιδιώκεται με την κανονική προπορεία. Αυτό προκαλεί καταπόνηση της μηχανής πέρα από τα όρια αντοχής, που ο κατασκευαστής έχει υπολογίσει, πράγμα που είναι ανεπιθύμητο παρά την αύξηση της ισχύος.





## 10.1 Είδη στερεών καυσίμων

Τα στερεά καύσιμα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες στα **φυσικά στερεά καύσιμα** (γαιάνθρακες) και στα **τεχνητά στερεά καύσιμα**, που δεν υπάρχουν στη φύση, αλλά παράγονται τεχνητά από άλλα είδη καυσίμων. Σπουδαιότερα είδη των τεχνητών καυσίμων είναι οι ξυλάνθρακες και το κωκ.

### 10.1.1 Ξυλάνθρακες

Προέρχονται από τα ξύλα που υποβάλλονται σε απανθράκωση καίγοντάς τα χωρίς την παρουσία αερίου. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας τα ξύλα σε σωρό που καλύπτεται με στρώμα λάσπης ή πηλού πάχους 10 cm, με τρόπο τέτοιο ώστε να εμποδίζεται η επίδραση του ατμοσφαιρικού οξυγόνου. Έτσι, αντί για καύση γίνεται ξηρή απόσταξη που οδηγεί σε απανθράκωση. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα, που για το ξύλο είναι 40–50% (το υπόλοιπο είναι νερό και άλλα συστατικά) ανέρχεται μετά την απανθράκωση σε 80%. Οι ξυλάνθρακες, επομένως, είναι πρώτης τάξης καύσιμο, με θερμαντική ικανότητα 6.000 kcal/kg περίπου (25.080 kJ/kg). Πριν από τη διάδοση των υγρών καυσίμων και του ηλεκτρισμού, οι ξυλάνθρακες ήταν το σπουδαιότερο είδος καυσίμου για την οικιακή θέρμανση, των αγροτικών κυρίως πληθυσμών. Σήμερα όμως χρησιμοποιείται, σχεδόν αποκλειστικά, σαν αναγωγικό μέσο, για την παραγωγή χαλύβων εξαιρετικής ποιότητας. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή περιεκτικότητα τέφρας, η οποία μάλιστα είναι απαλλαγμένη από επιβλαβή συστατικά, όπως το θείο, που στους γαιάνθρακες περιέχονται σε υψηλή αναλογία.

### 10.1.2 Κωκ

Το **κωκ** ή **οπτάνθρακας** παράγεται με ξηρή απόσταξη των γαιανθράκων, δηλαδή με πύρωση σε κλει-

στές εστίες, χωρίς την παρουσία αέρα. Με αυτόν τον τρόπο οι γαιάνθρακες διασπώνται:

1) Στα πτητικά συστατικά, που περιέχουν ως κύριο συστατικό το φωταέριο.

2) Στο υπόλειμμα της απόσταξης, δηλαδή το κωκ.

Η ξηρή απόσταξη άλλοτε γίνεται για το φωταέριο, οπότε το κωκ αποτελεί παραπροϊόν, και άλλοτε όμως και για την παραγωγή κωκ, που είναι πολύ πιο συμπυκνές και ανθεκτικό από τους γαιάνθρακες. Η ιδιότητα αυτή, εκτός των άλλων, έχει ιδιαίτερη σημασία για τη μεταλλουργία, όπου ο άνθρακας, που χρησιμοποιείται στις υψικαμίνους ως αναγωγικό μέσο, πρέπει να έχει αρκετή αντοχή στη συμπίεση που υφίσταται από την πίεση του μεταλλεύματος, ώστε να μην συντρίβεται και μετατρέπεται σε σκόνη, εμποδίζοντας έτσι τη λειτουργία της υψικαμίνου. Το κωκ αυτό είναι το **μεταλλουργικό κωκ** και αποτελεί σήμερα σχεδόν το μοναδικό καύσιμο στις υψικαμίνους<sup>1</sup>.

## 10.2 Γαιάνθρακες

Με το όνομα **γαιάνθρακες** περιλαμβάνονται όλα τα είδη του φυσικού άνθρακα. Είναι ορυκτά που προέρχονται από την απανθράκωση φυτικών υλών, δηλαδή κορμών και κλάδων δένδρων που βρέθηκαν μετά από τις γεωλογικές προσχώσεις σε μεγάλα βάθη στη γη. Η φυτική ύλη στην αρχή υπέστη την αποσυνθετική δράση διαφόρων αναερόβιων οργανισμών και μετατράπηκε σε **τύρφη**. Η τύρφη με τις προσχώσεις βρέθηκε στα βάθη της γης και, με την πίεση και τη θερμοκρασία που επικρατούν στα βάθη αυτά, μετατράπηκε στις διάφορες μορφές γαιάνθρακα. Υπό τις μορφές αυτές σήμερα λαμβάνεται με εξόρυξη.

Οι διάφορες μορφές του γαιάνθρακα διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον χρόνο, το βάθος και γενικότερα τις συνθήκες με τις οποίες έγινε η απανθράκωση.

<sup>1</sup> Περισσότερες πληροφορίες για τη χρήση του μεταλλουργικού κωκ στην υψικάμινο μπορείτε να αναζητήσετε στο βιβλίο *Τεχνολογία Υλικών*, Π. Πετρόπουλου (επικαιροποίηση Σ. Παπαευθυμίου), εκδ. Ίδρυμα Ευγενίδου, 2017.



Όσο μεγαλύτερη είναι η ηλικία του γαιάνθρακα, τόσο πιο πολύ έχει προχωρήσει η απανθράκωση. Περιέχει δηλαδή μεγαλύτερη αναλογία άνθρακα, άρα έχει μεγαλύτερη θερμαντική αξία. Οι σπουδαιότερες κατηγορίες γαιάνθρακα είναι: **τύρφη, λιγνίτης, πισσούχος άνθρακας, ανθρακίτης**. Οι αδάμαντες, δεν είναι παρά η πιο σκληρή και συμπαγής μορφή καθαρού άνθρακα.

Ένας τρόπος ταξινόμησης των γαιανθράκων φαίνεται στον πίνακα 10.1. Στον πίνακα αυτό παρατηρούμε ότι η σύσταση των διαφόρων ειδών γαιανθράκων εκφράζεται με δύο τρόπους:

1) Με το δείγμα όπως είναι, δηλαδή χωρίς καμιά ιδιαίτερη επεξεργασία. Πρόκειται δηλαδή για τη στοιχειομετρική ανάλυση του καυσίμου.

2) Με τη σύσταση που προκύπτει ύστερα από απόσταση με την οποία το καύσιμο διασπάται σε δύο

προϊόντα στα **πτητικά** (φωταέριο) και στον **μόνιμο** άνθρακα.

Είναι φανερό από τη σύγκριση των δύο στηλών του πίνακα, ότι ο **μόνιμος άνθρακας** είναι λιγότερος από το στοιχειομετρικό άνθρακα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα **πτητικά** συστατικά περιέχουν και ενώσεις του άνθρακα (CO, υδρογονάνθρακες κλπ.). Στον πίνακα 10.2 δίνεται απλουστευμένη κατάταξη των γαιανθράκων σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D388-19a.

### 10.3 Κύρια χαρακτηριστικά των γαιανθράκων

#### 10.3.1 Θερμαντική ικανότητα

**Θερμαντική ικανότητα** ή **θερμογόνο δύναμη** ενός καυσίμου είναι η ποσότητα της θερμότητας που παράγεται κατά την τέλεια καύση του καυσίμου

**Πίνακας 10.1**  
**Ταξινόμηση γαιανθράκων κατά Grünnper**

| Είδος γαιάνθρακα                                 | Σύσταση % δείγματος χωρίς υγρασία και τέφρα |   |                   |                      |                  | Θερμαντική ικανότητα (kcal/kg)* | Εφαρμογές Παρατηρήσεις   |
|--|---|---|-------------------|----------------------|------------------|---------------------------------|--|
|  | 1) Σε δείγμα όπως έχει                      |   |                   | 2) Μετά από απόσταση |                  |                                 |  |
|  | C   | H | Λοιπά (O + N + S) | Πτητικά              | Μόνιμος άνθρακας |                                 |  |
| 1) Ανθρακίτες                                    | 92  | 4 | 4                 | 15                   | 85               | 8.000 – 9.000                   | α) Οικιακές χρήσεις<br>β) Παραγωγή ατμού   |
| 2) Λιθάνθρακες πισσούχοι (bituminous coal)       |   |   |                   |                      |                  |                                 |  |
| α) Βραχύφλογοι                                   | 85  | 5 | 10                | 20                   | 80               | 7.000 – 8.000                   | Επειδή περιέχουν λίγα πτητικά και σχηματίζουν σκληρό πλακούντα είναι οι καταλληλότεροι για παραγωγή κωκ. Χρησιμοποιούνται και σε εστίες ατμολεβήτων. |
| β) Μακρόφλογοι                                   | 80  | 5 | 15                | 35                   | 65               | 6.000 – 7.000                   | Λόγω των πολλών πτητικών είναι κατάλληλοι για παραγωγή φωταερίου κυρίως.   |
| 3) Λιθάνθρακες υποπισσούχοι (subbituminous coal) | 75  | 5 | 20                | 40                   | 60               | 5.000 – 6.000                   | Δεν συσσωματώνονται προς κωκ. Χρησιμοποιούνται σε καμίνια.   |
| 4) Λιγνίτης                                      | 65  | 5 | 30                | 45                   | 55               | 3.000 – 5.000                   | Μετά από κατάλληλη επεξεργασία χρησιμοποιείται σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.  |
| 5) Τύρφη   | 50  | 6 | 44                | 40-50                | 50-60            | 2.000 – 3.000                   | Ιδιαίτερη σημασία για τη χώρα μας έχουν τα κοιτάσματα τύρφης των Φιλιππων (Καβάλα), τα οποία έχουν αποδειχθεί εκμεταλλεύσιμα.                        |

\* Η θερμαντική ικανότητα αναφέρεται επίσης σε ξηρό δείγμα.

**Πίνακας 10.2**  
**Κατάταξη γαιανθράκων κατά ASTM D388-19a**

| Κατηγορία               | % περιεκτικότητα σε |             | Θερμαντική ικανότητα (ελαχ.) |               | Άλλα χαρακτηριστικά  |
|-------------------------|---------------------|-------------|------------------------------|---------------|--|
|                         | Μόνιμο άνθρακα (1)  | Πτητικά (1) | BTU/LB (2)                   | kJ/kg (2)     |  |
| 1) Ανθρακίτης           | 92–98               | 2–8         | –                            | –             | Δεν συσσωματώνονται  |
| 2) Ημιανθρακίτης        | 86–92               | 8–14        | –                            | –             | Δεν συσσωματώνονται  |
| 3) Πισσούχοι            | 78–86               | 14–22       |                              |               | Συνήθως συσσωματώνονται  |
| α) Χαμηλής πτητικότητας |                     |             |                              |               |  |
| β) Μέσης πτητικότητας   | 69–78               | 22–31       |                              | –             | Συνήθως συσσωματώνονται  |
| γ) Υψηλής πτητικότητας  | < 69                | > 31        | 14.000                       | 32.500        | Συνήθως συσσωματώνονται<br>Οι γαιάνθρακες της κατηγορίας αυτής μπορεί: |
| Κατηγορία Α             |                     |             |                              |               | α) Να συσσωματώνονται χωρίς να προσβάλλονται από αέρα                  |
| Κατηγορία Β             | –                   | –           | 13.000                       | 30.000        | β) Να συσσωματώνονται και να προσβάλλονται από αέρα                    |
| Κατηγορία Γ             |                     |             | 11.000                       | 25.500        | γ) Να μην συσσωματώνονται και να μην προσβάλλονται από αέρα            |
| 4) Υποπισσούχοι         |                     |             |                              |               |  |
| α) Κατηγορία Α          | < 69                |             | 11.000                       | 25.500        | Δεν συσσωματώνονται  |
| β) Κατηγορία Β          | < 69                | –           | 9.500                        | 22.000        | Δεν συσσωματώνονται  |
| γ) Κατηγορία Γ          | < 69                | –           | 8.300                        | 19.270        | Δεν συσσωματώνονται  |
| 5) Λιγνίτες             | –                   | –           | –                            | 14.630–19.270 | Δεν συσσωματώνονται  |

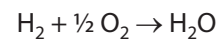
**Παρατήρησης:** Αναφέρεται σε δείγμα ξηρό, απαλλαγμένο από ανόργανες ουσίες (1) ξηρό δείγμα και (2) υγρό δείγμα.

αυτού κάτω από καθορισμένες συνθήκες. Αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα των γαιανθράκων, γιατί από αυτήν εξαρτάται κατά κύριο λόγο η ποιότητα και η αξία του. Μπορεί να κυμαίνεται σε ευρύτατα όρια (από 1.000 ως 8.800 kcal/kg) σε αντίθεση με το πετρέλαιο, όπου η διακύμανση της τιμής της θερμαντικής ικανότητας είναι πολύ μικρή.

Η μέτρηση της θερμαντικής ικανότητας γίνεται με τη θερμιδομετρική οβίδα (βλ. § 12.7). Το θερμιδόμετρο δίνει την τιμή της **ανώτερης θερμαντικής ικανότητας  $Q_A$** , της θερμότητας δηλαδή που παράγεται κατά την καύση στις συνθήκες του πειράματος, ενώ πολύ μεγαλύτερη σημασία έχει η **κατώτερη θερμαντική ικανότητα  $Q_K$** , που είναι η εκμεταλλεύσιμη θερμότητα και βρίσκεται από τη σχέση:

$$Q_K = Q_A - 600 \times 9 \times H \text{ kcal/kg}$$

όπου: Η είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε υδρογόνο (kg H/kg καυσίμου). Ο αριθμός 600 είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού, που σχηματίζεται από την καύση του υδρογόνου που περιέχει το καύσιμο. Το παραγόμενο υπό μορφή υδρατμού νερό είναι 9πλάσιο του υδρογόνου, όπως προκύπτει από την εξίσωση καύσης του υδρογόνου.



Όπως αποδείχτηκε στην παράγραφο 9.1 για κάθε 1,00 kg  $H_2$  απαιτεί για την καύση του 8,00 kg  $O_2$  και παράγονται 9,00 kg  $H_2O$ . Αυτά κατακρατούν  $9 \times 600 = 5.400$  kcal, το οποίο είναι το ποσό της θερμότητας που κατακρατείται για κάθε kg  $H_2$ .

Ο προσδιορισμός αυτός της θερμαντικής ικανότητας των καυσίμων δεν λαμβάνει υπόψη την υγρασία

που το καύσιμο μπορεί να παράγει και ονομάζεται **θερμαντική ικανότητα επί ξηρού**, είναι δε ο συνηθισμένος τρόπος έκφρασης της θερμαντικής ικανότητας των στερεών καυσίμων.



### Παράδειγμα

Αν για ένα δείγμα λιγνίτη που περιέχει 8% υδρογόνο το θερμιδόμετρο δίνει θερμαντική ικανότητα 3.000 kcal/kg, η πραγματική θερμαντική ικανότητα, δηλαδή η κατώτερη,  $Q_k$ , θα είναι:

$$Q_k = 3.000 - 600 \cdot 9 \cdot 0,08 = 3.000 - 432 = 2.568 \text{ kcal/kg (επί ξηρού)}$$

### 10.3.2 Υγρασία

Αυτή προσδιορίζεται θερμαίνοντας ορισμένη ποσότητα δείγματος επί ορισμένο χρόνο σε 105°C. Η διαφορά βάρους αναγόμενη σε % αντιστοιχεί στην περιεχόμενη υγρασία του δείγματος. Πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ της **φυσικής υγρασίας** που περιέχεται στο καύσιμο, και της **ξένης υγρασίας**, που προέρχεται από εξωτερικές πηγές (διαβροχή με νερό, βροχή, συμπύκνωση υδρατμών κ.λπ.). Η φυσική υγρασία δεν φαίνεται μακροσκοπικά, ενώ η ξένη υγρασία διακρίνεται εύκολα με το μάτι. Για τη μέτρηση της ξένης υγρασίας το δείγμα ξηραίνεται στον αέρα στη θερμοκρασία δωματίου, τόση ώρα ώστε να μην παρατηρείται απώλεια βάρους. Η ξένη υγρασία που προσδιορίζεται με τον τρόπο αυτό είναι γνωστή και ως **απώλεια ξήρανσης στον αέρα** (air-drying loss). Αν δεν προηγηθεί η φυσική αυτή ξήρανση για τη μέτρηση της ξένης υγρασίας, τότε στους 105°C προσδιορίζεται η ολική υγρασία του δείγματος. Στην πράξη ενδιαφέρει κυρίως η φυσική υγρασία, γιατί η ξένη υγρασία απομακρύνεται εύκολα και κατά την απλή αποθήκευση των γαιανθράκων.

### 10.3.3 Πτητικά

Είναι τα συστατικά εκείνα των γαιανθράκων, που με την έναρξη της καύσης αποστάζουν και καίγονται σαν αέρια. Πρέπει επομένως ο χώρος της εστίας να είναι ανάλογος προς την περιεκτικότητα σε πτητικά, ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης καύση. Γι' αυτόν το λόγο η περιεκτικότητα των γαιανθράκων σε πτητικά πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη σχεδίαση της εστίας και του καπνοθαλάμου των γαιανθρακολεβήτων.

### 10.3.4 Τέφρα

Η τιμή της τέφρας που περιέχεται σε ένα στερεό καύσιμο έχει ιδιαίτερη σημασία τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Ειδικότερα:

1) **Ποσοτικά** η περιεκτικότητα σε τέφρα δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα ανώτατο όριο που οι προδιαγραφές καθορίζουν, γιατί *πρώτον* μειώνει τη θερμαντική αξία του καυσίμου και *δεύτερον* η αποκομιδή της δημιουργεί σοβαρά προβλήματα.

2) **Ποιοτικά** ενδιαφέρει κυρίως το σημείο τήξης της τέφρας, για το οποίο οι προδιαγραφές καθορίζουν μία κατώτατη τιμή. Κάτω από την τιμή αυτή δημιουργούνται στη σχάρα της εστίας συσσωματώματα λόγω τήξης της τέφρας, που εμποδίζουν την ομαλή λειτουργία της εστίας του λέβητα. Ο προσδιορισμός της τέφρας συνίσταται στον προσδιορισμό του ανόργανου υπολείμματος που απομένει μετά την τέλεια καύση ορισμένης ποσότητας δείγματος.

### 10.3.5 Θείο

Το θείο είναι καύσιμο συστατικό που αποδίδει 2.500 kcal/kg. Παρόλα αυτά η παρουσία του στους γαιάνθρακες σε αναλογία πάνω από 4% είναι ανεπιθύμητη λόγω της διαβρωτικότητας του θειικού οξέος που παράγεται κατά την καύση.

### 10.3.6 Ανθεκτικότητα

Αφορά στην αντοχή που έχει ο γαιάνθρακας στη σύνθλιψη που υφίσταται σε μία εστία λέβητα ή σε μία μεταλλουργική κάμινο. Ελέγχεται περιστρέφοντας ορισμένη ποσότητα γαιάνθρακα σε κυλινδρικό δοχείο που είναι τοποθετημένο οριζόντια για ορισμένο χρόνο και με ορισμένη ταχύτητα. Στο τέλος μετριέται ο επερχόμενος βαθμός κονιοποίησης (δηλ. της μετατροπής σε σκόνη), τα όρια του οποίου καθορίζουν οι σχετικές προδιαγραφές.

### 10.3.7 Πτητικά – Μόνιμος άνθρακας

Τα πτητικά συστατικά που ο γαιάνθρακας περιέχει (βλ. § 10.3.3) προσδιορίζονται θερμαίνοντας ορισμένη ποσότητα δείγματος, επί 7 λεπτά σε ειδική κάμινο σε 950°C. Αν από την απώλεια βάρους αφαιρεθεί η υγρασία (βλ. § 10.3.2) το υπόλοιπο αντιστοιχεί στην περιεκτικότητα των πτητικών συστατικών του γαιάνθρακα.

Ο μόνιμος άνθρακας (μ.α.) σε εκατοστιαία αναλογία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$(\mu.α.) = 100 - (\text{υγρασία} + \text{πτητικά} + \text{τέφρα})$$

## 10.4 Η αυτανάφλεξη των γαιανθράκων

Όλα σχεδόν τα είδη γαιανθράκων κατά την αποθήκευσή τους έχουν την τάση να απορροφούν αργά οξυγόνο από την ατμόσφαιρα, πράγμα που οδηγεί σε μία μορφή **οξειδωσης** από την οποία παράγεται θερμότητα. Η θερμότητα αυτή προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας, που επιταχύνει την παραπάνω αντίδραση μέχρι του σημείου που να συμβεί **αυτανάφλεξη**. Το φαινόμενο αυτό, που μπορεί να πάρει καταστρεπτικές διαστάσεις είναι εντονότερο στους λιγνίτες και πισσούχους άνθρακες.

Συνηθέστερα μέσα κατά της αυτανάφλεξης είναι:

1) Το δάπεδο του χώρου, στον οποίο αποθηκεύονται οι γαιάνθρακες να είναι κατά το δυνατόν ξερό (πετρώδες ή μπετόν).

2) Το ύψος των σωρών των γαιανθράκων να μην υπερβαίνει τα 4-5 m.

3) Να υπάρχουν διάδρομοι αερισμού.

4) Να παρακολουθείται η θερμοκρασία στα διάφορα σημεία των σωρών. Μία ασυνήθιστη αύξηση της θερμοκρασίας προδίδει συχνά την έναρξη αυτανάφλεξης.

Πέρα όμως από τα παραπάνω πρέπει στους χώρους αποθήκευσης γαιανθράκων να εξασφαλίζονται επαρκή μέσα αντιμετώπισης πυρκαγιάς και αν είναι δυνατόν αυτόματης ανίχνευσής της.

## 10.5 Σημασία των γαιανθράκων ως πηγή ενέργειας

Σήμερα οι γαιάνθρακες και γενικότερα τα στερεά καύσιμα καλύπτουν περίπου το 20% των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας, ποσοστό αρκετά υψηλό, που τους φέρνει στην τρίτη θέση σπουδαιότητας, μετά το πετρέλαιο και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Βέβαια η πρόωση πλοίων με γαιάνθρακες έχει εγκαταλειφθεί εδώ και πολλές δεκαετίες, χάρη στα πλεονεκτήματα του πετρελαίου, σε σύγκριση με τους γαιάνθρακες και μάλιστα στις μηχανές ατμού (λέβητες), όπως έχει εκτεθεί στην παράγραφο 7.1.

Τα τελευταία 30 χρόνια διεξήχθησαν πολλές έρευνες για τη βελτίωση των μεθόδων και συνθηκών εκμετάλλευσης γαιανθράκων για τον αποδοτικότερο τρόπο παραγωγής ενέργειας. Τα συμπεράσματα από τις έρευνες αυτές είναι ότι το κάρβουνο παραμένει σημαντική πηγή ενέργειας παρά τα προβλήματα που δημιουργεί στο περιβάλλον (ρύπανση μέσω CO<sub>2</sub>) και θα παραμείνει έτσι τουλάχιστο για την επόμενη εικοσαετία (έως το 2040).

## 10.6 Αξιοποίηση του άνθρακα για παραγωγή ενέργειας

### 10.6.1 Καύση σε στερεή μορφή

Ο απλούστερος τρόπος χρησιμοποίησης των γαιανθράκων για την παραγωγή ενέργειας είναι η καύση του σε στερεή κατάσταση, κατά την οποία αποδίδονται 1.000 ως 8.000 kcal/kg, ανάλογα με τον βαθμό και την ποιότητα του γαιάνθρακα (πίν. 10.2). Η καύση γίνεται σε εστίες, όπου η παραγόμενη θερμότητα είτε χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού είτε για διάφορες άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Για πάρα πολλά χρόνια η διαδικασία αυτή αποτελούσε τη βάση για τη λειτουργία των μηχανών ατμού σε πλοία και σιδηροδρόμους, ώσπου ήρθε το πετρέλαιο και τα προϊόντα του για να εκτοπίσει το κάρβουνο από τις παραπάνω εφαρμογές, χάρη στα αναμφισβήτητα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το πετρέλαιο έναντι των γαιανθράκων.

Η καύση των γαιανθράκων σε εστίες ή καμίνια έχει το πλεονέκτημα να μην χρειάζεται παρά απλές μόνον εγκαταστάσεις, αλλά συνοδεύεται από πολύ χαμηλή απόδοση και από υψηλό βαθμό ρύπανσης του περιβάλλοντος. Για τη βελτίωση της απόδοσης και γενικότερα των μεθόδων καύσης των γαιανθράκων, σήμερα εφαρμόζονται δυο μέθοδοι: η **καύση υπό μορφή σκόνης** και η μέθοδος του **ρευστοποιημένου στρώματος**.

#### 1) Καύση υπό μορφή σκόνης

Κατά τη μέθοδο αυτή ο άνθρακας μετατρέπεται σε σκόνη μέχρις ότου το μέγεθος των κόκκων της σκόνης φτάσει στα 75 έως 300 μm και διοχετεύεται με ρεύμα αέρα σε καυστήρες, που λειτουργούν, όπως και οι καυστήρες πετρελαίου, με τη μεγαλύτερη απόδοση καύσης σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους καύσης του άνθρακα, γιατί η χρησιμοποιούμενη περισσεια αέρα είναι η μικρότερη δυνατή.

Η καύση του γαιάνθρακα υπό μορφή σκόνης παρουσιάζει δυο κυρίως **πλεονεκτήματα** σε σύγκριση με το πετρέλαιο.

1) Η καύση των ανθράκων με πολλά πτητικά δίνει μακρά φλόγα, στην οποία η καύση των υπολειμμάτων του άνθρακα διαρκεί περισσότερο από την καύση των υπολειμμάτων του μαζούτ (μακρόφλογοι άνθρακες).

2) Η παρουσία στερεών σωματιδίων ενισχύει τη θερμαντικότητα της φλόγας, παραμένει όμως το μει-

ονέκτημα της τέφρας, που πολλές φορές μπορεί να δημιουργήσει διαβρωτικές αποθέσεις στους αυλούς και γενικά στα σημεία στα οποία γίνεται η εναλλαγή της θερμότητας.

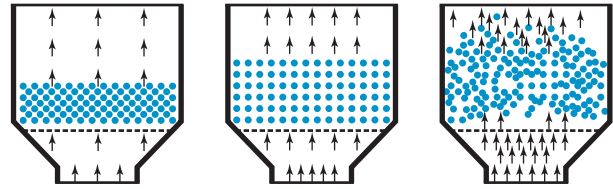
## 2) Μέθοδος ρευστοποιημένου στρώματος (fluidised bed combustion)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί τη σύγχρονη τεχνολογία στον τομέα της αξιοποίησης των γαιανθράκων για την παραγωγή ενέργειας και επιδιώκει:

- Τη μείωση του κόστους των εγκαταστάσεων.
- Τη δυνατότητα καύσης μεγάλης ποικιλίας γαιανθράκων.
- Καλύτερο έλεγχο ρύπανσης του περιβάλλοντος.

Η αρχή του ρευστοποιημένου στρώματος φαίνεται στο σχήμα 10.1.

Η εστία καύσης αποτελείται από μια σχάρα πάνω στην οποία υπάρχει στρώμα αδρανούς υλικού (π.χ. άμμου) σε μορφή κόκκων μέσα από τους οποίους εμφοσάται από κάτω ο αέρας μαζί με τον άνθρακα σε μορφή σκόνης. Αυξάνοντας την ταχύτητα του αέρα (διαδοχικές φάσεις Α-Β-Γ), πετυχαίνουμε τον στροβιλισμό των κόκκων του αδρανούς υλικού και μια δυναμική ισορροπία, έχοντας τη μορφή και τις ιδιότητες **ρευστού σε βρασμό**. Αν το υλικό αυτό θερμαίνεται, ο κοκκοποιημένος άνθρακας που διοχετεύεται μαζί με τον αέρα, καίγεται με μεγάλη ταχύτητα και όλη η μάζα αποκτά μια ομοιόμορφη υψηλή θερμοκρασία. Το σύστημα αυτό αποτελεί την πιο απλή περίπτωση **εστίας με ρευστοποιημένο στρώμα** που βρίσκει ολοένα με-



Σχ. 10.1

Αρχή «ρευστοποιημένου στρώματος»

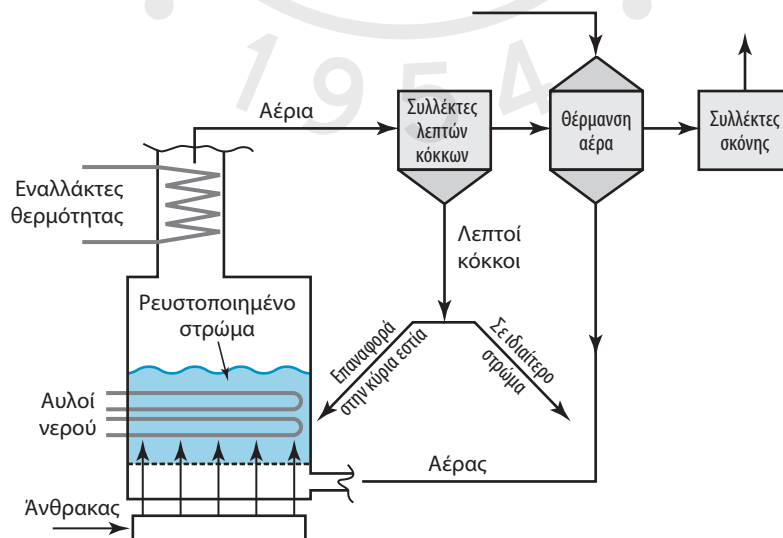
γαλύτερη εφαρμογή σε πειραματικές μονάδες παραγωγής ενέργειας από άνθρακα.

Μια τυπική διάταξη ατμολέβητα που λειτουργεί με τη μέθοδο του ρευστοποιημένου στρώματος απεικονίζεται στο σχήμα 10.2.

### 10.6.2 Υγροποίηση του άνθρακα

**Υγροποίηση** του άνθρακα είναι η μετατροπή του σε υγρά καύσιμα, των οποίων η σύσταση και οι ιδιότητες είναι παρόμοιες προς τις ιδιότητες των υδρογονανθράκων, δηλαδή των προϊόντων του φυσικού πετρελαίου, το οποίο μπορούν να υποκαταστήσουν.

Η σημασία των υγρών καυσίμων που παράγονται από την υγροποίηση του άνθρακα είναι τεράστια, αφού τα καύσιμα αυτά μπορούν να υποκαθιστούν τα προϊόντα του φυσικού πετρελαίου. Επί του παρόντος η χρήση τους είναι περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους σε σύγκριση με το πετρέλαιο. Από την άλλη μεριά όμως πρέπει να σημειωθεί ότι τα συνθετικά καύσιμα έχουν σε αρκετές περιπτώσεις ιδιότητες καλύτερες από τα προϊόντα του φυσικού πετρελαίου, γιατί οι ιδιότητες αυτές μπορούν να κατευθύνονται προς την



Σχ. 10.2

Διάταξη ατμολέβητα με την μέθοδο ρευστοποιημένου στρώματος

επιθυμητή περιοχή κατά τη διαδικασία της παραγωγής.

Οι σπουδαιότερες μέθοδοι παραγωγής συνθετικών καυσίμων με υδροποίηση του άνθρακα είναι οι ακόλουθες:

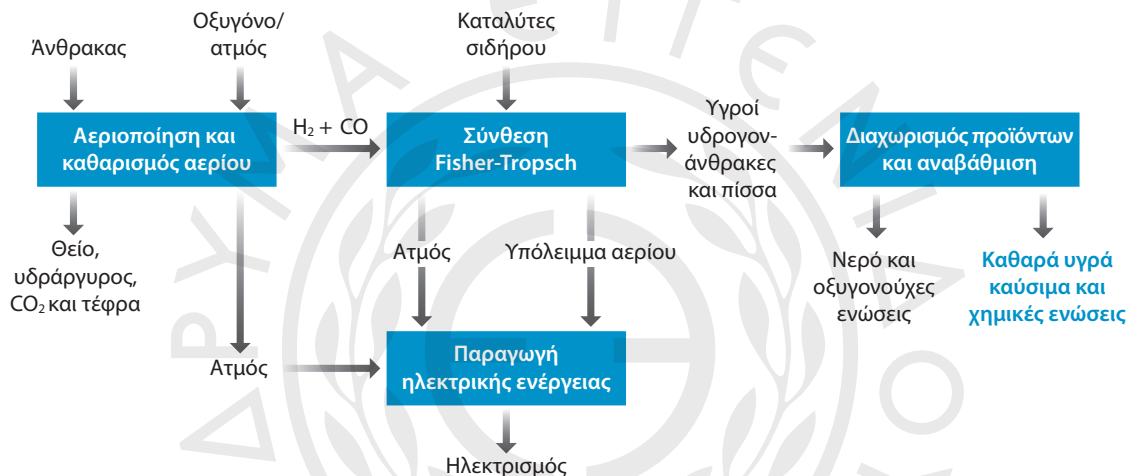
### 1) Μέθοδος Fischer-Tropsch

Κατά τη μέθοδο αυτή (σχ. 10.3) ο άνθρακας εξαεριώνεται πρώτα με την μέθοδο Lurgi. Τα αέρια που παράγονται και κυρίως το μονοξείδιο του άνθρακα CO και το υδρογόνο H<sub>2</sub> υποβάλλονται σε καταλυτική σύνθεση, από την οποία παράγεται μείγμα υδρογονανθράκων και αλκοολών. Ύστερα από μια σειρά καθαρισμών και από υδρογόνωση, παράγεται, ως κύριο

προϊόν, καύσιμο ανάλογο ως προς τις ιδιότητες προς το βαρύ diesel, και ως υποπροϊόντα: αέρια πίσσα και κωκ. Η απόδοση της μεθόδου αυτής είναι χαμηλή και κυμαίνεται στο 20%.

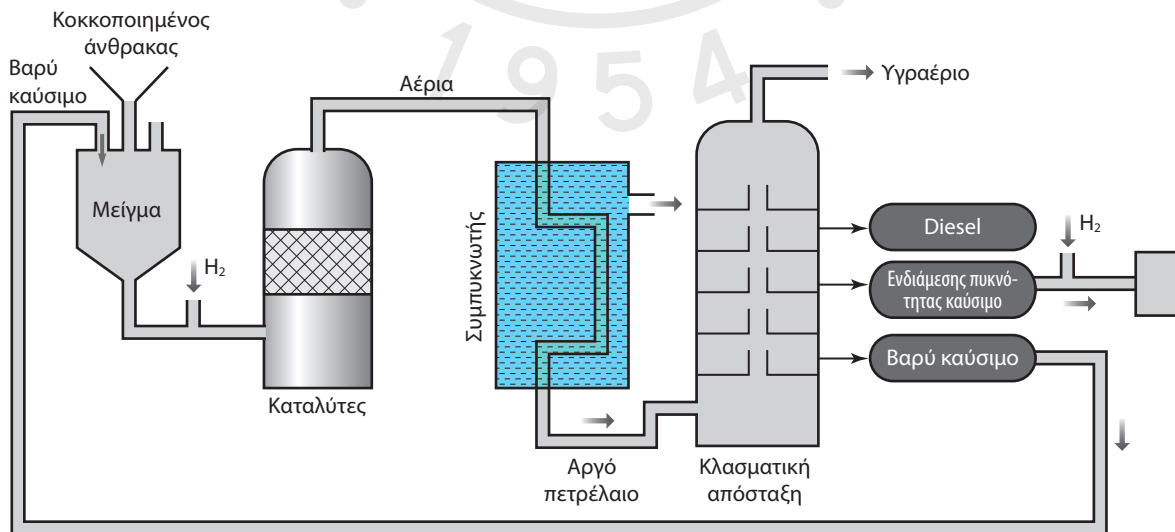
### 2) Ξηρή απόσταξη (πυρόλυση)

Ο άνθρακας κατά τη μέθοδο αυτή (σχ. 10.4) υποβάλλεται σε πύρωση σε κλειστές εστίες με υψηλή θερμοκρασία, κατά τρόπο ανάλογο με την παραγωγή του φωταερίου. Από τα πτητικά προϊόντα της πυρόλυσης διαχωρίζονται με κατάλληλη επεξεργασία τα υγρά προϊόντα, που αποτελούν το κύριο προϊόν, ενώ ως υποπροϊόντα παράγονται πάλι αέρια, πίσσα και



Σχ. 10.3

Διάταξη παραγωγής καυσίμων με την μέθοδο Fischer-Tropsch



Σχ. 10.4

Διάταξη πυρόλυσης για παραγωγή καυσίμων

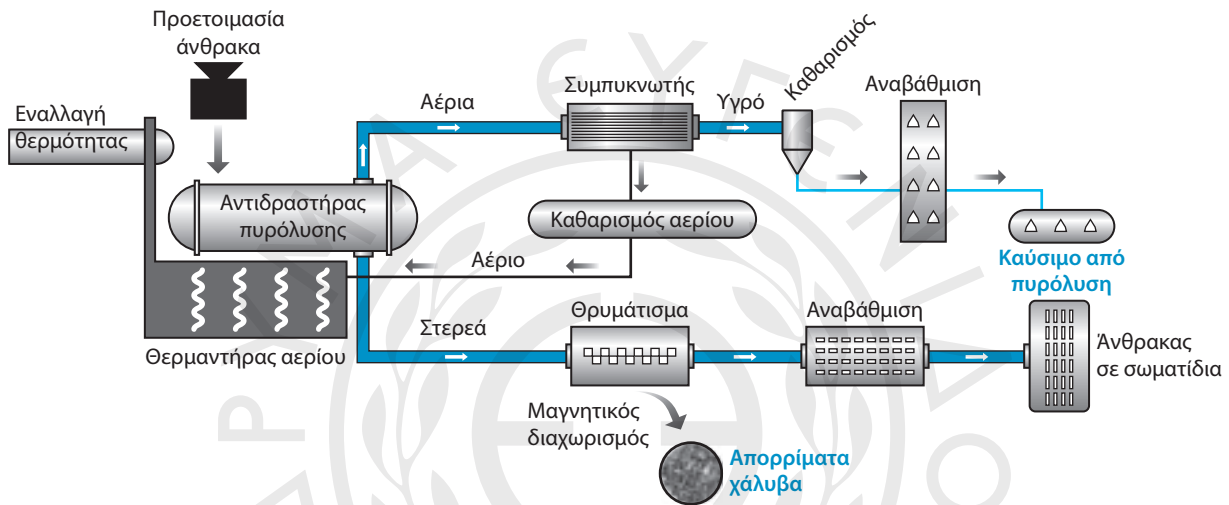
κωκ. Η απόδοση και της μεθόδου αυτής είναι χαμηλή και δεν υπερβαίνει το 15%.

### 3) Υδρογόνωση

Αποτελεί την καθ' αυτό συνθετική μέθοδο παραγωγής υγρών καυσίμων, αφού συνίσταται στην απευθείας ένωση άνθρακα και υδρογόνου. Σύμφωνα με τη μέθοδο Bergius (σχ. 10.5), που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1913, η υδρογόνωση του άνθρακα, δηλαδή η ένωση άνθρακα και υδρογόνου, επιτεύχθηκε διοχετεύοντας υδρογόνο, σε λεπτό κολλοειδές αι-

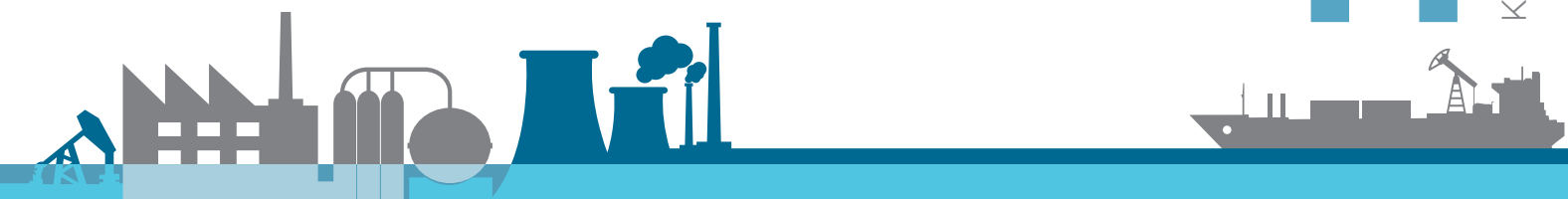
ώρημα άνθρακα σε μαζούτ. Η αντίδραση γίνεται σε υψηλή θερμοκρασία με πίεση 700 bar και με καταλύτη οξειδία του σιδήρου. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε απ' τους Γερμανούς στο 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο για την παραγωγή συνθετικής βενζίνης.

Από τα παραπάνω μπορεί εύκολα να συμπεράνει κάποιος ότι ο ρόλος του άνθρακα για την αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος της ανθρωπότητας είναι σημαντικός. Σήμερα βέβαια η έμφαση έχει στραφεί στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η χρήση του άνθρακα θα περιορίζεται συνεχώς.



Σχ. 10.5

Διάταξη υδρογόνωσης κατά Bergius για την παραγωγή καυσίμων



## 11.1 Σημασία των αερίων καυσίμων

Η χρήση των αερίων καυσίμων ως πηγών ενέργειας ήταν μέχρι πριν μερικά χρόνια πολύ περιορισμένη, κυρίως λόγω των σοβαρών προβλημάτων που παρουσίαζε η μεταφορά και αποθήκευση των καυσίμων αυτών. Με την κατασκευή και επέκταση όμως των δικτύων μεταφοράς τους και κυρίως του **φυσικού αερίου**, που είναι το σπουδαιότερο καύσιμο της κατηγορίας αυτής, τα αέρια καύσιμα απέκτησαν τεράστια σημασία, αφού σήμερα η συμμετοχή τους στην παγκόσμια κάλυψη των ενεργειακών αναγκών είναι περίπου 15%. Πρώτα στις ΗΠΑ αναπτύχθηκε τεράστιο δίκτυο διανομής του φυσικού αερίου, που χρησιμοποιείται κυρίως για βιομηχανικούς και οικιακούς σκοπούς. Ήδη στην Ευρώπη λειτουργούν αγωγοί φυσικού αερίου, που διοχετεύουν φυσικό αέριο από τα τεράστια αποθέματα της Ρωσίας προς τα κέντρα κατανάλωσης διαφόρων ευρωπαϊκών χωρών.

Τα αέρια καύσιμα χρησιμοποιούνται κυρίως για θερμαντικούς σκοπούς αλλά και για τη λειτουργία των λεγόμενων **αεριομηχανών ή μηχανών διπλού καυσίμου** (dual fuel engines). Οι δεύτερες είναι βασικά μηχανές diesel ή βενζινομηχανές που είναι κατασκευασμένες για να λειτουργούν αντίστοιχα με πετρέλαιο diesel ή με βενζίνη, αλλά και με αέριο, όταν η χρήση του καυσίμου αυτού είναι συμφέρουσα, όπως συμβαίνει σε περιοχές όπου το φυσικό αέριο εξάγεται από τη γη ή σε περιοχές κοντά σε διυλιστήρια, όπου τα αέρια καύσιμα αποτελούν πολύτιμα υποπροϊόντα με σχετικά χαμηλό κόστος.

Οι μηχανές διπλού καυσίμου είναι απλής κατασκευής, σε ελάχιστες δε λεπτομέρειες διαφέρουν από τις συνηθισμένες πετρελαιομηχανές του ίδιου τύπου. Η αρχή λειτουργίας τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους των πετρελαιομηχανών: δίχρονες, τετράχρονες με ή χωρίς υπερτροφοδότηση. Προσοχή χρειάζεται μόνο στη σωστή ρύθμιση του χρόνου εισαγωγής στον κύλινδρο της μηχανής. Άκαιρη εισαγωγή μπορεί να οδηγήσει σε πιέσεις που ίσως

προκαλέσουν προανάφλεξη του καυσίμου.

Τα αέρια καύσιμα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες στα **φυσικά αέρια καύσιμα**, που αυτούσια βγαίνουν από τη γη ή που συνοδεύουν το φυσικό πετρέλαιο και στα **τεχνητά αέρια**, που είναι προϊόντα επεξεργασίας διαφόρων πρώτων υλών.

## 11.2 Φυσικό αέριο καύσιμο

Είναι το αέριο που εξάγεται από τις πετρελαιοπηγές και έχει σύσταση ανάλογη με του φυσικού πετρελαίου. Αποτελείται δηλαδή κυρίως από υδρογονάνθρακες από τους οποίους σημαντικότερος είναι το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>).

Κατά μέσο όρο η χημική του σύσταση είναι:

|                        |        |
|------------------------|--------|
| Μεθάνιο                | 80–90% |
| Αιθάνιο                | 5–10%  |
| Λοιποί υδρογονάνθρακες | 1–5%   |
| Άζωτο                  | 0,5–5% |
| CO <sub>2</sub>        | 0–1%   |
| Λοιπά συστατικά        | 0–3%   |

Η θερμαντική ικανότητα του φυσικού αερίου είναι περίπου 10.500 kcal/m<sup>3</sup>, δηλαδή 44.000 kJ/m<sup>3</sup>.

Το φυσικό αέριο προορίζεται κυρίως για βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές, αλλά και για τη λειτουργία των μηχανών διπλού καυσίμου. Διακινείται κυρίως με υπόγειους μεταλλικούς αγωγούς, από τους οποίους σημαντικότεροι είναι:

1) Το τεράστιο δίκτυο των ΗΠΑ με συνολικό μήκος 3 εκατομμυρίων μιλίων χωρίς να υπολογίζονται οι αγωγοί που ενώνουν τους σταθμούς παραγωγής φυσικού αερίου με τις δεξαμενές αποθήκευσης.

2) Ο υποβρύχιος αγωγός που μεταφέρει φυσικό αέριο από την Αλγερία στην Ισπανία μέσω Μαρόκου κάτω από τη Μεσόγειο. Υπάρχει προοπτική ο αγωγός αυτός να επεκταθεί και σ' άλλες χώρες της Ευρώπης.

3) Ο αγωγός Nord Stream (όπως είχε προβλεφθεί το 2021), που θα μεταφέρει φυσικό αέριο από τη Σι-



βηρία προς τη Γερμανία και άλλες χώρες της Ευρώπης περνώντας κάτω από τη Βαλτική Θάλασσα.

Το **υγροποιημένο φυσικό αέριο** (Liquified Natural Gas – LNG) είναι φυσικό αέριο που έχει ψυχθεί σε υγρό, προκειμένου να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί. Για να συμπυκνωθεί σε υγρή μορφή, το φυσικό αέριο ψύχεται περίπου σε ατμοσφαιρική πίεση κάτω από  $-160^{\circ}\text{C}$ . Στη μεταφορά του η μέγιστη πίεση ορίζεται σχεδόν στα 2,5 bar.

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο μπορεί να αποθηκευτεί αρχικά σε ειδικές δεξαμενές με ισχυρή θερμική μόνωση και εξαιρετικά ισχυρή αντοχή έναντι διαρροών. Αυτές βρίσκονται σε ειδικούς τερματικούς σταθμούς LNG, που είναι εγκαταστάσεις εκφόρτωσης, αποθήκευσης, επανεξάτμισης και αποστολής του LNG στο δίκτυο μεταφοράς. Για τη μεταφορά του χρησιμοποιούνται δεξαμενόπλοια προηγμένης τεχνολογίας, που κατασκευάζονται για την εξυπηρέτηση μακροχρόνιων συμβάσεων για τη μεταφορά LNG.

Το LNG ως καύσιμο παρουσιάζει τις χαμηλότερες εκπομπές  $\text{CO}_2$  από όλα τα ορυκτά καύσιμα, προϊόντα του φυσικού πετρελαίου. Αυτό γίνεται γιατί το βασικό του συστατικό, το μεθάνιο, προσφέρει τη μικρότερη αναλογία σε άνθρακα από όλους τους υδρογονάνθρακες. Οι μειωμένες εκπομπές είναι έως και 20% σε σχέση με αυτές των υγρών καυσίμων, ενώ έχει μηδενικές εκπομπές οξειδίων του θείου ( $\text{SO}_x$ ) και ελάχιστες εκπομπές οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ). Για όλους αυτούς τους λόγους η χρήση του προωθείται διεθνώς.

Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια το LNG βρίσκει εφαρμογή και ως ναυτιλιακό καύσιμο μέσω της συνδυασμένης καύσης LNG με συμβατικά ναυτιλιακά καύσιμα (που αναφέρθηκαν στο κεφ. 8). Κατάλληλες διατάξεις πάνω στο πλοίο αναπτύσσονται για να επιτρέψουν την αξιοποίηση του LNG ως οικονομικού και περιβαλλοντικά αποδεκτού καυσίμου.

### 11.3 Τεχνητά αέρια καύσιμα

Τα καύσιμα της κατηγορίας αυτής προέρχονται από άλλες πρώτες ύλες. Σπουδαιότερα από αυτά είναι τα ακόλουθα:

#### 11.3.1 Φωταέριο (town gas)

Παράγεται κατά την **ξηρή απόσταξη** των λιθανθράκων. Κατ' αυτήν οι λιθάνθρακες πυρώνονται σε  $1.000^{\circ}\text{C}$  περίπου σε κλειστές εστίες, χωρίς αέρα, οπότε διασπώνται σε δύο συστατικά:

1) Σε αέρια που αποτελούνται από υδρογονάν-

θρακες, υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία, ναφθαλινη, βενζόλιο, πίσσα κλπ. Απ' αυτά, ύστερα από μια σειρά επεξεργασιών, απομονώνεται το φωταέριο, ενώ σαν υποπροϊόντα παράγονται: ναφθαλινη, λιθανθρακόπισσα κ.λπ.

2) Στο στερεό υπόλειμμα της απόσταξης, που είναι το κωκ, υλικό πολύτιμο κυρίως για τη μεταλλουργία.

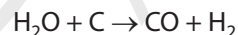
Η σύνθεση του παραγόμενου με αυτόν τον τρόπο φωταερίου είναι:

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Υδρογόνο                        | 36–50% |
| Μεθάνιο                         | 30–40% |
| Μονοξείδιο του άνθρακα          | 4–9%   |
| Άζωτο                           | 1–6%   |
| Οξυγόνο                         | 0,5–1% |
| Λοιποί υδρογονάνθρακες          | 2–8%   |
| Άλλα συστατικά (υδρόθειο κ.λπ.) | 0,1–1% |

Η χρήση του φωταερίου περιορίζεται κυρίως σε οικιακές εφαρμογές. Ως πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται επίσης σε σιδηροβιομηχανίες όπου σαν υποπροϊόν παραγωγής μεταλλουργικού κωκ παράγεται σε μεγάλα ποσά.

#### 11.3.2 Υδαταέριο (water gas)

Είναι μείγμα μονοξειδίου του άνθρακα  $\text{CO}$  και υδρογόνου  $\text{H}_2$  σε ισομοριακή αναλογία, που παράγεται διοχετεύοντας υδρατμούς πάνω από διάλυρο άνθρακα:



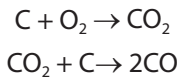
Ως πρώτη ύλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν γαιάνθρακες οποιοσδήποτε κατηγορίας. Στην Ελλάδα το υδαταέριο παράγεται από τους λιγνίτες της Πτολεμαΐδας. Χρησιμοποιείται για τη συνθετική παραγωγή αμμωνίας, που αποτελεί τη βάση των αζωτούχων λιπασμάτων, σε μια μεγάλη βιομηχανική μονάδα, που είναι εγκαταστημένη στην περιοχή αυτή και εξασφαλίζει για την ελληνική γεωργία το μεγαλύτερο μέρος των αζωτούχων λιπασμάτων.

Σαν αέριο καύσιμο έχει σημαντικές βιομηχανικές εφαρμογές με θερμαντική ικανότητα  $1.800\text{--}2.200 \text{ kcal/m}^3$  ή  $7.500\text{--}9.200 \text{ kJ/m}^3$ .

#### 11.3.3 Φτωχό αέριο (producer gas)

Αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα και άζωτο και γι' αυτό είναι πτωχό σε θερμίδες, πράγμα στο οποίο οφείλεται και η ονομασία του. Παράγεται κατά την **ατελή** καύση του άνθρακα σε ειδικές

εγκαταστάσεις που ονομάζονται **αεριογόνα** (gazo-genes). Η βασική χημική αντίδραση που γίνεται στην περίπτωση αυτή είναι:



Για την παραγωγή του φτωχού αερίου, αέρας ή οξυγόνο διαβιβάζονται σε στρώμα άνθρακα, στη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η αντίδραση είναι εξώθερμη, δηλαδή συνοδεύεται από παραγωγή θερμότητας, και η όλη διαδικασία παραγωγής του φτωχού αερίου είναι συνεχής. Χρησιμοποιείται σαν αέριο καύσιμο, με θερμαντική ικανότητα γύρω στα 1.000 kcal/m<sup>3</sup> ή 4.180 kJ/m<sup>3</sup>.

Τόσο το υδαταέριο όσο και το φτωχό αέριο ανήκουν στα αέρια καύσιμα, που παράγονται κατά την **εξαερίωση** του άνθρακα, που περιέχεται στα στερεά καύσιμα. Η διεργασία αυτή ανοίγει μεγάλες προοπτικές για την αξιοποίηση των τεράστιων αποθεμάτων γαιάνθρακα. Και τα δυο αέρια μπορούν να παράγονται σήμερα συγχρόνως ή διαδοχικά σε σύγχρονες βιομηχανικές μονάδες. Σ' αυτές αέρας και/ή υδρατμός διοχετεύονται σε στρώμα γαιανθράκων, οπότε τα δύο αέρια μπορούν να παράγονται ταυτόχρονα. Η απόδοση των εγκαταστάσεων αυτών μπορεί να αυξάνεται με δυο τρόπους:

- 1) Με λειτουργία υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και
- 2) διοχετεύοντας οξυγόνο αντί για αέρα.

Τα προϊόντα εξαερίωσης του άνθρακα και η διαδικασία παραγωγής τους είναι καλύτερα αν αντί για γαιάνθρακες χρησιμοποιείται σαν πρώτη ύλη το κωκ.

Οι γαιάνθρακες συχνά δημιουργούν προβλήματα από την τάση σχηματισμού συσσωματωμάτων που δυσχεραίνει τη λειτουργία της εγκατάστασης.

Σαν πρώτη ύλη και των δυο αερίων χρησιμοποιούνται επίσης βαριά καύσιμα. Ο πίνακας 11.1 δίνει τα κύρια χαρακτηριστικά του φτωχού αερίου και του υδαταερίου.

Το υδαταέριο, καθώς και τα άλλα προϊόντα της εξαερίωσης του άνθρακα, βρίσκουν επίσης μεγάλη εφαρμογή για την παραγωγή διάφορων συνθετικών προϊόντων και κυρίως συνθετικών καυσίμων (βλ. § 10.6).

### 11.3.4 Υγραέρια

Είναι γνωστά ως **LPG** (Liquified Petroleum Gases) και αποτελούν τα πρώτα κλάσματα της διύλισης του φυσικού πετρελαίου. Πρόκειται κυρίως για βουτάνιο (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) και προπάνιο (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) και διατίθενται στο εμπόριο είτε χωριστά είτε σαν μείγμα των δύο σε διάφορες αναλογίες. Στη συνηθισμένη θερμοκρασία είναι αέρια, εύκολα όμως υγροποιούνται με μικρή πίεση. Υγροποιημένα κυκλοφορούν στο εμπόριο, συνήθως σε χαλύβδινες φιάλες, γεγονός στο οποίο οφείλουν το όνομά τους. Ο τρόπος αυτός διακίνησης επιτρέπει την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων θερμικής ενέργειας σε μικρό χώρο. Ένας όγκος υγροποιημένου προπάνιου δίνει κατά την εξαερίωση του 270 όγκους αερίου.

Τα υγραέρια χρησιμοποιούνται ευρύτατα:

- 1) Για βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές,
- 2) σαν καύσιμα βενζινομηχανών και
- 3) για εργασίες κοπής και συγκόλλησης μετάλλων.

Σε σύγκριση με τα άλλα αέρια καύσιμα και κυρίως τα φυσικά αέρια και τα αέρια που προέρχονται από

**Πίνακας 11.1**  
**Ιδιότητες τεχνητών αερίων καυσίμων που προέρχονται από την εξαερίωση του άνθρακα**

| Κύρια χαρακτηριστικά                           | Υδαταέριο   | Φτωχό αέριο |
|--|-------------|-------------|
| 1. Σύνθεση (%)                                 |             |             |
| – Υδρογόνο                                     | 50          | 10–15       |
| – Μονοξείδιο του άνθρακα                       | 41          | 25–30       |
| – Άζωτο  | 3,5         | 45–55       |
| – Υδρογονάνθρακες                              | 1           | 1–2         |
| – Διοξείδιο του άνθρακα                        | 5           | 3–5         |
| 2. Πυκνότητα (ως προς αέρα)                    | 0,55        | 0,8–0,9     |
| 3. Θερμαντική ικανότητα (kcal/m <sup>3</sup> ) | 1.800–2.200 | 1.000–1.400 |

την εξαερίωση του άνθρακα, υπάρχουν ως προς την καύση τους οι εξής διαφορές:

1) Τα όρια αναφλεξιμότητας ή εκρηκτικότητας είναι στενότερα, συνεπώς τα υγραέρια από άποψη ασφάλειας πλεονεκτούν σε σχέση με τα άλλα αέρια καύσιμα.

2) Απαιτούν για την καύση τους περισσότερο αέρα, πράγμα που επιβάλλει ανάλογη σχεδίαση και κατασκευή των καυστήρων.

3) Λόγω της μεγαλύτερης σχετικής πυκνότητας (μεγαλύτερης του 1) διαρροές των υγραερίων συγκεντρώνονται στο δάπεδο των χώρων όπου χρησιμοποιούνται, και απαιτούν κατάλληλο αερισμό.

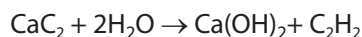
Τα παραπάνω παρουσιάζονται στον συγκριτικό πίνακα 11.2.

Στον πίνακα 11.3 αναγράφονται οι σπουδαιότερες

ιδιότητες του υγραερίου κίνησης, δηλαδή καυσίμου που προορίζεται για βενζινομηχανή και καλύπτεται από το ΦΕΚ Β 1483/6-10-2006.

### 11.3.5 Ακετυλένιο (ασετυλίνη)

Είναι υδρογονάνθρακας τύπου  $C_2H_2$  που συνήθως παράγεται με επίδραση νερού σε ανθρακασβέστιο:



Η σπουδαιότερη ιδιότητα του καυσίμου αυτού είναι η πάρα πολύ υψηλή θερμοκρασία που παράγεται κατά την καύση του, προπάντων όταν γίνεται με καθαρό οξυγόνο. Τη θερμοκρασία αυτή εκμεταλλευόμαστε για την τήξη των μετάλλων κατά την κοπή ή τη συγκόλλησή τους.

**Πίνακας 11.2**  
**Συγκριτικές ιδιότητες αερίων καυσίμων**

| Είδος καυσίμου  | Όρια εκρηκτικού μείγματος | Σχετική πυκνότητα | Στοιχειομετρική αναλογία αέρα |
|-----------------|---------------------------|-------------------|-------------------------------|
| 1. Προπάνιο     | 2–11%                     | 1,5               | 23:1                          |
| 2. Βουτάνιο     | 1,7–9%                    | 2                 | 30:1                          |
| 3. Φυσικό αέριο | 5–14%                     | 0,65              | 6:1                           |
| 4. Υδαταέριο    | 4–70%                     | 0,55              | 10:1                          |

**Πίνακας 11.3**  
**Προδιαγραφές υγραερίου κίνησης**

| Κύρια φυσικοχημικά χαρακτηριστικά                  | Όρια τιμών |
|--|------------|
| 1. Αριθμός οκτανίου, MON, ελαχ.                    | 89         |
| 2. Διένια (ως 1,3 - βουταδιένιο) %, μεγ.           | 0,5        |
| 3. Ολικό θείο, %, μεγ.                             | 0,02       |
| 4. Διάβρωση χάλκινου ελάσματος (1 h, σε 40°C) μεγ. | 1          |
| 5. Υπόλειμμα εξάτμισης, mg/kg, μεγ.                | 100        |
| 6. Τάση ατμών, σε 40°C, kPa, μεγ.                  | 1550       |



## 12.1 Η σημασία του ποιοτικού ελέγχου

Ο έλεγχος της ποιότητας των καυσίμων έχει βασικό σκοπό να εξακριβώσει κατά πόσο το κάθε καύσιμο είναι κατάλληλο για τη μηχανή για την οποία προορίζεται.

Η ποιότητα των διαφόρων καυσίμων εκφράζεται από μία σειρά φυσικών, χημικών ή και άλλων χαρακτηριστικών, οι τιμές των οποίων καθορίζονται από τις αντίστοιχες προδιαγραφές που πρέπει να ακολουθούν τα καύσιμα αυτά. Οι προδιαγραφές επίσης χρησιμεύουν για να λαμβάνονται ταρέποντα μέτρα ασφάλειας κατά τη διακίνηση των καυσίμων.

Η εξασφάλιση της ποιότητας των καυσίμων γίνεται κυρίως από τις εταιρείες πετρελαιοειδών από τις οποίες το κάθε πλοίο ή η κάθε ναυτιλιακή εταιρεία προμηθεύεται τα καύσιμα. Οι εταιρείες αυτές έχουν κάθε λόγο να ενδιαφέρονται για την ποιότητα των καυσίμων με τα οποία εφοδιάζουν τους πελάτες τους, και κυρίως για λόγους ανταγωνισμού. Φροντίζουν μάλιστα να κάνουν περιοδικούς ελέγχους στα καύσιμα, αλλά κυρίως στα λιπαντικά των πλοίων που εφοδιάζουν, όταν αυτό ζητηθεί από τους πελάτες τους. Ο εργαστηριακός έλεγχος των καυσίμων γίνεται από εξειδικευμένα εργαστήρια στα οποία το πλοίο αποστέλλει τα δείγματα. Τέτοια εργαστήρια οι εταιρείες έχουν εγκαταστήσει σε διάφορα μέρη της υδρογείου και σε λίγες μέρες παίρνουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης με υποδείξεις ή σχόλια αν απαιτούνται.

Γενικά, η εκτέλεση των δοκιμών και μετρήσεων, που προβλέπουν οι προδιαγραφές των διαφόρων καυσίμων, είναι έργο χημικών εργαστηρίων και απαιτούν κατά κανόνα εξειδικευμένο προσωπικό.

Παρόλα αυτά, η γνώση των μεθόδων που εφαρμόζονται για τον ποιοτικό έλεγχο των καυσίμων – αλλά και των λιπαντικών – έχει για τον μηχανικό ιδιαίτερη σημασία για δυο κυρίως λόγους:

1) Για να μπορεί ο μηχανικός να ερμηνεύσει και να αξιολογήσει σωστά τη σημασία των αποτελεσμάτων μιας χημικής ανάλυσης, όπως αυτά αναγράφονται στο

Δελτίο Ανάλυσης του καυσίμου. Από την ορθή ερμηνεία των διαφορών που μπορεί να εμφανίζονται μεταξύ των προδιαγραφών και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, μπορεί να οδηγηθεί ο μηχανικός στον εντοπισμό των αιτιών μιας πιθανής ανωμαλίας, που προκάλεσε η αλλοίωση των χαρακτηριστικών ή να αποφασίσει για τις πιθανές συνέπειες που μπορούν οι διαφορές αυτές να έχουν στη μηχανή κατά τη λειτουργία της.

2) Σε ορισμένες περιπτώσεις πρέπει ο μηχανικός να είναι σε θέση, με τα πρόχειρα εργαστηριακά μέσα που διαθέτει στο πλοίο του, να κάνει μόνος του μερικές απλές δοκιμές. Οι δοκιμές αυτές αφορούν περισσότερο στα λιπαντικά και περιγράφονται στην παράγραφο 15.15.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι, με τον ποιοτικό έλεγχο των καυσίμων εξασφαλίζεται η κατάλληλη ποιότητα του καυσίμου και συνεπώς η αποδοτικότερη λειτουργία της μηχανής, για την οποία προορίζεται το καύσιμο.

Μερικές από τις δοκιμές των διαφόρων καυσίμων περιγράφονται στα αντίστοιχα κεφάλαια, όπως είναι η πτητικότητα της βενζίνης (βλ. § 5.3), ο αριθμός οκτανίου (βλ § 5.4), τα ρητινικά συστατικά ή κομμώδεις ουσίες (βλ §. 5.5.2), ο αριθμός κετανίου (βλ §. 6.3) και η σταθερότητα του μαζούτ (βλ § 7.2.3).

Οι δοκιμές και μετρήσεις που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους αφορούν σχεδόν σε όλα (τα υγρά κυρίως) καύσιμα.

## 12.2 Μακροσκοπική εξέταση – Βαθμός καθαρότητας

Λέγοντας **μακροσκοπική εξέταση** εννοούμε την απλή, αλλά προσεκτική παρατήρηση ενός δείγματος καυσίμου, που έχει ως κύριο σκοπό *πρώτον* να διαπιστώσει τον βαθμό καθαρότητάς του και *δεύτερον* να εξακριβώσει το χρώμα του.

Μέτρο του βαθμού καθαρότητας των υγρών καυσίμων, πλην του μαζούτ, αποτελεί η **διαύγεια** που παρουσιάζει κατά τη μακροσκοπική εξέταση.

Αν το καύσιμο είναι θολό, αυτό σημαίνει παρουσία ξένων υλών και κυρίως νερού, που μπορούν να προσ-

διορισθούν με φυγοκέντρωση. Κατά τη φυγοκέντρωση, που γίνεται υπό ορισμένες συνθήκες, το νερό και οι ξένες ύλες που περιέχονται στο καύσιμο, συγκεντρώνονται στον πυθμένα του δοχείου που περιέχει το δείγμα, όπου και μετρούνται. Ο όγκος τους αποτελεί τον λεγόμενο **αριθμό κατακρήμνισης** (precipitation number) ή **νερό και ξένες ύλες από φυγοκέντρωση** (Bottom Sediment and Water – BSW). Τα ανώτατα όρια του αριθμού κατακρήμνισης καθορίζονται από τις αντίστοιχες προδιαγραφές. Για τη μέτρηση της περιεκτικότητας του καυσίμου σε νερό, ακολουθείται η μέθοδος που περιγράφεται στην παράγραφο 12.10.

Το **χρώμα** του καυσίμου κατά τη μακροσκοπική εξέταση έχει την εξής σημασία:

1) Για τη βενζίνη είναι διακριτικό της ποιότητας. Η αμόλυβδη βενζίνη RON 95 έχει φυσικό κίτρινο χρώμα, η βενζίνη με υποκατάστατο μολύβδου (LRP) έχει πράσινο χρώμα και η στρατιωτική βενζίνη κόκκινη και η κηροζίνη θέρμανσης μπλε.

2) Για το πετρέλαιο diesel απόχρωση βαθύτερη από το γνωστό καστανοκίτρινο χρώμα προσδίδει συχνά ανάμειξη με μαζούτ, πράγμα που επιβάλλει την παραπέρα εξέταση. Στην Ελλάδα, ο χρωματισμός του diesel γίνεται με κόκκινα χρώματα για το πετρέλαιο θέρμανσης, μαύρα χρώματα για το πετρέλαιο εσωτερικής καύσης πλοίων και μπλε για τις ένοπλες δυνάμεις.

### 12.3 Πυκνότητα (ειδικό βάρος)

Η **πυκνότητα** είναι βασικό χαρακτηριστικό ενός καυσίμου, αλλά δεν είναι ενδεικτικό ή αποφασιστικό χαρακτηριστικό της ποιότητάς του.

Στο παρελθόν αντί της πυκνότητας χρησιμοποιήθηκε το ειδικό βάρος, όμως έχει πια εκτοπιστεί και δεν υπάρχουν παρά μόνο κάποιο πίνακες που αναφέρουν αυτή την ιδιότητα ως βάση υπολογισμών όγκου και βάρους. Επίσης στην κλίμακα API γινόταν εκτίμηση της πυκνότητας/ειδικού βάρους και αρκετές οδηγίες στη χρήση καυσίμων ήταν προσαρμοσμένες στην κλίμακα αυτή. Στη συνέχεια του βιβλίου θα αναφερθούμε στην πυκνότητα.

Η πυκνότητα καυσίμου ορίζεται ως ο λόγος της μάζας προς τον όγκο του:

$$d = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Οι μονάδες μέτρησης της πυκνότητας ακολουθούν τον παραπάνω ορισμό. Οι πιο συνηθισμένες είναι: g/cm<sup>3</sup>, kg/l, tn/m<sup>3</sup> και lb/ft<sup>3</sup>.

Η **σημασία της πυκνότητας** των καυσίμων έγκειται στις παρακάτω εφαρμογές:

1) Στον **διαχωρισμό του νερού από το καύσιμο**, που βασίζεται στη διαφορά πυκνότητας καυσίμου/νερού. Η τιμή της πυκνότητας δεν προδιαγράφεται παρά μονάχα σε ορισμένες κατηγορίες βαριών καυσίμων που προορίζονται για πετρελαιομηχανές. Εκεί καθορίζεται ανώτατο όριο πυκνότητας ισοδύναμο με 0,99 kg/l (όπου η πυκνότητα του νερού είναι 1,00 kg/l), γιατί πάνω από το όριο αυτό ο φυγοκεντρικός αποχωρισμός του νερού δεν είναι δυνατός.

2) Στην **ογκομετρική παραλαβή καυσίμων**. Ιδιαίτερη σημασία έχει η μέτρηση της πυκνότητας για τη μετατροπή του όγκου ενός καυσίμου σε μάζα, με βάση τη σχέση (1). Η διακίνηση όλων των καυσίμων γίνεται σε μονάδες όγκου, γιατί ο όγκος εύκολα μπορεί να μετρηθεί, είτε με μετρητές είτε με τη στάθμη των δεξαμενών, που είναι συνήθως ογκομετρημένες. Επειδή τα καύσιμα κοστολογούνται ως προς τη μάζα τους, ο προσδιορισμός της πυκνότητας για την παραπάνω μετατροπή είναι πολύ σημαντικός.

3) Στον **έμμεσο υπολογισμό της θερμαντικής ικανότητας** των υγρών καυσίμων. Η πυκνότητα είναι η βασική παράμετρος στον εμπειρικό τύπο προσδιορισμού της θερμαντικής ικανότητας.

#### 12.3.1 Μέτρηση πυκνότητας

Στα 170 χρόνια της ιστορίας των καυσίμων, οι πρακτικές μέθοδοι στη μέτρηση πυκνότητας έχουν προτυποποιηθεί με διαφορετικό τρόπο σε διαφορετικές περιοχές, π.χ. ΗΠΑ και Ευρώπη. Επειδή η πυκνότητα επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία, είναι απαραίτητο να μετρώνται οι τιμές της πυκνότητας σε μια κοινά αποδεκτή θερμοκρασία αναφοράς. Όταν γίνονται μετρήσεις σε διαφορετική θερμοκρασία, με τους τρόπους αναγωγής της πυκνότητας που θα αναλύσουμε παρακάτω, μπορούμε να μεταβούμε στην κοινά αποδεκτή θερμοκρασία αναφοράς.

Σήμερα υπάρχουν τρεις κύριοι τρόποι μέτρησης πυκνότητας: με υδρόμετρο, με πυκνόμετρο και με ψηφιακό μετρητή πυκνότητας. Ειδικότερα:

1) Το **υδρόμετρο** συνίσταται από ένα γυάλινο βολβό με μακρύ λαιμό που βυθίζεται μέσα στο προς μέτρηση υγρό. Το βύθισμα είναι ενδεικτικό της πυκνότητας του υγρού και ο λαιμός μπορεί να βαθμονομηθεί στην ένδειξη της τιμής της πυκνότητας. Στην πράξη ο γυάλινος βολβός τοποθετείται μέσα σε γυάλινο κυλινδρικό σωλήνα που φέρει λαστιχένια φούσκα στην κορυφή του για την αναρρόφηση τού προς μέτρηση υγρού [σχ. 12.1(α)].



Σχ. 12.1

(α) Υδρόμετρο,  
(β) πυκνόμετρο με μέτρηση θερμοκρασίας

2) Η μέτρηση πυκνότητας με **πυκνόμετρο** είναι μια ακριβής μέθοδος. Χρησιμοποιεί ένα υγρό αναφοράς με γνωστή πυκνότητα, όπως το νερό. Το πυκνόμετρο είναι μια γυάλινη φιάλη με πώμα ασφαλείας μέσα από το οποίο περνάει και ασφαλίζει τριχοειδής σωλήνας, που μπορεί να αφήσει φυσαλίδες αέρα να περάσουν. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη λήψη με ακρίβεια ενός ορισμένου όγκου από το προς μέτρηση υγρό και το υγρό αναφοράς ξεχωριστά με παράλληλη μέτρηση μάζας, οπότε η πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί και ταυτόχρονα να μετρηθεί και η θερμοκρασία [σχ. 12.1(β)].

Τα πλεονεκτήματα του υδρόμετρου και του πυκνόμετρου είναι η χαμηλή τιμή των οργάνων και η σχετικά καλή ακρίβεια μέτρησης όταν γίνεται από έμπειρο χειριστή. Όμως απαιτείται σχετικά μεγάλη ποσότητα δείγματος και μεγάλη ποσότητα διαλύτη (80-100 ml) για καθαρισμό.

3) Η υψηλότερη ακρίβεια στη μέτρηση πυκνότητας επιτυγχάνεται με τους **ψηφιακούς μετρητές**. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τέτοιων μετρητών από κατασκευαστές αναλυτικών οργάνων. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι η γρήγορη μέτρηση (3–5 λεπτά), η μικρή ποσότητα δείγματος καυσίμου (2–5 ml), η μικρή ποσότητα διαλύτη για καθαρισμό (5–10 ml), ο αυτόματος έλεγχος καθαρότητας στον χώρο δοκιμής και η ακρίβεια στην επιβολή θερμοκρασίας για τη μέτρηση.

### 12.3.2 Υπολογισμοί μάζας με βάση την πυκνότητα

Επειδή, όπως προαναφέρθηκε, η πυκνότητα μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, δεν **νοείται μέτρηση της πυκνότητας, χωρίς μέτρηση της θερμοκρασίας στην οποία η πυκνότητα αντιστοιχεί**. Έχει συμφωνηθεί διεθνώς η πυκνότητα των καυσίμων να μετρείται στη **θερμοκρασία αναφοράς των 15°C** (ή 60°F) και έτσι να αναγράφεται σε όλες τις προδιαγραφές. Επίσης, και ο όγκος μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, σε αντίθεση με τη μάζα, που είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας. Γι' αυτό οι διακανονισμοί των καυσίμων γίνονται είτε σε μάζα είτε σε όγκο, που όμως έχει αναχθεί στη θερμοκρασία αναφοράς (15°C).

Έτσι στην πετρέλευση για τον υπολογισμό της μάζας από τον όγκο στη θερμοκρασία παραλαβής υπάρχουν δύο μέθοδοι, οι ακόλουθες:

#### 1) Αναγωγή πυκνότητας σε άλλη θερμοκρασία

Αυτή η προσεγγιστική μέθοδος αναγωγής πυκνότητας χρησιμοποιείται όταν γνωρίζουμε την πυκνότητα στη θερμοκρασία αναφοράς 15°C ( $d_{15}$ ) και ψάχνουμε την πυκνότητα σε άλλη θερμοκρασία  $\theta$  ( $d_{\theta}$ ) ή όταν έχουμε μετρήσει την πυκνότητα σε θερμοκρασία  $\theta$  ( $d_{\theta}$ ) και θέλουμε να βρούμε την πυκνότητα στη θερμοκρασία αναφοράς 15°C ( $d_{15}$ ). Η εμπειρική σχέση που χρησιμοποιείται είναι:

$$d_{15} = d_{\theta} + (\theta - 15) \cdot K \quad (2)$$

όπου:  $d_{15}$  η πυκνότητα στη θερμοκρασία αναφοράς 15°C,  $d_{\theta}$  η πυκνότητα στη θερμοκρασία  $\theta$  και  $K$  ο συντελεστής μετατροπής πυκνότητας, που εξαρτάται από το είδος του καυσίμου, δηλαδή από το ύψος της πυκνότητας.

Οι τιμές του  $K$  για τα σπουδαιότερα είδη καυσίμων είναι:

- α) Μαζούτ  $K = 0,00064$ ,
- β) Πετρέλαιο diesel  $K = 0,00068$  και
- γ) Βενζίνη  $K = 0,00074$ .



#### Άσκηση

Ο όγκος του μαζούτ στη θερμοκρασία παραλαβής 38°C σε μια πετρέλευση είναι  $V_{38} = 2500 \text{ m}^3$ . Αν οι αναλύσεις δειγμάτων από την παραλαβή έδειξαν ότι η πυκνότητά του στη θερμοκρασία αναφοράς είναι  $d_{15} = 0,9325 \text{ tn/m}^3$ , να βρεθεί η μάζα του μαζούτ παραλαβής σε tn.

Πρώτα θα υπολογιστεί η πυκνότητα του καυσίμου στη θερμοκρασία παραλαβής. Επειδή  $\theta = 38^\circ\text{C}$  και  $K = 0,00064$ , ο τύπος (2) γίνεται:

$$d_{38} = d_{15} - (38 - 15) \cdot K = 0,9325 - 23 \cdot 0,00064 = 0,9178 \text{ tn/m}^3$$

Επειδή γνωρίζουμε τον όγκο και την πυκνότητα στην ίδια θερμοκρασία ( $38^\circ\text{C}$ ) είναι δυνατή η εφαρμογή του τύπου (1) για τον υπολογισμό της μάζας:

$$m = d_{38} \cdot V_{38} = 0,9178 \cdot 2.500 = 2.294,5 \text{ tn}$$

Για τις μετατροπές όγκου σε μάζα στην παραλαβή καυσίμων η πυκνότητα δίνεται συνήθως σε 4 (και σπανιότερα σε 5) δεκαδικά ψηφία.

## 2) Αναγωγή όγκου στη θερμοκρασία αναφοράς $15^\circ\text{C}$

Η πρακτική αυτή της αναγωγής εφαρμόζεται σχεδόν σε όλα τα λογισμικά διαχείρισης καυσίμων που χρησιμοποιούνται στο πλοίο για τον υπολογισμό της μάζας από τον μετρούμενο όγκο καυσίμου σε κάθε δεξαμενή. Έτσι, αφού έχει μετρηθεί σε μια δεξαμενή ο φαινόμενος όγκος (Observed Volume – OV) στη θερμοκρασία παραλαβής  $\theta$  και είναι γνωστή η πυκνότητα του καυσίμου στη θερμοκρασία αναφοράς  $d_{15}$ , μπορεί να βρεθεί (από πίνακες ASTM Table 54B) ο συντελεστής διόρθωσης όγκου (Volume Correction Factor – VCF) και να υπολογιστεί ο όγκος που θα είχε το καύσιμο (Gross Volume – GV) στη θερμοκρασία αναφοράς  $15^\circ\text{C}$ :

$$GV = VCF \cdot OV \quad (3)$$

Για τον τελικό υπολογισμό της μάζας, τα παραπάνω λογισμικά εμπεριέχουν και αναγωγή όγκου από το κενό στον αέρα.



### Άσκηση

Ο (φαινόμενος) όγκος του πετρελαίου diesel στη θερμοκρασία παραλαβής  $34^\circ\text{C}$  σε μια δεξαμενή κατά την πετρέλευση είναι  $GV = 250 \text{ m}^3$ . Αν οι αναλύσεις δειγμάτων από την παραλαβή έδειξαν ότι η πυκνότητά του στη θερμοκρασία αναφοράς είναι  $d_{15} = 0,8160 \text{ tn/m}^3$ , να βρεθεί

η μάζα του πετρελαίου diesel που παρελήφθη σε tn. Δεν λαμβάνεται υπόψη η μετατροπή από κενό σε αέρα.

Δίνοντας την πυκνότητα στη θερμοκρασία αναφοράς  $d_{15} = 0,8160 \text{ tn/m}^3$  και τη θερμοκρασία  $38^\circ\text{C}$  στους πίνακες ASTM Table 54B βρίσκουμε τον συντελεστή μετατροπής όγκου  $VCF = 0,9830$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 12.2. Έτσι:

$$GV = 0,9830 \cdot 250 = 245,75 \text{ m}^3$$

και ο υπολογισμός μάζας είναι δυνατός τώρα από την εξίσωση (1) αφού είναι γνωστά και η πυκνότητα και όγκος στην θερμοκρασία αναφοράς  $15^\circ\text{C}$ .

$$m = d_{15} \cdot GV = 0,8160 \cdot 245,75 = 200,53 \text{ tn}$$

Οι πίνακες ASTM Table 54B έχουν είσοδο θερμοκρασίας σε  $^\circ\text{C}$  και πυκνότητας σε  $\text{tn/m}^3$ , δηλαδή στο διεθνές σύστημα. Βρίσκονται ενσωματωμένοι στο λογισμικό διαχείρισης καυσίμων και είναι διαθέσιμοι σε εκτυπωμένη μορφή από το διαδίκτυο.

| TEMP. C | DENSITY AT 15 C |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|         | 810.0           | 812.0  | 814.0  | 816.0  | 818.0  | 820.0  | 822.0  | 824.0  | 826.0  | 828.0  | 830.0  | 832.0  |
| 32.50   | 0.9841          | 0.9841 | 0.9842 | 0.9843 | 0.9844 | 0.9845 | 0.9845 | 0.9846 | 0.9847 | 0.9847 | 0.9848 | 0.9848 |
| 33.00   | 0.9838          | 0.9839 | 0.9840 | 0.9841 | 0.9842 | 0.9843 | 0.9843 | 0.9844 | 0.9845 | 0.9845 | 0.9846 | 0.9846 |
| 33.50   | 0.9835          | 0.9837 | 0.9838 | 0.9839 | 0.9840 | 0.9841 | 0.9841 | 0.9842 | 0.9843 | 0.9843 | 0.9844 | 0.9844 |
| 34.00   | 0.9832          | 0.9834 | 0.9835 | 0.9836 | 0.9837 | 0.9837 | 0.9838 | 0.9839 | 0.9839 | 0.9840 | 0.9840 | 0.9841 |
| 34.50   | 0.9829          | 0.9831 | 0.9832 | 0.9833 | 0.9834 | 0.9834 | 0.9835 | 0.9836 | 0.9836 | 0.9837 | 0.9837 | 0.9838 |
| 35.00   | 0.9826          | 0.9828 | 0.9829 | 0.9830 | 0.9831 | 0.9831 | 0.9832 | 0.9833 | 0.9833 | 0.9834 | 0.9834 | 0.9835 |
| 35.50   | 0.9823          | 0.9825 | 0.9826 | 0.9827 | 0.9828 | 0.9828 | 0.9829 | 0.9830 | 0.9830 | 0.9831 | 0.9831 | 0.9832 |
| 36.00   | 0.9820          | 0.9822 | 0.9823 | 0.9824 | 0.9825 | 0.9825 | 0.9826 | 0.9827 | 0.9827 | 0.9828 | 0.9828 | 0.9829 |
| 36.50   | 0.9817          | 0.9819 | 0.9820 | 0.9821 | 0.9822 | 0.9822 | 0.9823 | 0.9824 | 0.9824 | 0.9825 | 0.9825 | 0.9826 |
| 37.00   | 0.9814          | 0.9816 | 0.9817 | 0.9818 | 0.9819 | 0.9819 | 0.9820 | 0.9821 | 0.9821 | 0.9822 | 0.9822 | 0.9823 |
| 37.50   | 0.9811          | 0.9813 | 0.9814 | 0.9815 | 0.9816 | 0.9816 | 0.9817 | 0.9818 | 0.9818 | 0.9819 | 0.9819 | 0.9820 |

Σχ. 12.2

Απόσπασμα ASTM Table 54B για τον υπολογισμό του VCF

## 3) Υπολογισμός θερμαντικής ικανότητας με βάση την πυκνότητα

Η πυκνότητα χρησιμεύει ακόμα και για τον έμμεσο υπολογισμό της θερμαντικής ικανότητας των υγρών καυσίμων, που κατά προσέγγιση μπορεί να υπολογιστεί με τον εμπειρικό τύπο:

$$Q = 12.400 - 2.100 \cdot d_{15}^2 \text{ kcal/kg} \quad (4)$$

όπου:  $d_{15}$  είναι η πυκνότητα στη θερμοκρασία αναφοράς  $15^\circ\text{C}$  σε  $\text{tn/m}^3$  ή  $\text{kg/lt}$  και  $Q$  είναι η θερμαντική ικανότητα του καυσίμου σε  $\text{kcal/kg}$



### Παράδειγμα

Η θερμαντική ικανότητα ενός καυσίμου τύπου μαζούτ που έχει πυκνότητα  $d_{15} = 0,9325 \text{ tn/m}^3$  βρίσκεται από τον τύπο:

$$Q = 12.400 - 2.100 \cdot 0,9325^2 = 10.574 \text{ kcal/kg}$$

Αναλυτική περιγραφή της θερμαντικής ικανότητας καυσίμων δίνεται παρακάτω (βλ. §12.8).

## 12.4 Ιξώδες

**Ιξώδες** ενός υγρού είναι το μέτρο της εσωτερικής τριβής μεταξύ των μορίων του υγρού αυτού κατά τη ροή του και εκφράζει την αντίσταση που παρουσιάζει στη ροή.

Η **σημασία του ιξώδους** για τα καύσιμα και περισσότερο για το πετρέλαιο diesel και το μαζούτ, έγκειται σε δύο βασικές ιδιότητές τους:

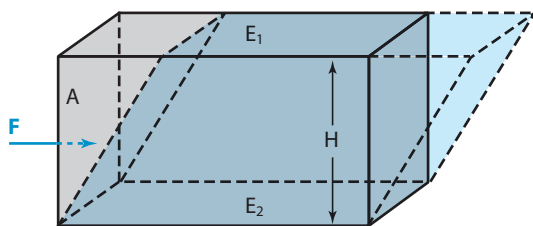
1) την **αντλητικότητα**, δηλαδή την ευκολία με την οποία τα καύσιμα διακινούνται στο δίκτυό τους

2) τον **βαθμό διασκορπισμού**, δηλαδή την ευκολία με την οποία τα καύσιμα εκνεφώνονται κατά την εκροή τους από το προστόμιο των καυστήρων. Ο βαθμός διασκορπισμού βρίσκεται σε άμεση σχέση με την ποιότητα καύσης (βλ. 9.3.2).

Ελέγχοντας το ιξώδες, ώστε να έχει πάντα την κατάλληλη τιμή, εξασφαλίζουμε για τη μηχανή μας καύσιμο, του οποίου η αντλητικότητα και ο βαθμός διασκορπισμού βρίσκονται στα επιθυμητά όρια.

Για την κατανόηση του απόλυτου (ή δυναμικού) ιξώδους ορίζουμε ως όγκο ελέγχου ένα τμήμα του ρευστού σε σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου. Η κάτω πλευρά του παραλληλεπίπεδου  $E_2$  θεωρείται ακίνητη ενώ η πάνω πλευρά του  $E_1$  (σχ. 12.3) κινείται ως αποτέλεσμα της ροής του υγρού.

Η ροή του υγρού ασκεί μία διατμητική τάση, η τιμή της οποίας δίνεται από το πηλίκο  $F/A$  και η οποία διατηρεί μεταξύ των επιφανειών  $E_1$  και  $E_2$  σταθερή τα-



Σχ. 12.3

Η έννοια του ιξώδους

χύτητα  $u$ . Το απόλυτο ιξώδες στην περίπτωση αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{F/A}{u/H} \quad (5)$$

όπου:  $\eta$  είναι η τιμή του απόλυτου (ή δυναμικού) ιξώδους σε μονάδες Pa.s.,  $F$  είναι η δύναμη διάτμησης ή δύναμη απόσχισης, που ασκείται από τη ροή του υγρού, σε N,  $A$  είναι η επιφάνεια στην οποία η διάτμηση ενεργεί, σε  $m^2$ ,  $u$  είναι η ταχύτητα ροής σε m/s,  $H$  είναι η απόσταση μεταξύ των επιφανειών  $E_1$  και  $E_2$  σε m και  $u/H$  είναι η ταχύτητα διάτμησης ή ταχύτητα απόσχισης σε  $(m.s)^{-1}$

Επομένως το δυναμικό ιξώδες είναι το πηλίκο της διατμητικής τάσης  $F/A$  προς την ταχύτητα απόσχισης  $u/H$  που προκαλείται από την τάση αυτή. Είναι δηλαδή η τιμή του ιξώδους ανάλογη προς τη διατμητική τάση και αντιστρόφως ανάλογη προς την ταχύτητα διάτμησης, την οποία η διατμητική τάση προκαλεί. Το πηλίκο αυτό είναι σταθερό για τα Νευτώνεια υγρά, όπως είναι τα ελαφρά καύσιμα, και μεταβάλλεται μόνο με τη θερμοκρασία και την πίεση. Στα μη Νευτώνεια υγρά μεταβάλλεται και με την ταχύτητα διάτμησης.

Αν τα παραπάνω φυσικά μεγέθη πάρουν τις τιμές των μονάδων τους στο διεθνές σύστημα μονάδων S.I. θα έχουμε τη μονάδα μέτρησης του απόλυτου ιξώδους Pa.s.

Επομένως: **1 Pa.s είναι το απόλυτο ιξώδες ρευστού το οποίο κάτω από διατμητική τάση 1 N/m<sup>2</sup> διατηρεί ταχύτητα 1 m/s μεταξύ δυο επιπέδων επιφανειών του, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους 1 m.**

Στο σύστημα CGS η μονάδα μέτρησης του απόλυτου ιξώδους είναι 1 poise.

Για την αντιστοιχία μεταξύ των μονάδων αυτών παίρνουμε τις τιμές ιξώδους του νερού στους 25°C:

$$1 \text{ mPa.s (} 10^{-3} \text{ Pa.s)} = 1 \text{ cpoise (} 10^{-2} \text{ poise)}$$

**Κινηματικό ιξώδες  $\nu$**  είναι ο λόγος του απόλυτου ιξώδους  $\eta$ , προς την πυκνότητα  $d$  του ρευστού.

$$\nu = \frac{\eta}{d}$$

Το κινηματικό ιξώδες χρησιμοποιείται ευρέως στα καύσιμα και τα λιπαντικά και η μονάδα μέτρησης του είναι το 1 **St (Stoke)**.

Στα καύσιμα και τα λιπαντικά το κινηματικό ιξώδες εκφράζεται σε cSt, δηλαδή το εκατοστό του St:

$$1 \text{ cSt} = 10^{-2} \text{ St}$$



Για την εργαστηριακή μέτρηση του κινηματικού ιξώδους χρησιμοποιούνται απλές συσκευές όπως το ιξωδόμετρο Cannon-Fenske που εικονίζεται στο σχήμα 12.4.

Είναι ένας γυάλινος σωλήνας με σχήμα U, στον οποίο μετρίεται ο χρόνος ροής (με τον τριχοειδή σωλήνα T) ορισμένης ποσότητας του μετρούμενου υγρού, με αυστηρά καθορισμένες συνθήκες. Κάθε τέτοιο ιξωδόμετρο φέρει χαραγμένο έναν συντελεστή που είναι η **σταθερά του οργάνου**. Αν ο χρόνος ροής πολλαπλασιαστεί με τον συντελεστή αυτό βρίσκεται η τιμή του κινηματικού ιξώδους τού μετρούμενου υγρού. Η σταθερά αυτή προκύπτει με βάση την τιμή του κινηματικού ιξώδους του νερού, που είναι γνωστή από πίνακες, για μια ορισμένη θερμοκρασία.

Συνήθως κατασκευάζονται πλήρεις σειρές τέτοιων ιξωδομέτρων, που διαφέρουν μεταξύ τους κατά τη διάμετρο του τριχοειδούς, έτσι ώστε, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο ιξωδόμετρο, ανάλογα με το εξεταζόμενο υγρό, να απαιτείται χρόνος ροής που να κυμαίνεται σε λογικά όρια.

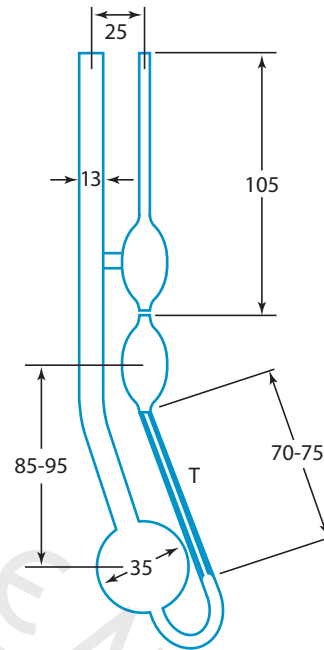
Πρακτικότερα, απλούστερα στη χρήση, αλλά με μικρότερη ακρίβεια, είναι τα συμβατικά ιξωδόμετρα, στα οποία ως μέτρο ιξώδους λαμβάνονται ο χρόνος εκροής ορισμένης ποσότητας δείγματος καυσίμου από προστόμιο με ορισμένες διαστάσεις και υπό αυστηρά καθορισμένες συνθήκες. Υπάρχουν διαφόρων τύπων τέτοια ιξωδόμετρα, από τα οποία σπουδαιότερο είναι το ιξωδόμετρο Engler.

Στο σχήμα 12.5 εικονίζεται η συσκευή ιξωδομέτρου Engler, όπου το μετρούμενο μέγεθος είναι η σχέση των χρόνων ροής του δείγματος στη θερμοκρασία δοκιμής προς το χρόνο ροής ίσης ποσότητας νερού ( $200 \text{ cm}^3$ ) στη θερμοκρασία των  $20^\circ\text{C}$ .

Σήμερα η μέτρηση ιξώδους καυσίμων στα εργαστήρια γίνεται με τα ψηφιακά ιξωδόμετρα που χρησιμοποιούν μια μικρή ποσότητα δείγματος ( $2 - 5 \text{ cm}^3$ ) σε θερμοστατούμενο κελί με βάση το πρότυπο ASTM D7945 - 21 (Πρότυπη μέθοδος δοκιμής για τον καθορισμό δυναμικού και κινηματικού ιξώδους υγρών με ιξωδόμετρα σταθερής πίεσης). Πολλές εταιρείες αναλυτικών οργάνων κατασκευάζουν ιξωδόμετρα με βάση το πρότυπο αυτό, όπου η μέτρηση γίνεται αυτόματα, διαπιστευμένα και με απλές διαδικασίες που δεν απαιτούν ιδιαίτερη εξειδίκευση.

### 12.5 Απόσταση

Με την απόσταση χωρίζουμε τα συστατικά ενός καυσίμου μεταξύ τους, ανάλογα με τις θερμοκρασίες στις οποίες ατμοποιείται το καθένα απ' αυτά. Τα αποστάγματα λαμβάνονται σε ομάδες και λέγονται **κλάσματα**, γι' αυτό και η απόσταση ονομάζεται **κλασματική**. Συνήθως σημειώνεται η θερμοκρασία στην οποία έχει αποστάξει



**Σχ. 12.4**  
Ιξωδόμετρο Cannon-Fenske  
(κινηματικό ιξώδες)



**Σχ. 12.5**  
Ιξωδόμετρο Engler

ορισμένο ποσοστό του δείγματος και μάλιστα το 10%, 40%, 50% και 90%. Σημειώνονται επίσης η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η απόσταξη (Initial boiling point – IBP) και η ανώτατη θερμοκρασία που παρατηρείται κατά τη διάρκειά της και που θεωρείται σαν το τέλος της απόσταξης (End Point – E.P.) ή FBP (Final Boiling Point). Οι τιμές όλων αυτών των θερμοκρασιών καθορίζονται από τις προδιαγραφές.

Η συσκευή απόσταξης του σχήματος 12.6 αποτελείται από τα εξής κύρια τμήματα:

1) **Κλασματήρας**, που είναι η σφαιρική φιάλη στην οποία φέρεται το δείγμα (συνήθως 100 ml). Από το πώμα του κλασματήρα διέρχεται το θερμομέτρο, ενώ ο πλάγιος σωλήνας Σ οδηγεί τους παραγόμενους ατμούς στον ψυκτήρα.

2) **Ψυκτήρας**, που είναι ένας γυάλινος ή μεταλλικός σωλήνας για τη συμπύκνωση των ατμών.

3) **Υποδοχέας**, που είναι ένας βαθμολογημένος ογκομετρικός κύλινδρος στον οποίο συλλέγονται και μετριοούνται αποστάγματα του δείγματος.

Οι διαστάσεις της συσκευής καθορίζονται με ακρίβεια από τις σχετικές προδιαγραφές. Παρόμοια είναι η συσκευή που καθορίζεται από τη μέθοδο ASTM D86. Διαφέρει κυρίως κατά το ότι τα κύρια μέρη της περιβάλλονται από μεταλλικές θήκες και η θέρμανση του δείγματος γίνεται συνήθως με ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Οι θερμοκρασίες στις οποίες συλλέγονται τα διάφορα κλάσματα καταχωρούνται σε πίνακα ή μεταφέρονται σε διάγραμμα θερμοκρασιών-κλασμάτων από το οποίο προκύπτει η καμπύλη απόσταξης, που έχει ιδιαίτερη σημασία για την πτητικότητα της βενζίνης (βλ. § 5.3). Μια τυπική καμπύλη απόσταξης παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος 12.7 (τυπική καμπύλη απόσταξης βενζίνης).

Για ακριβείς μετρήσεις πρέπει να γίνεται διόρθωση της θερμοκρασίας ανάλογα με τη βαρομετρική πίεση, με βάση ειδικούς πίνακες.

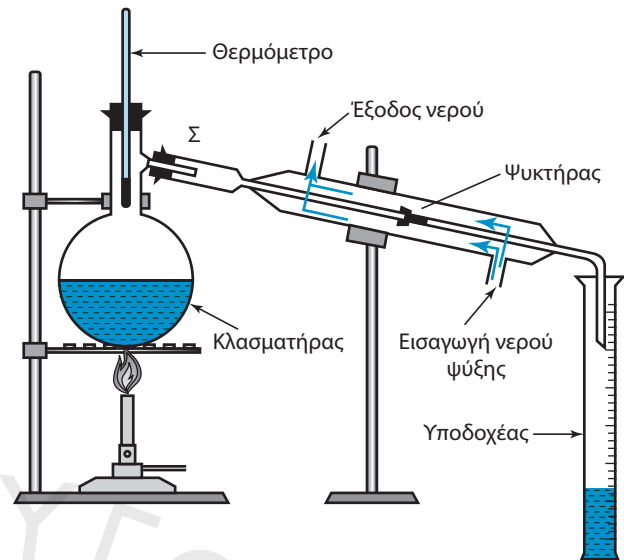
## 12.6 Σημείο ανάφλεξης και σημείο καύσης

**Σημείο ανάφλεξης** (Σ.Α.) (flash point) είναι η κατώτατη θερμοκρασία, στην οποία οι ατμοί που συγκεντρώνονται πάνω από την επιφάνεια ενός δείγματος καυσίμου, που θερμαίνεται κάτω από ορισμένες συνθήκες, αναφλέγονται στιγμιαία με την προσέγγιση μικρής φλόγας. Υπάρχουν δυο σημεία ανάφλεξης:

1) Το σημείο ανάφλεξης σε κλειστό δοχείο (ΣΑΚΔ) και

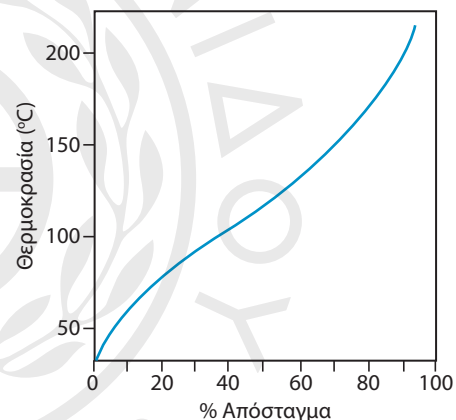
2) το σημείο ανάφλεξης σε ανοικτό δοχείο (ΣΑΑΔ).

Το δεύτερο είναι 10-40°C πάνω από το πρώτο και εφαρμόζεται σε βαριά καύσιμα ή λιπαντικά, ενώ το



Σχ. 12.6

Συσκευή κλασματικής απόσταξης



Σχ. 12.7

Καμπύλη απόσταξης βενζίνης

κλειστό δοχείο (συσκευή Pensky-Martens) χρησιμοποιείται για ελαφρά καύσιμα με σχετικά χαμηλότερο σημείο ανάφλεξης (βενζίνες – πετρέλαιο diesel – κηροζίνη).

**Σημείο καύσης** είναι η θερμοκρασία, στην οποία το καύσιμο, που θερμαίνεται με τις ίδιες συνθήκες, αναφλέγεται, αλλά και εξακολουθεί να καίγεται επί 5 s τουλάχιστον.

Το σημείο καύσης είναι συνήθως 20-40°C πάνω από το σημείο ανάφλεξης σε ανοικτό δοχείο.

Ο προσδιορισμός του σημείου ανάφλεξης χρειάζεται για να ερευνηθεί εάν υπάρχει μόλυνση ενός προϊόντος με πτητικά καύσιμα και για να ληφθούν τα πρέποντα μέτρα ασφάλειας κατά την αποθήκευση και διακίνηση κάθε προϊόντος.

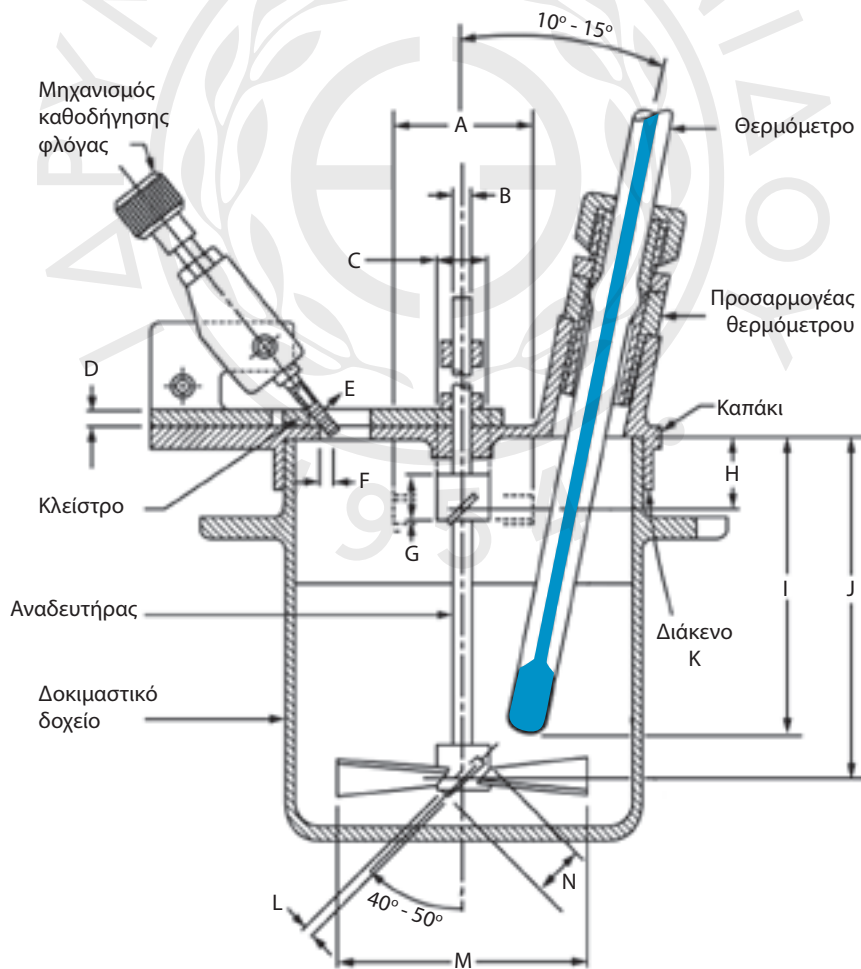
Η μέτρηση του Σ.Α., γίνεται σε ειδική συσκευή, όπως αυτή που εικονίζεται στο σχήμα 12.8, γνωστή ως συσκευή Pensky-Martens και ακολουθεί το πρότυπο ASTM D93-18.

Το δείγμα του καυσίμου θερμαίνεται στο κλειστό δοχείο, με τρόπο τέτοιο ώστε η θερμοκρασία του να ανεβαίνει κατά  $5^{\circ}\text{C}$  ανά λεπτό. Περίπου  $20^{\circ}\text{C}$  πριν από το αναμενόμενο Σ.Α., από τον πλαϊνό σωλήνα προσάγεται μικρή φλόγα διαμέτρου 4 mm, με την οποία δοκιμάζεται η ανάφλεξη των ατμών που έχουν συγκεντρωθεί στην επιφάνεια. Αυτό επαναλαμβάνεται κάθε  $1^{\circ}\text{C}$  έως ότου να παρατηρηθεί στιγμιαία ανάφλεξη (flash). Η κατωτάτη θερμοκρασία στην οποία θα συμβεί η στιγμιαία ανάφλεξη είναι η θερμοκρασία ανάφλεξης του δείγματος. Για να βρούμε το σημείο καύσης, η θέρμανση συνεχίζεται ώσπου η καύση να παραμένει σταθερή τουλάχιστον επί 5 s. Σκαριφηματική τομή της συσκευής απεικονίζεται στο σχήμα 12.9.



**Σχ. 12.8**

Συσκευή μέτρησης σημείου ανάφλεξης



**Σχ. 12.9**

Σχέδιο συσκευής Pensky-Martens, για τον προσδιορισμό του Σ.Α. σε κλειστό δοχείο

## 12.7 Θείο

Η μέτρηση της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο έχει ιδιαίτερη σημασία, αφού πάνω από ορισμένα όρια η παρουσία του είναι ανεπιθύμητη, γιατί τα προϊόντα καύσης του είναι ισχυροί διαβρωτικοί παράγοντες για τα μεταλλικά μέρη της μηχανής.

Η μέτρηση του θείου μπορεί να γίνει με τους εξής δύο τρόπους:

### 1) Άμεσος προσδιορισμός μέσω καύσης

Το δείγμα του καυσίμου υποβάλλεται σε καύση κατά την οποία το θείο μετατρέπεται τελικά σε θειικό οξύ, που εύκολα προσδιορίζεται με απλές μεθόδους της αναλυτικής χημείας (εξουδετέρωση).

Για την καύση χρησιμοποιούνται δύο ειδών εργαστηριακές συσκευές:

#### α) Μέθοδος λάμπας

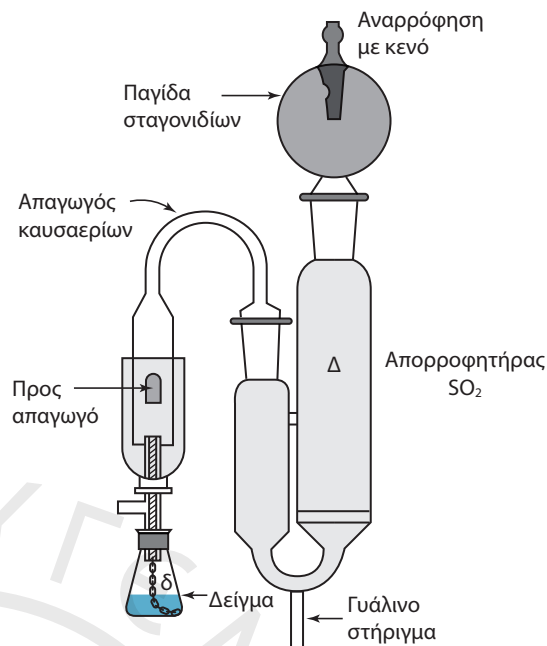
Εφαρμόζεται μόνο για βενζίνη και φωτιστικό πετρέλαιο και γενικά για καύσιμα που μπορούν να καίγονται με φυτίλι. Το δείγμα, που βρίσκεται στο δοχείο δ, ανεβαίνει με τη βοήθεια του φυτιλιού και καίγεται, σε ατμόσφαιρα που ρυθμίζεται να περιέχει 10%  $\text{CO}_2$  και 30%  $\text{O}_2$  (σχ. 12.10). Το διοξείδιο του θείου  $\text{SO}_2$ , που παράγεται κατά την καύση, απορροφάται στο δοχείο Δ, που περιέχει υπεροξείδιο του υδρογόνου  $\text{H}_2\text{O}_2$ , με το οποίο οξειδώνεται προς τριοξείδιο του θείου  $\text{SO}_3$ , που με το νερό μετατρέπεται σε θειικό οξύ  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Το θειικό οξύ προσδιορίζεται με δύο τρόπους:

– **Ογκομετρικά**, με εξουδετέρωση με αλκαλικό διάλυμα, δηλαδή με διάλυμα  $\text{NaOH}$  ή  $\text{KOH}$  γνωστής ισχύος, του οποίου κάθε  $\text{cm}^3$  αντιστοιχεί σε ορισμένη ποσότητα θειικού οξέος.

– **Σταθμικά**, με χλωριούχο βάριο ( $\text{BaCl}_2$ ), που μετατρέπει το θειικό οξύ σε θειικό βάριο ( $\text{BaSO}_4$ ), το οποίο είναι εντελώς αδιάλυτο. Το θειικό βάριο εύκολα απομονώνεται και ζυγίζεται. Από το βάρος του υπολογίζεται το θείο, που περιείχε το αρχικό δείγμα του καυσίμου, η ποσότητα του οποίου ήταν από την αρχή γνωστή.

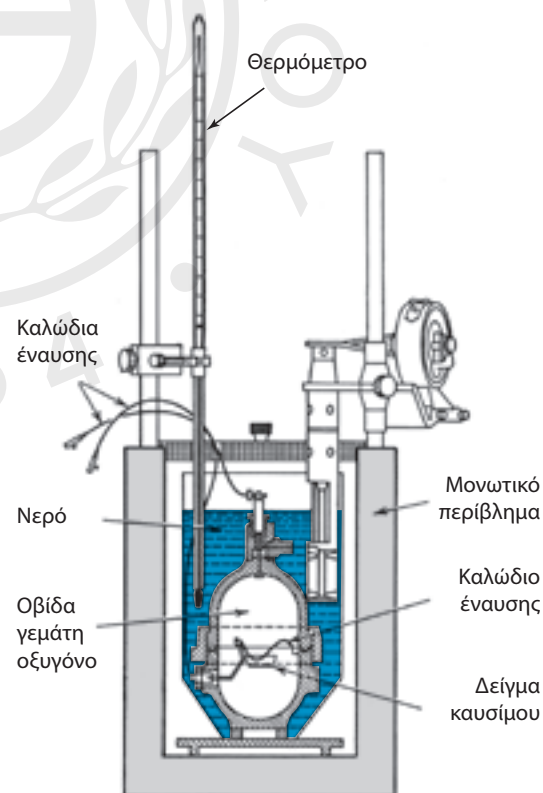
#### β) Θερμιδομετρική οβίδα

Χρησιμοποιείται για όλα τα είδη καυσίμων και είναι γνωστή ως *θερμιδομετρική οβίδα Mahler* (σχ. 12.11). Εδώ η καύση γίνεται με πολύ έντονες συνθήκες, ώστε να καίγονται τελείως και υλικά των οποίων η καύση δεν είναι εύκολη, όπως συμβαίνει με πολλές κατηγορίες στερεών καυσίμων. Η καύση γίνεται σε κλειστό χώρο, με καθαρό οξυγόνο και με πίεση περίπου 25



Σχ. 12.10

Λάμπα προσδιορισμού θείου



Σχ. 12.11

Θερμιδομετρική οβίδα

bar. Και εδώ το θείο μετατρέπεται σε θειικό οξύ, που τελικά προσδιορίζεται με την ίδια διαδικασία, όπως και στη μέθοδο της λάμπας. Η θερμιδομετρική οβίδα χρησιμοποιείται περισσότερο για τη μέτρηση της θερμαντικής ικανότητας των καυσίμων, όπως περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο (12.8).

## 2) Έμμεσος έλεγχος παρουσίας θείου

Γίνεται με τη μέθοδο διάβρωσης χάλκινου ελάσματος (Copper Strip Corrosion), που βασίζεται στη διαβρωτικότητα που προκαλούν οι θειούχες ενώσεις σε ελάσματα καθαρού χαλκού. Η διαβρωτικότητα αυτή εκδηλώνεται με την αμαύρωση του χαλκού, ο βαθμός της οποίας είναι ανάλογος προς την περιεκτικότητα θείου. Τα ελάσματα του χαλκού εμβαπτίζονται στο δείγμα που εξετάζεται και διατηρούνται σ' αυτό επί 3 ώρες σε θερμοκρασία 50°C. Η αμαύρωση του χαλκού συγκρίνεται με μια σειρά από πρότυπα δοκίμια χαλκού και βαθμολογείται ανάλογα. Μόνο μια ελαφρά αλλοίωση της αρχικής απόχρωσης επιτρέπεται, που στην παραπάνω κλίμακα βαθμολογείται με μονάδα (1). Οι προδιαγραφές καθορίζουν όρια μόνο για τα αποστάγματα, όπως βενζίνες, κηροζίνη, πετρέλαιο diesel. Για το μαζούτ δεν καθορίζονται όρια, άρα η δοκιμή αυτή δεν εφαρμόζεται για μαζούτ, γιατί, όπως είναι ευνόητο, η αμαύρωση καλύπτεται από το χρώμα του μαζούτ.

## 12.8 Θερμαντική ικανότητα ή θερμογόνος δύναμη

**Θερμαντική ικανότητα** ενός καυσίμου είναι το ποσό της θερμότητας που παράγεται κατά την τέλεια καύση της μονάδας βάρους του καυσίμου αυτού υπό ορισμένες συνθήκες. Είναι ένα από τα σπουδαιότερα χαρακτηριστικά ενός καυσίμου, αφού από τη θερμαντική ικανότητα εξαρτάται το ποσό ενέργειας που θα παραχθεί κατά την καύση του καυσίμου στη μηχανή. Τη σημασία της θερμαντικής ικανότητας για τα υγρά καύσιμα, και κυρίως για τα πετρελαιοειδή, μειώνει το γεγονός ότι η τιμή της για τα καύσιμα αυτά κυμαίνεται σε περιορισμένα όρια (8.500–11.000 kcal/kg). Αντίθετα για τα στερεά καύσιμα ποικίλλει σε πολύ ευρέα όρια που κυμαίνονται από 1.000–8.800 kcal/kg και αποτελεί το σπουδαιότερο χαρακτηριστικό τους.

Για τα αέρια καύσιμα η θερμογόνος δύναμη εκφράζεται και σε kcal/m<sup>3</sup>. Η μετατροπή από kcal/kg σε kcal/m<sup>3</sup>, μπορεί εύκολα να γίνει, πολλαπλασιάζοντας κάθε φορά την τιμή kcal/kg επί την πυκνότητα τού καυσίμου, όπως παρουσιάζει ο πίνακας 12.1

Η μέτρηση της θερμαντικής ικανότητας γίνεται με

**Πίνακας 12.1**  
**Θερμογόνος δύναμη διαφόρων καυσίμων σε διαφορετικές μονάδες**

| Είδος καυσίμου                             | Q <sub>A</sub><br>(kcal/kg) | Πυκνότητα<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Q <sub>A</sub><br>(kcal/m <sup>3</sup> ) |
|--|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| Υδρογόνο                                   | 34.400                      | 0,089                             | 3.071                                    |
| Μεθάνιο (CH <sub>4</sub> )                 | 13.100                      | 0,714                             | 9.355                                    |
| Αιθάνιο (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )   | 12.300                      | 1,34                              | 16.470                                   |
| Προπάνιο (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )  | 11.900                      | 1,96                              | 23.345                                   |
| Βουτάνιο (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) | 11.700                      | 2,58                              | 30.290                                   |
| Ασετυλίνη                                  | 12.000                      | 1,176                             | 13.990                                   |
| Μονοξ. άνθρακα (CO)                        | 2.430                       | 1,25                              | 3.038                                    |

**τέλεια καύση** ορισμένης ποσότητας δείγματος του καυσίμου με καθαρό οξυγόνο σε πίεση 25 bar υπό καθορισμένες συνθήκες. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για την καύση αυτή είναι γνωστή ως **θερμιδομετρική οβίδα** ή **θερμιδομετρικός όλμος**. Αυτή τοποθετείται μέσα στο θερμιδόμετρο μαζί με ορισμένη ποσότητα νερού (σχ. 12.11).

Ο υπολογισμός της θερμότητας Q που παράγεται κατά την καύση γίνεται με τη γνωστή από τη θερμιδομετρία σχέση (6). Η θερμότητα αυτή ανάγεται ανά μονάδα βάρους του καυσίμου (συνήθως kg), πράγμα που αντιστοιχεί στην έννοια της θερμαντικής ικανότητας.

$$Q = c_p \cdot (\theta_2 \cdot \theta_1) \quad (6)$$

όπου: Q είναι η θερμότητα που παράγεται από την καύση ορισμένης γνωστής ποσότητας καυσίμου σε kcal,  $\theta_1$  είναι η αρχική θερμοκρασία του νερού (σε °C) στο θερμιδόμετρο (πριν την καύση),  $\theta_2$  είναι η τελική θερμοκρασία του νερού (σε °C) στο θερμιδόμετρο (μετά την καύση) και  $c_p$  είναι η σταθερά του θερμιδομέτρου, ανά βαθμό θερμοκρασίας.

Η σταθερά του θερμιδομέτρου υπολογίζεται αν κάνουμε θερμιδομέτρηση με καύσιμο γνωστής θερμαντικής ικανότητας Q και λύσουμε την εξίσωση (6) ως προς  $c_p$ .

Η εξίσωση (6) βασίζεται στην απλή σκέψη ότι το ποσό της θερμότητας που παράγεται κατά την καύση του δείγματος καυσίμου, είναι αυτό που απορροφά το θερμιδόμετρο. Η μόνωση της συσκευής περιορίζει τις απώλειες της θερμότητας σε όρια αμελητέα. Για πιο ακριβή αποτελέσματα θερμιδομετρήσεων πρέπει να γίνονται διορθώσεις:

1) Για το περιεχόμενο θείο, που μέσα στο θερμιδόμετρο μετατρέπεται σε θειικό οξύ.

2) Για το άζωτο, που στο θερμιδόμετρο μετά την καύση μετατρέπεται σε νιτρικό οξύ.

3) Για τις απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον.



### Άσκηση

Σε θερμιδόμετρο καίγεται ποσότητα 0,96 g μαζούτ, οπότε παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του νερού του θερμιδομέτρου από 14,45°C σε 16,55°C. Ζητείται η θερμαντική ικανότητα του μαζούτ, αν η σταθερά του θερμιδομέτρου είναι  $c_p = 4,92$ .

Θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (6):

$$Q = 4,92 \cdot (16,55 - 14,45) = 4,92 \cdot 2,10 = 10,332 \text{ kcal}$$

Έτσι βρήκαμε ότι από 0,96 g μαζούτ παράγονται 10,332 kcal. Για την αναγωγή στο 1 kg μαζούτ έχουμε:

$$Q(1 \text{ kg}) = \frac{Q(0,96 \text{ g}) \cdot 1.000}{0,96} = \frac{10,332 \cdot 1.000}{0,96} = 10.762,5 \text{ kcal}$$

Άρα η θερμαντική ικανότητα του δείγματος μαζούτ είναι 10.762 kcal/kg.

### -Έμμεσοι τρόποι υπολογισμού της θερμαντικής ικανότητας

Τη θερμαντική ικανότητα του καυσίμου μπορούμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά με δύο έμμεσους τρόπους, που περιγράφονται παρακάτω:

#### 1) Από τη χημική σύσταση του καυσίμου

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη διαπίστωση ότι τα στοιχεία, από τα οποία αποτελείται το καύσιμο, αποδίδουν κατά την τέλεια καύση τους το ίδιο ποσό θερμότητας, είτε καίγονται μόνα τους, δηλαδή το καθένα χωριστά, είτε καίγονται υπό τη μορφή των χημικών ενώσεων που αποτελούν το καύσιμο.

Οι επί μέρους θερμαντικές ικανότητες των βασικών συστατικών των καυσίμων είναι:

1) Για τον άνθρακα (C) 8.100 kcal/kg (33.800 kJ/kg).

2) Για το υδρογόνο (H) 34.400 kcal/kg (144.000 kJ/kg).

3) Για το θείο (S) 2.500 kcal/kg (10.400 kJ/kg).

Το οξυγόνο όχι μόνο δεν δίνει θερμότητα κατά την καύση του καυσίμου, αλλά, αντίθετα θεωρείται ότι έχει δεσμεύσει στο μόριο του καυσίμου υδρογόνο

ίσο με το  $\frac{1}{8}$  του βάρους του, γιατί μ' αυτή την αναλογία ενώνονται τα δύο αυτά στοιχεία μεταξύ τους. Η δέσμευση αυτή του υδρογόνου πρέπει να αφαιρείται κατά τον υπολογισμό της θερμαντικής ικανότητας του καυσίμου. Έτσι καταλήγουμε στη σχέση:

$$Q_A = 8.100 \cdot C + 34.400 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2.500 \cdot S \text{ kcal/kg} \quad (7)$$

όπου: C είναι η περιεκτικότητα άνθρακα στο καύσιμο σε kg/kg καυσίμου, H είναι η περιεκτικότητα υδρογόνου στο καύσιμο σε kg/kg καυσίμου, S είναι η περιεκτικότητα θείου στο καύσιμο σε kg/kg καυσίμου και O είναι η περιεκτικότητα οξυγόνου στο καύσιμο σε kg/kg καυσίμου.

Ο συμβολισμός  $Q_A$  παριστάνει την **ανώτερη θερμογόνο δύναμη** ή **ανώτερη θερμαντική ικανότητα** του καυσίμου, δηλαδή το ποσό της θερμότητας που παράγεται υπό καθορισμένες συνθήκες κατά την τέλεια καύση του. Η θερμότητα αυτή αντιστοιχεί σ' αυτήν που μετριέται με τη θερμιδομετρική οβίδα σε 25°C, οπότε το παραγόμενο νερό είναι σε υγρή κατάσταση. Το εκμεταλλεύσιμο όμως ποσό θερμότητας, που ονομάζεται **κατώτερη θερμαντική ικανότητα** (ή **θερμογόνο δύναμη**) και συμβολίζεται με  $Q_K$  είναι μικρότερο, γιατί μέρος της παραγόμενης θερμότητας συγκρατεί ο υδρατμός που υπάρχει στα προϊόντα της καύσης. Ο υδρατμός αυτός προέρχεται από την εξάτμιση της υγρασίας ή του νερού που το καύσιμο περιέχει, και από την καύση του υδρογόνου.

Αν ληφθεί υπόψη ότι:

1) Από H kg υδρογόνου παράγονται κατά την καύση 9H kg νερού και

2) κάθε kg νερού δεσμεύει 600 kcal περίπου για να μετατραπεί σε κατάσταση υδρατμού (λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης), τότε η προσεγγιστική σχέση που συνδέει την ανώτερη θερμαντική ικανότητα  $Q_A$  με την κατώτερη θερμαντική ικανότητα  $Q_K$  θα είναι:

$$Q_K = Q_A - 600 (9 \cdot H + Y) \text{ kcal/kg} \quad (8)$$

όπου: Y είναι η περιεκτικότητα νερού στο καύσιμο σε kg/kg καυσίμου.

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (7) και (8) μπορούμε να υπολογίσουμε την κατώτερη θερμαντική ικανότητα από την εξίσωση:

$$Q_K = 8.100 \cdot C + 29.000 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2.500 \cdot S - 600 \cdot Y \text{ kcal/kg}$$



### Άσκηση

Η χημική σύσταση ενός πετρελαίου Diesel έδωσε: C: 82%, H: 12%, O: 0,8%, S: 1,2% και νερό (Υ): 4%.

Να βρεθούν η ανώτερη και η κατώτερη θερμαντική ικανότητά του. Θα χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις (7) και (8) για τον προσδιορισμό των ζητούμενων.

$$Q_A = 8.100 \cdot 0,82 + 34.400 \cdot \left(0,12 - \frac{0,008}{8}\right) + 2.500 \cdot 0,012 = 6.642 + 4.093,6 + 30 = 10.765,6 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_K = 10.765,6 - 600 (9 \cdot 0,12 + 0,04) = 10.765,6 - 600 \cdot 1,12 = 10.093,6 \text{ kcal/kg}$$

Άρα:

$$Q_A = 10.765,6 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{και } Q_K = 10.093,6 \text{ kcal/kg.}$$

Οι παραπάνω τύποι (7) και (8) ισχύουν με την παραδοχή ότι τα συστατικά των καυσίμων (άνθρακας, υδρογόνο, θείο) είναι ελεύθερα, επομένως δεν λαμβάνεται υπόψη η **ενέργεια σχηματισμού**, δηλαδή η θερμότητα που έχει δαπανηθεί για τον σχηματισμό του καυσίμου που αποτελούν.

Ονομάζεται, λοιπόν, **ενέργεια σχηματισμού** το ποσό θερμότητας, που απαιτείται για τον σχηματισμό μιας χημικής ένωσης. Το ποσό αυτό άλλοτε είναι θετικό, δηλαδή η θερμότητα εκλύεται κατά τον σχηματισμό της ένωσης, όπως π.χ. συμβαίνει με το μεθάνιο (εξώθερμη αντίδραση) και άλλοτε είναι αρνητικό, δηλαδή η θερμότητα απορροφάται κατά τον σχηματισμό της ένωσης, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με το ακετυλένιο (ενδόθερμη αντίδραση). Φυσικό, είναι, λοιπόν κατά την καύση να υπολογίζεται και η θερμότητα σχηματισμού, αφού τόση θερμότητα απαιτείται για τη διάσπαση του καυσίμου στα συστατικά του, ώστε ελεύθερα πλέον να μπορούν να ενωθούν με το οξυγόνο για την καύση.

Για τον λόγο αυτό, όταν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός της θερμαντικής ικανότητας ενός καυσίμου, αντί του υπολογισμού με τις παραπάνω εξισώσεις (7) και (8), είναι προτιμότερος ο πειραματικός προσδιορισμός με τη θερμιδομετρική οβίδα, όπως έχει ήδη περιγραφεί.

### 2) Από την πυκνότητα του καυσίμου στη θερμοκρασία αναφοράς 15°C

Ισχύει μόνο για τα υγρά καύσιμα και μάλιστα για τα πετρελαιοειδή, στα οποία έχει παρατηρηθεί ότι η θερμαντική ικανότητα είναι μικρότερη στα βαρύτερα καύσιμα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι τα βαρύτερα καύσιμα, όπως το μαζούτ, έχουν σχέση C/H μεγαλύτερη απ' αυτήν που έχουν τα ελαφρότερα κλάσματα, και έτσι αποδίδουν λιγότερες θερμίδες, αφού η θερμαντική ικανότητα του άνθρακα είναι περίπου το  $\frac{1}{4}$  της θερμαντικής ικανότητας του υδρογόνου.

Για τον υπολογισμό της θερμαντικής ικανότητας με βάση την πυκνότητα  $d_{15}$  του καυσίμου εφαρμόζεται ο εμπειρικός τύπος:

$$Q = 12.400 - 2100 \cdot d_{15}^2 \text{ kcal/kg}$$

Στην παράγραφο 12.3.2 αναλύθηκε η σημασία του τύπου και δόθηκε ένα παράδειγμα.

Τα αποτελέσματα από την παραπάνω σχέση είναι λίγο μεγαλύτερα από τα πραγματικά.

Ένας άλλος τρόπος διάκρισης της θερμογόνου δύναμης ενός καυσίμου είναι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η καύση, δηλαδή:

1) **Θερμογόνος δύναμη υπό σταθερή πίεση** ( $Q_p$ ), όταν η καύση γίνεται υπό σταθερή πίεση.

2) **Θερμογόνος δύναμη υπό σταθερό όγκο** ( $Q_v$ ), όταν η καύση γίνεται υπό σταθερό όγκο.

Είναι φανερό ότι η  $Q_p$  είναι μεγαλύτερη της  $Q_v$  διότι, όταν η καύση γίνεται υπό σταθερή πίεση και το σχηματιζόμενο νερό είναι σε υγρή κατάσταση τότε παράγεται από την ατμόσφαιρα έργο  $W_A$ , που αποδίδεται στο σύστημα, δηλαδή:

$$Q_p = Q_v + W_A$$

Ευνόητο είναι ότι η παραπάνω διάκριση αφορά τόσο στην ανώτερη όσο και στην κατώτερη θερμογόνου δύναμη, δηλαδή θα έχουμε:

$$Q_{A(p)} = Q_{A(v)} + W_A$$

$$Q_{K(p)} = Q_{K(v)} + W'_A$$

Οι τιμές του έργου  $W_A$  ή  $W'_A$  εξαρτώνται από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε H και O (εκτός H και O που υπάρχουν στο νερό που το καύσιμο περιέχει) και δίδονται κατά προσέγγιση με τον τύπο.

$$W_A = 1,5 \cdot H - 0,20 \text{ kcal/kg}$$

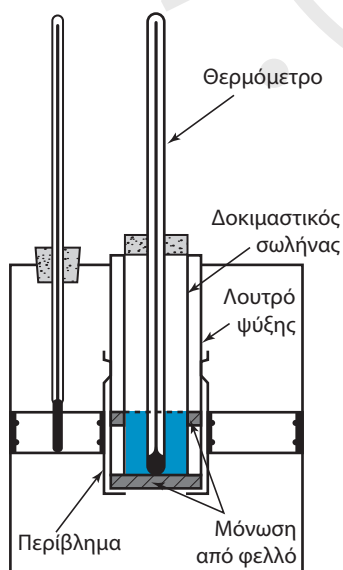
## 12.9 Σημείο ροής

**Σημείο ροής** (pour point) είναι η κατώτατη θερμοκρασία μέχρι την οποία το καύσιμο διατηρεί τη ρευστότητά του, μπορεί δηλαδή να ρέει κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Για τη μέτρηση χρησιμοποιείται απλή συσκευή, όπως αυτή που εικονίζεται στο σχήμα 12.12. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D97 – 08, το δείγμα ψύχεται με ορισμένη ταχύτητα σε δοκιμαστικό σωλήνα ορισμένων διαστάσεων που φέρεται σε ψυκτικό θάλαμο. Δοκιμή για διαπίστωση ροής ή όχι γίνεται σε κάθε 3°C πτώση της θερμοκρασίας (δοκιμάζεται κατά πόσο το δείγμα διατηρεί τη ρευστότητά του). Καταγράφεται η θερμοκρασία εκείνη στην οποία η ελεύθερη επιφάνεια του δείγματος δεν παρουσιάζει πλέον κύρτωση, όταν ο δοκιμαστικός σωλήνας τοποθετηθεί σε οριζόντια θέση επί 5 s. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται **θερμοκρασία ακινησίας** (freezing point).

Το σημείο ροής ορίζεται συμβατικά 3°C πάνω από τη θερμοκρασία ακινησίας.

Σημαντικό επίσης στην ψυχρή ροή καυσίμων είναι και το **σημείο απόφραξης ψυχρού φίλτρου** (Cold Filter Plugging Point – CFPP), που βρίσκεται κοντά στη θερμοκρασία, στην οποία τα καύσιμα χάνουν τη διαυγεία τους λόγω σχηματισμού κρυστάλλων από παραφινικά συστατικά. Κάτω από το CFPP το καύσιμο δεν οδηγείται προς τη μηχανή γιατί θα προκαλέσει προβλήματα στα φίλτρα.



Σχ. 12.12

Συσκευή προσδιορισμού σημείου ροής



## Παράδειγμα

Αν ένα πετρέλαιο Diesel δίνει με την παραπάνω μέθοδο σημείο ακινησίας ίσο με  $-17^{\circ}\text{C}$ , τότε το σημείο ροής του θα είναι ίσο με:

$$-17 + 3 = -14^{\circ}\text{C}$$

## 12.10 Μέτρηση του νερού

Η παρουσία του νερού στα καύσιμα είναι γενικά ανεπιθύμητη, για τρεις κυρίως λόγους:

- 1) Προκαλεί διαβρώσεις,
- 2) είναι δυνατόν σε χαμηλές θερμοκρασίες να προκαλέσει απόφραξη του δικτύου από τον πάγο που μπορεί να σχηματισθεί και
- 3) μπορεί να διαχωρισθεί κατά την προθέρμανση και να προκαλέσει στους καυστήρες σβήσιμο της φλόγας από τον παραγόμενο υδρατμό.

Η παρουσία του νερού στα αποστάγματα (βενζίνες, κηροζίνη, πετρέλαιο diesel) προδίδεται κατά τη μακροσκοπική εξέταση (βλ. § 12.2). Άλλωστε τα καύσιμα αυτά δεν συγκρατούν νερό ή το αποβάλλουν εύκολα με απλή καθίζηση.

Αντίθετα, για τα βαρύτερα καύσιμα (μαζούτ), η μέτρηση της περιεκτικότητας του νερού μπορεί να γίνει με δυο τρόπους:

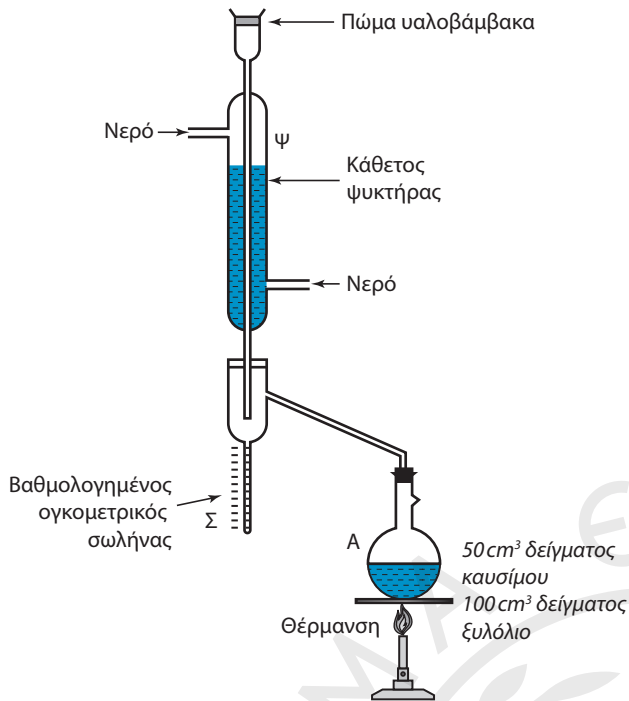
1) Με φυγοκέντριση, οπότε συμπροσδιορίζονται και οι άλλες ξένες ύλες που το καύσιμο περιέχει. Το σύνολο του νερού και των ξένων υλών εκφράζεται ως αριθμός κατακρήμνισης ή ως ξένες ύλες μέσω φυγοκέντρισης (BSW).

2) με τη συσκευή του σχήματος 12.13 (μέθοδος Dean and Stark). Το δείγμα θερμαίνεται στη σφαιρική φιάλη Α με ξυλόλιο ή με άλλο διαλυτικό, που κατά το βρασμό παρασύρει τους υδρατμούς στον κάθετο ψυκτήρα Ψ, όπου και συμπυκνώνονται. Το συμπύκνωμα συλλέγεται στον βαθμολογημένο σωλήνα Σ, στον πυθμένα του οποίου συγκεντρώνεται το νερό, όπου και μετρείται με απλή ανάγνωση του όγκου του.

## 12.11 Εξανθράκωμα

**Εξανθράκωμα** (carbon residue) είναι το **ανθρακούχο υπόλειμμα** που παραμένει μετά την ατελή καύση δείγματος καυσίμου κάτω από ορισμένες συνθήκες. Κύριο γνώρισμα των συνθηκών αυτών είναι η έλλειψη επαρκούς αέρα και η σχετικά υψηλή θερμοκρασία στην οποία γίνεται η εξανθράκωση. Μ' αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζονται συνθήκες κάτω από τις οποίες θα





Σχ. 12.13

Συσκευή προσδιορισμού νερού στα καύσιμα (Dean and Stark)

μπορούσε ίσως να βρεθεί το καύσιμο κατά την καύση του. Η τιμή του εξανθράκωματος εκφράζει την τάση του καυσίμου να σχηματίζει ανθρακούχα κατάλοιπα κατά την καύση του. Το εξανθράκωμα εμφανίζεται στα βαρύτερα καύσιμα, όπως το πετρέλαιο diesel και το μαζούτ, η μέθοδος Conradson και Ramsbottom. Ειδικότερα:

Υπάρχουν δυο μέθοδοι για τη μέτρηση του εξανθράκωματος, η μέθοδος Conradson και Ramsbottom: Ειδικότερα:

### 1) Μέθοδος Conradson

Το δείγμα του καυσίμου θερμαίνεται σε ειδικό χωνευτήριο πορσελάνης, που τοποθετείται σε δεύτερο μεταλλικό χωνευτήριο όπως φαίνεται στο σχήμα 12.14. Και τα δυο χωνευτήρια σκεπάζονται με κάλυμμα που αφήνει λίγο αέρα να περνάει στο δείγμα για την καύση του. Και τα δυο χωνευτήρια περιβάλλονται από ένα εξωτερικό περίβλημα που καταλήγει σε είδος καπνοδόχου εξασφαλίζοντας φυσικό ελκυσμό του αέρα που απαιτείται για την καύση. Έτσι η καύση γίνεται με ελεγχόμενες συνθήκες, ώστε τα αποτελέσματα του προσδιορισμού να είναι συγκρίσιμα.

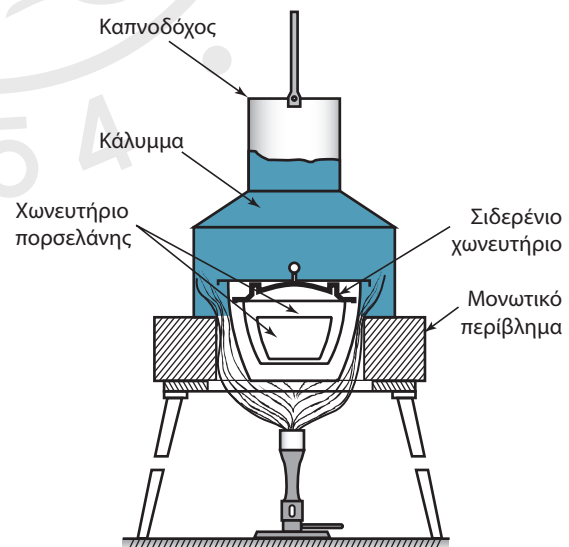
Το δείγμα θερμαίνεται στην αρχή έντονα με λύχνο Bunsen επί  $10 \pm 1,5$  min, οπότε οι σχηματιζόμενοι

ατμοί αναφλέγονται και η καύση συνεχίζεται επί  $13 \pm 1$  min ακόμα, μετά το πέρας της οποίας η πύρωση με τον λύχνο συνεχίζεται για 7 min ακριβώς, έτσι ώστε η όλη διαδικασία εξανθράκωσης να διαρκεί γύρω στα 30 min. Κατόπιν το δείγμα αφού ψυχθεί επί 15 min, ζυγίζεται και προσδιορίζεται το ανθρακούχο υπολείμμα, αναγόμενο σε % του αρχικού δείγματος.

### 2) Μέθοδος Ramsbottom

Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του εξανθράκωματος παρουσιάζεται στο σχήμα 12.14 και διαφέρει από την προηγούμενη, κυρίως κατά το ότι η απανθράκωση δεν γίνεται σε προοδευτικά αυξανόμενη θερμοκρασία, αλλά σε σταθερή θερμοκρασία και σε κλειστό δοχείο που απολήγει στο άνω μέρος σε τριχειδή σωλήνα, μέσα από τον οποίο διαφεύγουν οι παραγόμενοι ατμοί του καυσίμου. Η διάρκεια της εξανθράκωσης δοκιμής είναι  $20 \pm 2$  min και η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στους  $550^\circ\text{C}$ .

Πρέπει να σημειωθεί ότι για τα βαριά καύσιμα (μαζούτ) το εξανθράκωμα προσδιορίζεται στο δείγμα όπως είναι, ενώ στα αποστάγματα (πετρέλαιο diesel) μετρείται στο 10% του υπολείμματος που απομένει μετά την απόσταξη των ελαφρύτερων κλασμάτων. Και αυτό γιατί η τάση σχηματισμού εξανθρακωμάτων στα ελαφρά κλάσματα, όπως το πετρέλαιο diesel, συνδέεται προς τα βαρύτερα συστατικά τους, που περιέχονται στο 10% του υπολείμματος, ενώ τα ελαφρότερα



Σχ. 12.14

Συσκευή μέτρησης εξανθράκωματος με τις μεθόδους Conradson και Ramsbottom

συστατικά είναι πητικότερα και καίγονται συνήθως προτού προλάβουν να αφήσουν εξανθρακώματα.

### 12.12 Σημείο ανιλίνης

**Σημείο ανιλίνης** ονομάζεται η κατώτερη θερμοκρασία πάνω από την οποία μείγμα ίσων όγκων καυσίμου και ανιλίνης αναμειγνύεται πλήρως, σχηματίζοντας ομογενές μείγμα.

Πράγματι αν αναμειξουμε ίσους όγκους πετρελαίου και ανιλίνης θα παρατηρήσουμε ότι τα δυο υγρά στη συνηθισμένη θερμοκρασία δεν αναμειγνύονται πλήρως, αλλά σχηματίζουν γαλάκτωμα, που διαυγάει από μια θερμοκρασία και πάνω. Αυτή τη θερμοκρασία ονομάζουμε **σημείο ανιλίνης**. Η μέτρηση του σημείου ανιλίνης γίνεται σε γυάλινο κυλινδρικό δοχείο στο οποίο το μείγμα του καυσίμου με την ανιλίνη θερμαίνεται με ορισμένο ρυθμό, υπό συνεχή ανάδευση, ώσπου να διαυγάσει εντελώς. Κατόπιν αφήνεται να ψυχθεί σιγά-σιγά και καταγράφεται η θερμοκρασία στην οποία το μείγμα χάνει την αναμειξιμότητά του, οπότε εμφανίζεται θόλωμα.

Η θερμοκρασία αυτή είναι το σημείο ανιλίνης και εξαρτάται από τη μοριακή δομή των υδρογονανθράκων που αποτελούν το καύσιμο. Γι' αυτόν τον λόγο η τιμή του σημείου ανιλίνης παρέχει ενδείξεις ή χρησιμοποιείται έμμεσα για ορισμένες ιδιότητες που εξαρτώνται από το είδος των υδρογονανθράκων που περιέχονται στο καύσιμο. Το σημείο ανιλίνης είναι υψηλό για τους παραφινικούς υδρογονάνθρακες και χαμηλό για τους αρωματικούς υδρογονάνθρακες.

### 12.13 Βανάδιο

Ο ακριβής προσδιορισμός της περιεκτικότητας των καυσίμων σε βανάδιο, έχει για τα καύσιμα των πετρελαιομηχανών, αλλά και για το μαζούτ, ιδιαίτερη σημασία, γιατί το στοιχείο αυτό είναι εξαιρετικά επι-

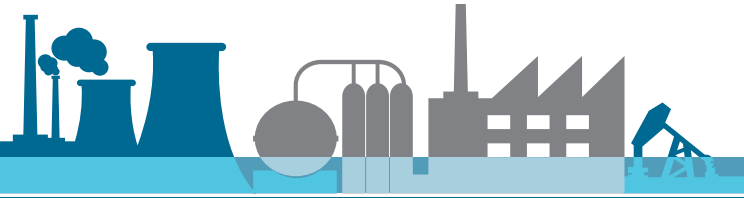
βλαβές, όταν η παρουσία του υπερβαίνει ορισμένα όρια (βλ. § 8.5.4).

Ο προσδιορισμός του βαναδίου γίνεται με χρωματομετρικές μεθόδους. Βασίζεται δηλαδή, σε χρωστικές αντιδράσεις που το στοιχείο αυτό δίνει με ορισμένα χημικά αντιδραστήρια. Η ένταση του χρώματος που οι αντιδράσεις αυτές προκαλούν είναι ανάλογη προς την περιεκτικότητα σε βανάδιο. Η σύγκριση γίνεται με πρότυπα διαλύματα γνωστής περιεκτικότητας σε βανάδιο ή με πρότυπες χρωματιστές πλάκες που αντιστοιχούν σε ορισμένη περιεκτικότητα βαναδίου.

Μια τέτοια συσκευή, που διαθέτουν πολλά πλοία, επιτρέπει ένα γρήγορο και ακριβή προσδιορισμό του βαναδίου από το προσωπικό του πλοίου. Από τα αποτελέσματα της μέτρησης αυτής καθορίζεται η δόση των χημικών ουσιών που πρέπει να προστεθούν στο πετρέλαιο για την εξουδετέρωση των δυσμενών επιδράσεων του βαναδίου (βλ. § 8.6.5).

Το δείγμα ζυγίζεται με ακρίβεια (10 g) σε κάψα πορσελάνης όπου στην αρχή καίγεται και μετά αποτεφρώνεται με πύρωση σε 525°C μέσα στον κλίβανο που είναι βασικό εξάρτημα της συσκευής. Στην τέφρα που περιέχει το βανάδιο ως οξείδιο, προστίθεται πυκνό οξύ που το διαλύει και μετά από διήθηση, προστίθεται στο διαυγές διήθημα το αντιδραστήριο Β που προκαλεί τη χρωστική αντίδραση. Από τη σύγκριση του χρώματος αυτού με το χρώμα προτύπων διαλυμάτων βρίσκεται η περιεκτικότητα του βαναδίου.

Ο ακριβής προσδιορισμός του βαναδίου, αλλά και των άλλων μεταλλικών προσμείξεων που τα καύσιμα περιέχουν, γίνεται σήμερα με φασματομετρικές μεθόδους, από τις οποίες σημαντικότερη είναι η φασματομετρία ατομικής απορρόφησης. Οι συσκευές αυτές είναι υψηλού κόστους και απαιτούν προσεκτικό χειρισμό από εξειδικευμένο προσωπικό, γι' αυτό και βρίσκονται σε αναλυτικά εργαστήρια.



### 13.1 Σκοπός και σημασία της λίπανσης

**Λίπανση** είναι η παρεμβολή μιας ουσίας μεταξύ δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή και τριβονται. Η ουσία αυτή λέγεται **λιπαντικό** και έχει ως σκοπό:

1) Να μειώσει την τριβή μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, με αποτέλεσμα:

α) Την ελάττωση των απωλειών λόγω τριβής, άρα και τη βελτίωση του μηχανικού βαθμού απόδοσης της μηχανής, στην οποία ανήκουν οι επιφάνειες αυτές και  
β) τον περιορισμό της φθοράς λόγω τριβής.

2) Να **απάγει τη θερμότητα** που αναπτύσσεται λόγω τριβής. Στην περίπτωση αυτή το λιπαντικό δρα ως **ψυκτικό** μέσο. Ιδιαίτερη σημασία έχει στην περίπτωση αυτή η ψύξη των κυλίνδρων MEK.

3) Να **στεγανοποιήσει τον χώρο καύσης στις MEK**. Το λιπαντικό στην περίπτωση αυτή συμπληρώνει τη στεγανοποίηση του χώρου καύσης, την οποία ως ένα βαθμό εξασφαλίζουν τα ελατήρια.

4) Να **προστατεύσει τα μεταλλικά μέρη της μηχανής από τη διάβρωση**. Η προστασία αυτή διαρκεί και κατά τον χρόνο που η μηχανή δεν εργάζεται. Σ' αυτό βοηθά και το γεγονός ότι τα περισσότερα λιπαντικά έχουν καλή πρόσφυση πάνω στα μέταλλα.

5) Να **διατηρεί την καθαρότητα των μεταλλικών μερών της μηχανής**, με τα οποία το λιπαντικό έρχεται σε επαφή. Αυτό οφείλεται στις **απορρυπαντικές ιδιότητες** που το λιπαντικό αποκτά με την προσθήκη ειδικών χημικών προσθέτων.

Μεγαλύτερη σημασία από τα παραπάνω έχει η ελάττωση της τριβής, που είναι και η σπουδαιότερη αποστολή της λίπανσης.

### 13.2 Τριβή

**Τριβή** είναι η δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ δύο σωμάτων, από τα οποία το ένα μετακινείται πάνω στο άλλο, που θεωρείται ακίνητο. Η δύναμη τριβής ενεργεί προς την αντίθετη διεύθυνση από εκείνη που έχει η σχετική κίνηση των δύο επιφανειών, την οποία με τον τρόπο αυτό εμποδίζει. Το κατά πόσο την εμπο-

δίζει εξαρτάται από το είδος της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο επιφανειών που εφάπτονται.

Διακρίνονται δύο είδη τριβής:

1) Η **στατική τριβή** κατά την οποία οι δύο επιφάνειες είναι ακίνητες και αρχίζουν να κινούνται με τον παραπάνω τρόπο.

2) Η **κινητική τριβή** κατά την οποία οι δύο επιφάνειες κινούνται ήδη κανονικά.

Κατά μία άλλη διάκριση έχουμε:

1) Την **τριβή ολίσθησης**, που αναπτύσσεται όταν ένα σώμα γλιστράει (ολισθαίνει) πάνω σε μια επιφάνεια και

2) την **τριβή κύλισης**, όταν ένα σώμα κυλάει πάνω σε μια επιφάνεια.

Η στατική τριβή είναι μεγαλύτερη από την κινητική τριβή και διαρκεί στιγμιαία, όταν οι επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή είναι ακίνητες ή ακριβώς τη στιγμή που ξεκινούν να κινούνται.

Η τριβή ολίσθησης είναι πάντα μεγαλύτερη από την τριβή κύλισης, γιατί προϋποθέτει μεγάλες επιφάνειες σε επαφή, όπως συμβαίνει κατά την παλινδρόμηση των εμβόλων στους κυλίνδρους των μηχανών. Κατά την τριβή κύλισης το ένα από τα δύο τριβόμενα σώματα εφάπτεται στο άλλο με μια γραμμή, όπως συμβαίνει στα κυλινδρικά ρουλεμάν ή με ένα σημείο, όπως συμβαίνει στα σφαιρικά ρουλεμάν.

Μια άλλη διάκριση τριβών είναι:

1) Η **ξηρή τριβή**, όταν μεταξύ των δύο επιφανειών δεν παρεμβάλλεται καμιά τρίτη ουσία και

2) η **υγρή τριβή**, όταν μεταξύ των δύο επιφανειών παρεμβάλλεται τρίτη ουσία, το λιπαντικό μέσο, σε μορφή λιπαντικής μεμβράνης (βλ. § 13.5).

Το πάχος της **λιπαντικής μεμβράνης** διαμορφώνει και το είδος της λίπανσης, με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε διάκριση σε:

1) **Υδροδυναμική λίπανση**, όταν η λιπαντική μεμβράνη έχει σημαντικό πάχος και

2) **Οριακή λίπανση**, όταν το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης είναι σχετικά μικρό.

Μέτρο της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ δύο

επιφανειών είναι ο λεγόμενος **συντελεστής τριβής**. Δηλαδή το πηλίκο  $F/B$ , της ελάχιστης δύναμης  $F$ , που απαιτείται για να υπερνικηθεί η αντίσταση τριβής, που προβάλλει ένα σώμα βάρους  $B$ , όταν γλιστράει ή κυλάει πάνω σε μια επιφάνεια, προς το βάρος  $B$ .

$$\mu = \frac{F}{B}$$



### Παράδειγμα

Ο συντελεστής τριβής  $\mu = 0,15$  υποδηλώνει ότι για να υπερνικηθεί η αντίσταση τριβής ενός σώματος βάρους  $10\text{ N}$  (μάζας  $1\text{ kg}$ ) στην προσπάθεια μετακίνησής του σε μια οριζόντια επιφάνεια, απαιτείται δύναμη  $F$  τουλάχιστον  $1,5\text{ N}$ . Αυτή υπολογίστηκε ως εξής:

$$F = \mu \cdot B = 0,15 \cdot 10\text{ N} = 1,5\text{ N}$$

Κατά την τριβή κύλισης οι τιμές του συντελεστή τριβής  $\mu$ , είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές του  $\mu$  κατά την τριβή ολίσθησης.

Η ορθή λίπανση των διαφόρων μηχανών αποβλέπει ακριβώς στο να μετατρέπει την ξηρή τριβή σε υγρή και αν είναι δυνατό στην ελαχιστοποίηση των συντελεστών τριβής  $\mu$ , με την παρεμβολή του λιπαντικού. Επίσης αποβλέπει και στην κατά το δυνατό μεγαλύτερη χρησιμοποίηση της τριβής κύλισης από την τριβή ολίσθησης.

Στον πίνακα 13.1 αναγράφονται ενδεικτικές τιμές του συντελεστή τριβής  $\mu$ .

### 13.3 Έργο τριβής – Απώλειες λόγω τριβής

Κατά την περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα

**Πίνακας 13.1**  
**Τιμές συντελεστή τριβής  $\mu$**

|   |   |                      |
|---|---|----------------------|
| 1 | Ξύλο σε ξύλο ξηρό                             | $\mu = 0,25 - 0,50$  |
| 2 | Ξύλο σε ξύλο με σαπούνι                       | $\mu = 0,10 - 0,20$  |
| 3 | Ξύλο σε ξύλο με γράσο                         | $\mu = 0,004 - 0,10$ |
| 4 | Τριβή μεταξύ μετάλλων χωρίς λιπαντικό         | $\mu = 0,5 - 1,5$    |
| 5 | Τριβή μεταξύ μετάλλων με οριακή λίπανση       | $\mu = 0,05 - 0,15$  |
| 6 | Τριβή μεταξύ μετάλλων με υδροδυναμική λίπανση | $\mu = 0,001 - 0,03$ |

σε ένα έδρανο η δύναμη τριβής που αναπτύσσεται παράγει έργο. Το έργο αυτό είναι αρνητικό, δηλαδή αφαιρείται από το έργο που παράγει η μηχανή και έχει ως συνέπεια την ελάττωση του βαθμού απόδοσής της.

Το έργο τριβής ( $E_{\tau\rho}$ ) εύκολα υπολογίζεται από τη σχέση.

$$E_{\tau\rho} = F \cdot L \quad (1)$$

όπου:  $F$  η δύναμη τριβής και  $L$  το διάστημα (απόσταση) που διένυσε ένα σημείο του κομβίου βάσης/άξονα κατά την περιστροφή του.

Αν η ακτίνα του άξονα είναι  $R$ , τότε σε κάθε περιστροφή το διάστημα  $L$  θα είναι:

$$L = 2\pi \cdot R \quad (2)$$

Η δύναμη τριβής μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του συντελεστή τριβής  $\mu$  ως εξής:

$$F = \mu \cdot W \quad (3)$$

Από τις σχέσεις (1), (2) και (3) προκύπτει ότι το έργο τριβής, σε κάθε περιστροφή του άξονα στον οποίο ενεργεί φορτίο  $W$  θα είναι:

$$E_{\tau\rho} = 2\pi \cdot R \cdot \mu \cdot W \quad (4)$$

και αν ο άξονας περιστρέφεται με ταχύτητα  $N$  rpm (στροφές ανά λεπτό), το έργο τριβής θα είναι:

$$E_{\tau\rho} = 2\pi \cdot R \cdot \mu \cdot N \cdot W \text{ σε J/min} \quad (5)$$

και η ισχύς απωλειών θα είναι

$$P_{\tau\rho} = \frac{2\pi \cdot R \cdot \mu \cdot N \cdot W}{60} \text{ σε W} \quad (6)$$



### Παραδείγματα

1. Ελικοφόρος άξονας με διάμετρο  $40\text{ cm}$  και ολικό φορτίο  $15.000\text{ N}$  περιστρέφεται με ταχύτητα  $120\text{ rpm}$ . Να βρεθεί η απώλεια του έργου λόγω τριβής. Δίνεται ο συντελεστής τριβής  $\mu = 0,1$ .

#### Λύση

Από τα δεδομένα θέτουμε τα μεγέθη:

$$R = 0,20\text{ m}, W = 15.000\text{ N}, \mu = 0,1 \text{ και } N = 120\text{ rpm}$$

Έτσι εφαρμόζουμε τον τύπο (5) και παίρνουμε:

$$E_{\tau\rho} = 2\pi \cdot 0,2 \cdot 0,1 \cdot 120 \cdot 15.000 = 22.619,5\text{ J/min}$$

**2.** Στροφαλοφόρος άξονας με διάμετρο 12,5 cm και φορτίο 2.250 N εκτελεί 750 rpm. Σε ένα από τα έδρανά του ο συντελεστής τριβής έχει τιμή  $\mu = 0,04$ . Να υπολογισθεί η απώλεια έργου τριβής σ' αυτό το έδρανο.

### Λύση

Εργαζόμαστε στο Διεθνές Σύστημα (S.I.). Σε περίπτωση που κάποια μεγέθη δίνονται στο μετρικό ή το αγγλικό σύστημα θα μετατρέψουμε τις μονάδες στο SI πριν την εφαρμογή των τύπων.

Από τα δεδομένα θέτουμε τα μεγέθη:

$$R = 0,125 \text{ m}, W = 2.250 \text{ N}, \mu = 0,04 \text{ και } N = 750 \text{ rpm}$$

Έτσι εφαρμόζουμε τον τύπο (5) και το έργο τριβής για κάθε λεπτό λειτουργίας είναι:

$$E_{\text{τρ}} = 2\pi \cdot 0,125 \cdot 0,04 \cdot 750 \cdot 2.250 = 53.014 \text{ J/min}$$

Για να υπολογίσουμε την απώλεια ισχύος σε W παίρνουμε:

$$P_{\text{τρ}} = \frac{53.014}{60} = 883,57 = 1,185 \text{ HP}$$

δεδομένου ότι  $1 \text{ W} = 0,001341 \text{ HP}$  ή  $1 \text{ HP} = 745,71 \text{ W}$ .

**3.** Μηχανή ισχύος 180 HP δίνει στον κύριο άξονά της, που έχει διάμετρο 40 cm, ταχύτητα περιστροφής 1.500 rpm. Να βρεθεί η % απώλεια ισχύος σε ένα από τα σημεία έδρασης του άξονα, στο οποίο έχουμε συντελεστή τριβής  $\mu = 0,03$  και φορτίο  $W = 990 \text{ N}$ .

### Λύση

Θα προσδιοριστεί η ισχύς απωλειών από τον τύπο (5).

Από τα δεδομένα θέτουμε τα μεγέθη:

$$R = 0,20 \text{ m}, W = 990 \text{ N}, \mu = 0,03 \text{ και } N = 1.500 \text{ RPM}$$

Το έργο τριβής για κάθε λεπτό λειτουργίας είναι:

$$E_{\text{τρ}} = 2\pi \cdot 0,20 \cdot 0,03 \cdot 1.500 \cdot 990 = 55.983 \text{ J/min}$$

Η απώλεια ισχύος σε W θα είναι:

$$P_{\text{τρ}} = \frac{55.983}{60} = 933,05 \text{ W} = 1,251 \text{ HP}$$

και σε εκατοστιαία αναλογία έχουμε:

$$P_{\text{τρ}} \% = \frac{1,251}{180} = 0,695\%$$

## 13.4 Αποτελέσματα της τριβής

Το μεγαλύτερο μέρος του έργου, που παράγεται κατά την τριβή, όπως υπολογίζεται με τον τύπο (5), μετατρέπεται σε θερμότητα. Το ποσό της θερμότητας που παράγεται από την τριβή παρέχεται από τον τύπο:

$$Q = \frac{2\pi \cdot R \cdot \mu \cdot N \cdot W}{4,188} \text{ kcal/min}$$

Το ποσό της θερμότητας που παράγεται από την τριβή απορροφάται απ' το λιπαντικό, που έτσι επιτελεί το δεύτερο προορισμό του, δηλαδή να δρα ως ψυκτικό μέσο. Αν συνεπώς η λίπανση είναι ανεπαρκής, η θερμότητα που παράγεται από την τριβή θα ήταν αρκετή για να προκαλέσει την τήξη των προστριβομένων επιφανειών. Στην ελαφρότερη μορφή αυτό έχει ως συνέπεια το λεγόμενο **άρπαγμα των κουζινέτων**, δηλαδή ένα ξεφλούδισμα της επιφάνειας των αντιτριβικών κραμάτων, που καλύπτουν το εσωτερικό των εδράνων. Αν η διακοπή της λίπανσης παραταθεί, η καταστροφή των εδράνων είναι πλήρης, με επακόλουθο την **κράτηση** της μηχανής. Αυτό στην πράξη είναι γνωστό σαν **κόλλημα της μηχανής**.

Από τα παραπάνω φαίνεται η τεράστια σημασία που έχει για μια μηχανή η σωστή λίπανσή της: περιορίζοντας τις απώλειες λόγω τριβής αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης και εξουδετερώνεται ο κίνδυνος υπερθέρμανσης, που θα μπορούσε να προκαλέσει ακόμα και την πλήρη καταστροφή της.

## 13.5 Θεωρία της λίπανσης – Λιπαντική μεμβράνη

Στην πράξη κατά τη λίπανση συναντάμε τις εξής περιπτώσεις:

### 1) Ξηρή τριβή

Εμφανίζεται όταν δύο στερεά ολισθαίνουν μεταξύ τους, χωρίς να παρεμβάλλεται λιπαντικό. Χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές του συντελεστή τριβής  $\mu$ , που κυμαίνονται από 0,5 ως 1,5 ανάλογα με το υλικό και τη φύση των τριβόμενων επιφανειών. Η ξηρή τριβή προκαλεί μεγάλες απώλειες έργου, που μετατρέπονται σε θερμότητα, προκαλώντας σύντηξη ή συγκόλληση των επιφανειών (κόλλημα της μηχανής).

### 2) Υγρή λίπανση

Εμφανίζεται όταν μεταξύ των τριβόμενων επιφανειών παρεμβάλλεται πλήρης **λιπαντική μεμβράνη** με ποικίλο πάχος, που διακρίνεται (βλ. § 13.2):

α) Σε **υδροδυναμική λίπανση**, όταν η λιπαντική

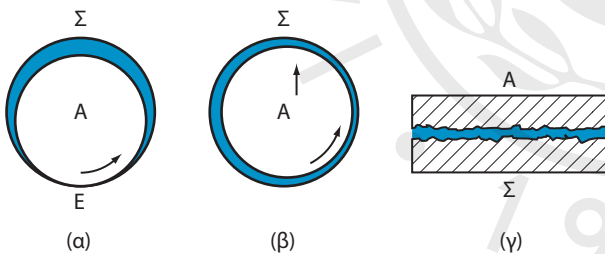
μεμβράνη έχει αρκετό πάχος. Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής τριβής μειώνεται σε 0,001–0,03, πράγμα που συνεπάγεται αντίστοιχη μείωση των απωλειών ισχύος, σύμφωνα με τον τύπο (6) (βλ. § 13.3). Η ύπαρξη υδροδυναμικής λίπανσης, προϋποθέτει εντελώς λείες επιφάνειες, που στην πράξη είναι σχεδόν αδύνατο να επιτευχθούν, αλλά και μεγάλες ελευθερίες (χάρη) μεταξύ εδράνου και άξονα, που, όπως είναι γνωστό, δεν συνιστώνται. Γι' αυτό συνήθως έχουμε:

β) **Οριακή λίπανση**, που χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό πάχος λιπαντικής μεμβράνης, και οφείλεται κυρίως στο ότι οι φαινομενικά λείες επιφάνειες των μετάλλων παρουσιάζουν πάντοτε μικρές ανωμαλίες, όπως φαίνονται σε μεγέθυνση στο σχήμα 13.1(γ). Είναι, λοιπόν, φυσικό, κατά την έναρξη της περιστροφής του άξονα, και όταν το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης είναι πάρα πολύ μικρό, οι ανωμαλίες των επιφανειών να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους σε μερικά σημεία. Στα σημεία αυτά η λιπαντική μεμβράνη διακόπτεται, με συνέπεια να εμφανίζεται τοπικά η ξηρή τριβή.

Αυτό ακριβώς αποτελεί την οριακή λίπανση.

Ο σχηματισμός της λιπαντικής μεμβράνης εξηγείται ως εξής:

Όταν η μηχανή είναι ακίνητη, ο άξονας εδράζεται εντελώς στο στροφέιο και έτσι έχουμε σχεδόν ξηρή τριβή, που διαρκεί ως τη στιγμή της εκκίνησης (στατική τριβή), όπως φαίνεται στο σχήμα 13.1(α).



Σχ. 13.1

Αμέσως μετά την εκκίνηση, λόγω της ανοχής του στροφέιου και των εδράνων, δημιουργείται η υδροδυναμική σφήνα του ορυκτέλαιου κατά τη φορά της περιστροφής, που έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη μιας ανυψωτικής τάσης, ωθώντας τον άξονα προς τα πάνω, [σχ. 13.1(β)]. Το λιπαντικό εισχωρεί στο κενό που σχηματίζεται μεταξύ του εδράνου και του στροφέιου και αποκαθιστά τη λιπαντική μεμβράνη, οπότε έχουμε συνθήκες **υγρής λίπανσης**.

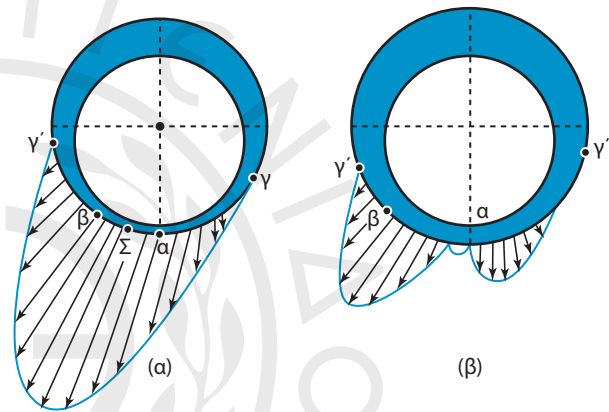
Κατά κανόνα, με υψηλές ταχύτητες περιστροφής και με μικρά φορτία έχουμε υγρή **λίπανση**, ενώ **οριακή λίπανση** αναμένεται, όταν έχουμε μεγάλα φορτία

με μικρές ταχύτητες. Η οριακή λίπανση έχει συντελεστή τριβής 0,05 – 0,15.

### 13.6 Κατανομή των πιέσεων

Την κατανομή των πιέσεων κατά μήκος της επιφάνειας ενός τριβέα δίνει το λεγόμενο **πολικό διάγραμμα των πιέσεων** (σχ. 13.2).

Η μέγιστη τιμή πίεσης,  $P_{\max}$ , αντιστοιχεί στο σημείο Σ, που βρίσκεται μεταξύ του σημείου α, όπου επενεργεί το φορτίο του άξονα και του σημείου β, όπου το στρώμα του λαδιού έχει το μικρότερο πάχος του. Οι πιέσεις ελαττώνονται και από τις δύο πλευρές του σημείου Σ και μηδενίζονται στα σημεία γ και γ', που βρίσκονται σχεδόν στα άκρα της περιφέρειας του τριβέα [σχ. 13.2(α)].



Σχ. 13.2

Πολικό διάγραμμα πιέσεων

Το πολικό διάγραμμα των πιέσεων σε τριβείς που φέρουν αύλακες, έχει τη μορφή που εικονίζεται στο σχήμα 13.2(β). Η πίεση κοντά στο σημείο που υπάρχει αυλάκι σχεδόν μηδενίζεται, ενώ η ολική πίεση γενικά είναι μικρότερη. Αυτό έχει ως συνέπεια να ελαττώνεται η ικανότητα του τριβέα να δέχεται ορισμένο φορτίο.

Επομένως, με τις αύλακες που φέρουν οι τριβείς διανέμεται καλύτερα το λιπαντικό σε όλο το μήκος του τριβέα, δεν θα πρέπει όμως οι αύλακες να βρίσκονται στο τμήμα του τριβέα που δέχεται το φορτίο.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι μεταξύ του κομβίου του άξονα και του τριβέα απαιτείται η ύπαρξη ορισμένων ελευθεριών, που θα επιτρέψουν τον σχηματισμό της σφήνας, η οποία είναι απαραίτητη για τη δημιουργία της πίεσης του στρώματος του λιπαντελαίου.

Η **ελευθερία** (χάρη) στις τριβόμενες επιφάνειες και ειδικότερα στα στροφέια πρέπει να τηρείται σε ορισμένα όρια, για τους ακόλουθους λόγους:

1) **Ελευθερία μικρότερη** από την κανονική παρεμποδίζει την υδροδυναμική λίπανση. Η οριακή λίπανση

ση, που είναι η συνηθισμένη μορφή λίπανσης, όταν η χάρη είναι πολύ περιορισμένη, μπορεί εύκολα να μεταπέσει στην καταστρεπτική ξηρή τριβή.

2) **Ελευθερία μεγαλύτερη** από την κανονική έχει τις εξής συνέπειες:

α) Προκαλεί έντονους κραδασμούς, και

β) πέφτει η πίεση του λαδιού και έτσι εξασθενεί η αντοχή στα φορτία που ασκεί στον τριβέα ο άξονας.

Οι τιμές της ελευθερίας για κάθε τριβέα, καθώς και τα όρια στα οποία πρέπει να κυμαίνεται, καθορίζονται από τους κατασκευαστές και αναγράφονται στα εγχειρίδια των μηχανών. Οι τιμές αυτές πρέπει να τηρούνται από τους μηχανικούς με σχολαστικότητα, διότι έχουν ιδιαίτερη σημασία για την καλή κατάσταση και την ομαλή λειτουργία των μηχανών.

### 13.7 Παράγοντες που επιδρούν στη λίπανση

Οι σπουδαιότεροι παράγοντες που επιδρούν στην λίπανση γενικά είναι:

#### 1) Θερμοκρασία

Ως προς τον παράγοντα αυτόν η λίπανση είναι ιδιαίτερα ευπαθής, γιατί η θερμοκρασία επιδρά άμεσα στις ιδιότητες του λιπαντικού και κυρίως στο ιξώδες, που είναι το σπουδαιότερο χαρακτηριστικό του. Με τη θέρμανση το ιξώδες ελαττώνεται και, πέρα από ένα ορισμένο όριο, η ελάττωσή του καθιστά την ύπαρξη της λιπαντικής μεμβράνης αμφίβολη. Την επίδραση της θερμοκρασίας στο ιξώδες ενός λιπαντικού καθορίζει ο λεγόμενος **δείκτης ιξώδους** (viscosity index), του οποίου η τιμή είναι ανάλογη προς τη σταθερότητα του ιξώδους ως προς τη θερμοκρασία. Υψηλές τιμές δείκτη ιξώδους (πάνω από 100) δείχνουν λιπαντικό που επηρεάζεται το λιγότερο δυνατό από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Τα λιπαντέλαια της κατηγορίας αυτής, γνωστά ως Viscostatic, είναι ακριβότερα. Η σημασία του δείκτη ιξώδους στηρίζεται στο ότι ένα καλό λιπαντικό δεν αρκεί να έχει το κατάλληλο ιξώδες κατά την εκκίνηση της μηχανής, πρέπει και να το διατηρεί όταν η θερμοκρασία ανέρχεται κατά τη λειτουργία της μηχανής.

#### 2) Λιπαρότητα (oilness)

Είναι ιδιότητα του λιπαντικού που σχετίζεται με την τιμή του συντελεστή τριβής. Μεγάλη λιπαρότητα σημαίνει λιπαντέλαια με μικρή τιμή συντελεστή τριβής, που έχει ευνοϊκή επίδραση στη λίπανση. Μεγάλη λιπαρότητα έχουν κυρίως τα φυτικά και ζωικά λάδια, που έχουν όμως το μειονέκτημα να αλλοιώνονται σχετικά γρήγορα από την οξείδωση.

#### 3) Φορτίο του άξονα

Επιδρά άμεσα στις συνθήκες λίπανσης των τριβέων, στους οποίους εδράζεται ο άξονας. Υψηλά φορτία ευνοούν την οριακή λίπανση, η οποία για να αποφευχθεί πρέπει το λιπαντικό να έχει το κατάλληλο ιξώδες, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος έκθλιψης της λιπαντικής μεμβράνης λόγω φορτίου. Εκτός από το κατάλληλο ιξώδες, στην περίπτωση της οριακής λίπανσης, απαιτείται και ενίσχυση του λιπαντικού με λάδια μεγάλης λιπαρότητας (ειδικά πρόσθετα ή ζωικά ή φυτικά) ή με ειδικά πρόσθετα (βλ. § 14.4.5).

#### 4) Ταχύτητα περιστροφής

Σε περιπτώσεις που η πίεση είναι εξαιρετικά υψηλή καμιά λιπαντική μεμβράνη δεν μπορεί να διατηρηθεί και η κατάσταση, γνωστή ως λίπανση υψηλής πίεσης, αντιμετωπίζεται με ειδικά πρόσθετα υψηλής πίεσης. Τα πρόσθετα αυτά, λόγω της αναπτυσσόμενης υψηλής θερμοκρασίας, επιδρούν χημικά στις μεταλλικές επιφάνειες και σχηματίζουν ενώσεις που δρουν ως στερεά λιπαντικά. Αυτά αποτίθενται και προσκολλούνται στις μεταλλικές επιφάνειες, τις οποίες προστατεύουν από παραπέρα προσβολή, και συγχρόνως, τα λιπαντικά εξασφαλίζουν τη λίπανση στο σύστημα. Αντίθετα, σε χαμηλά φορτία και υψηλές ταχύτητες έχουμε συνήθως υδροδυναμική λίπανση.

Στη λίπανση των τριβέων αξόνων, το έργο τριβής (βλ. § 13.3) και η παραγόμενη από την τριβή θερμότητα (βλ. § 13.4) αυξάνονται ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής. Με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται το ιξώδες και έτσι αντισταθμίζεται η αύξηση της τριβής, που προκαλεί η μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Αυτή η ισορροπία όμως ισχύει μόνο στην υδροδυναμική λίπανση, ενώ στην οριακή δεν υπάρχουν μεγάλα περιθώρια ελέγχου των συνθηκών λίπανσης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την ενίσχυση των λιπαντικών με ειδικά πρόσθετα λιπαρότητας.

### 13.8 Η ομαλή λειτουργία της μηχανής και το λιπαντέλαιο

Η ορθή λίπανση της μηχανής επηρεάζει την απόδοση και γενικότερα τη συμπεριφορά της μηχανής στον ίδιο βαθμό που την επηρεάζουν η ποιότητα του καυσίμου και οι άλλοι βασικοί παράγοντες: σχεδίαση – κατασκευή – συντήρηση, όπως απεικονίζεται η παρακάτω συμβολική εξίσωση:

$$\text{Συμπεριφορά μηχανής} = \text{Σχεδίαση} \times \text{Κατασκευή} \times \text{Συντήρηση} \times \text{Καύσιμο} \times \text{Λιπαντικό}$$

Πρέπει να τονισθεί ότι όλοι αυτοί οι παράγοντες, από τους οποίους εξαρτάται η συμπεριφορά της μηχανής, συνδέονται μεταξύ τους με **σχέση γινομένου και όχι αθροίσματος**, πράγμα που σημαίνει ότι αν ένας από τους παράγοντες αυτούς μηδενιστεί, μηδενίζεται τότε και η συμπεριφορά της μηχανής, ανεξάρτητα από το πόσο καλοί είναι οι άλλοι παράγοντες. Αν, για παράδειγμα, η λίπανση είναι τόσο κακή, ώστε να βαθμολογηθεί με μηδέν, μηδέν θα είναι και η συμπεριφορά της μηχανής, δηλαδή η μηχανή δεν θα μπορεί να ξεκινάει ή αν βρίσκεται σε λειτουργία, η καταστροφή της θα είναι πλήρης.

Εκτός όμως από την επίδραση του λιπαντικού στη συμπεριφορά της μηχανής, ιδιαίτερη σημασία έχει και η αντίθετη περίπτωση, δηλαδή η επίδραση της μηχανής στην ποιότητα του λιπαντικού. Μια γρήγορη αλλοίωση του λιπαντικού, όταν μάλιστα επαναλαμβάνεται συχνά, οφείλεται πολλές φορές σε ανωμαλία της μηχανής που συνήθως προέρχεται από κακή συντήρηση. Σε μια μηχανή diesel, η κακή ή μέτρια έγχυση του καυσίμου ή η ατελής ψύξη, θα προκαλέσουν αραίωση του λιπαντικού με καύσιμο και γρήγορη αλλοίωσή του. Η μηχανή αυτή θα παρουσιάζει συμπτώματα κακής λειτουργίας, που περιλαμβάνουν δημιουργία καπνού, διαφυγή καυσαερίων, απώλεια ισχύος, υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλές πιέσεις.

Ενδείξεις κακής λειτουργίας της μηχανής που προέρχεται από το καύσιμο ή το λιπαντικό, έχουμε:

1) **Για την καύση:** από τις πιέσεις συμπίεσης και από τη σύσταση καυσαερίων

2) **Για τη λίπανση:** από την πίεση στο δίκτυο λίπανσης ή από την κατανάλωση λιπαντικού. Η αυξημένη κατανάλωση μπορεί να οφείλεται σε φθορά χιτωνίων ή ελατηρίων, που συχνά προέρχονται από υπερβολική ψύξη ή από συχνή εκκίνηση **εν ψυχρώ**. Στις μηχανές με μεγάλες ιπποδυνάμεις αυτό αντιμετωπίζεται με την κατάλληλη προθέρμανση ή προλίπανση της μηχανής. Για τον σκοπό αυτό οι σύγχρονες προωστήριες εγκαταστάσεις των πλοίων διαθέτουν ιδιαίτερες διατάξεις. Οι υπεύθυνοι χειριστές πρέπει να θεωρούν τη χρησιμοποίησή τους ως πρωταρχικής σημασίας.

Πρέπει να τονισθεί επίσης ότι παρόλο που, τόσο οι μηχανές όσο και τα λιπαντέλαια, έχουν φθάσει σήμερα σε υψηλό βαθμό εξέλιξης, ώστε να παρέχουν εμπιστοσύνη, οι ανωμαλίες εξακολουθούν να υφίστανται. Οι ανωμαλίες αυτές μπορούν να οφείλονται σε ένα ή περισσότερους από τους παρακάτω λόγους:

- |                             |               |
|-----------------------------|---------------|
| 1) αρχική κατασκευή,        | 5) χειριστής, |
| 2) συνθήκες λειτουργίας,    | 6) συντήρηση, |
| 3) επιθεώρηση και επισκευή, | 7) λίπανση.   |
| 4) καύσιμο,                 |               |

Η πρώτη αιτία (κατασκευή) αντιμετωπίζεται με συνεχή έρευνα των κατασκευαστών των ναυτικών μηχανών, ώστε να βελτιώνεται ο σχεδιασμός και να εισάγονται κατάλληλοι αυτοματισμοί. Ανάγκες μετατροπών, που ανακύπτουν κατά τη διάρκεια της ζωής των μηχανών, πρέπει να πραγματοποιούνται το ταχύτερο δυνατό.

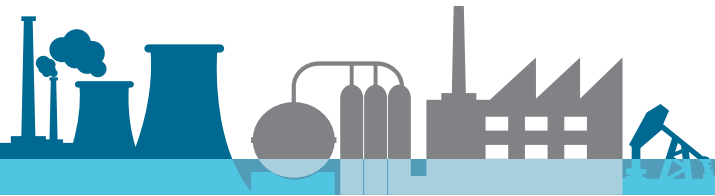
Η σχολαστική τήρηση των οδηγιών του κατασκευαστή σε ό,τι αφορά στην τήρηση των ενδείξεων λειτουργίας στα καθορισμένα όρια, στην προληπτική συντήρηση, στις ορθές ρυθμίσεις των ελευθεριών, στην ποιότητα των καυσίμων και των λιπαντικών, αποτελούν βασικούς παράγοντες για τον περιορισμό των ανωμαλιών.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για την αλληλεξάρτηση καυσίμου-λιπαντικού βρίσκεται στις πρόσφατα επικαιροποιημένες οδηγίες κατασκευαστών μηχανών για λίπανση μηχανών που χρησιμοποιούν υπολειμματικά καύσιμα HFO με περιεκτικότητα σε θείο έως 0,5% σε ελεύθερες περιορισμών περιοχές και ULSFO με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (<0,1%) στις ελεγχόμενες περιοχές, όπως ορίζουν οι τελευταίοι κανονισμοί από την MARPOL (βλ. § 8.5.5). Για τα υπολειμματικά καύσιμα HFO απαιτείται λιπαντικό με υψηλή αλκαλικότητα, TBN  $\geq 70$  (βλ. § 15.8) για την προστασία διάβρωσης από το θειικό οξύ στα καυσαέρια. Το λιπαντικό αυτό, όταν χρησιμοποιείται για ULSFO καύσιμο (που δεν περιέχει σημαντική ποσότητα θείου), προκαλεί αποθέσεις των αλκαλικών πρόσθετων στις επιφάνειες των εμβόλων της μηχανής με κίνδυνο την ακινητοποίησή τους. Οι κατασκευαστές των μηχανών σε αυτήν την περίπτωση (αλλαγή καυσίμου σε ULSFO) συνιστούν τη χρήση λιπαντικού με χαμηλή αλκαλικότητα (TBN μεταξύ 15 και 40) καθώς και την προσαρμογή του ρυθμού τροφοδοσίας του λιπαντικού (lube oil dosage / feed rate) σε κατάλληλα επίπεδα. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται φθορές στα liners ενώ διατηρείται η διαβρωτική προστασία του λιπαντικού. Στις οδηγίες αυτές γίνεται αντιληπτό ότι ο σωστός σχεδιασμός της λίπανσης (ιδιότητες λιπαντικού και ρύθμιση τροφοδοσίας του) λαμβάνει υπόψη του ιδιότητες καυσίμου και λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής για την αποφυγή ανωμαλιών στη λειτουργία της μηχανής.

#### **Συμπερασματικά μπορεί να τονισθεί ότι:**

Το λιπαντικό, όχι μόνο αποτελεί σπουδαίο παράγοντα για την ομαλή λειτουργία της μηχανής, αλλά είναι και δείκτης της κατάστασής της.





### 14.1 Τα γενικά χαρακτηριστικά ενός λιπαντικού

Οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί ένα υλικό (ουσία) που προορίζεται για λιπαντικό είναι:

1) **Να έχει κατάλληλο ιξώδες**, αλλά και να το διατηρεί κατά το δυνατό ανεπηρέαστο στις μεταβολές της θερμοκρασίας, που το λιπαντικό θα συναντήσει στις διάφορες φάσεις λειτουργίας της μηχανής. Δεν αρκεί να έχουμε στη μηχανή μας λιπαντικό με κατάλληλο ιξώδες κατά την εκκίνηση. Όταν η μηχανή ζεσταθεί, ύστερα από ορισμένο χρόνο λειτουργίας, πρέπει το ιξώδες του λιπαντικού να παραμένει αρκετά υψηλό, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος έκθλιψης της λιπαντικής μεμβράνης. Όταν το ιξώδες είναι μεγαλύτερο από το κανονικό δυσχεραίνει την εκκίνηση της μηχανής και προκαλεί απώλεια ισχύος και μείωση του βαθμού απόδοσης. Αντίθετα, χαμηλό ιξώδες δεν εξασφαλίζει πάντοτε τη λιπαντική μεμβράνη που απαιτείται ανάμεσα στις τριβόμενες επιφάνειες. Την απαίτηση για τη μέγιστη δυνατή σταθερότητα του ιξώδους στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας εξασφαλίζει η άλλη ιδιότητα του λιπαντικού, που εκφράζεται με τον **δείκτη ιξώδους** (V.I.) (βλ. § 13.7 και 15.5).

2) **Να μην έχει διαβρωτική επίδραση** στις μεταλλικές επιφάνειες τις οποίες λιπαίνει. Σκοπός των λιπαντικών είναι και η προστασία των μεταλλικών επιφανειών από τη διάβρωση. Κατά κανόνα τα ορυκτέλαια ικανοποιούν τέλεια αυτή τη βασική απαίτηση.

3) **Να έχει ικανοποιητική πρόσφυση** στις μεταλλικές επιφάνειες τις οποίες λιπαίνει, ώστε η προστασία τους από τη διάβρωση να συνεχίζεται και όταν η μηχανή δεν λειτουργεί. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί οι εκτεθειμένες θερμές μεταλλικές επιφάνειες ενέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο διάβρωσης από το οξυγόνο του αέρα.

4) **Να έχει χημική σταθερότητα**, ώστε να μην αλλοιώνεται από τους παράγοντες που συναντά κατά τη λειτουργία της μηχανής και οι οποίοι είναι: ο ατμοσφαιρικός αέρας, το νερό, τα μέταλλα, τα καυσαέρια

και οι συχνές εναλλαγές της θερμοκρασίας. Η αλλοίωση του λιπαντικού από τους παράγοντες αυτούς εκδηλώνεται με τους εξής κυρίως τρόπους:

- α) Εμφάνιση λάσπης και ασφαλτικών καταλοίπων.
- β) Δημιουργία προϊόντων αλλοίωσης με διαβρωτική δράση στα μέταλλα (όξινα συστατικά).
- γ) Αύξηση του ιξώδους. Η αύξηση όμως αυτή πιθανόν να μην εκδηλώνεται, γιατί μπορεί το λιπαντικό να μολύνεται με καύσιμο, το οποίο συνήθως έχει μικρότερο ιξώδες από το λιπαντικό. Στις περιπτώσεις που το καύσιμο που μολύνει το λιπαντικό έχει μεγαλύτερο ιξώδες, τότε το αυξημένο ιξώδες θα οφείλεται κυρίως στη μόλυνση του λιπαντικού με το καύσιμο.

Τις παραπάνω απαιτήσεις του υλικού που δρα ως λιπαντικό εξασφαλίζουμε με τους εξής τρόπους:

- α) Την καλή συντήρηση της μηχανής.
- β) Την επιλογή του κατάλληλου λιπαντικού, του οποίου η καταλληλότητα επηρεάζεται από την επιλογή των πρώτων υλών του.
- γ) Την κατάλληλη επεξεργασία και
- δ) την ανάμειξη με κατάλληλα χημικά πρόσθετα (additives).

### 14.2 Κατάταξη των λιπαντικών

Τα λιπαντικά κατατάσσονται κατά διάφορους τρόπους, από τους οποίους οι σπουδαιότεροι είναι:

#### 1) Ως προς τη φυσική κατάσταση:

α) **Υγρά λιπαντικά:** ορυκτέλαια, φυτικά λάδια, ζωικά λάδια. Τα ζωικά και φυτικά λίπη μπορούν να καταταγούν στην κατηγορία αυτή, γιατί τη στιγμή της λίπανσης μετατρέπονται σε υγρή κατάσταση.

β) **Στερεά λιπαντικά:** ταλκ, γραφίτης.

γ) **Ημίρρευστα ή συνεκτικά λάδια:** γράσα.

#### 2) Ως προς την προέλευση:

α) **Ορυκτέλαια**, που προέρχονται από την επεξεργασία του φυσικού πετρελαίου και καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό των λιπαντικών ουσιών. Υπερέχουν κυρίως κατά τη χημική σταθερότητα, που οφείλεται στη μοριακή τους δομή, δηλαδή στους υδρογονάν-

θρακες, που είναι τα κύρια συστατικά τους και από τη φύση τους έχουν πολύ μεγάλη χημική σταθερότητα.

β) **Φυτικά λάδια.**

γ) **Ζωικά λάδια.**

Και οι δύο αυτές κατηγορίες λιπαντικών ουσιών έχουν περιορισμένη εφαρμογή γιατί χαρακτηρίζονται από έλλειψη χημικής σταθερότητας. Προστίθενται όμως σε μικρές αναλογίες στα ορυκτέλαια, όταν επιδιώκεται καλύτερη πρόσφυση. Αυτό συμβαίνει με τα λιπαντικά ορισμένων παλινδρομικών μηχανών, όπου η πρόσφυση αποτελεί πρόβλημα και στη λύση του συμβάλλουν με την παρουσία τους τα ζωικά και φυτικά λάδια.

δ) **Συνθετικά λάδια**, που παράγονται συνθετικά. Υπερέχουν ποιοτικά από όλες τις άλλες κατηγορίες, όταν υπάρχει η δυνατότητα κατά την παραγωγή τους να εξασφαλισθούν οι επιθυμητές ιδιότητες. Η χρήση τους ολοένα επεκτείνεται παρά το υψηλό κόστος τους.

3) **Ως προς τον προορισμό** διακρίνουμε:

α) Λιπαντέλαια ΜΕΚ.

β) Λιπαντέλαια ατμοστροβίλων (τουρμπινέλαια).

γ) Λιπαντέλαια ατμομηχανών.

δ) Λιπαντέλαια διαφόρων χρήσεων, όπως: υδραυλικά λάδια, μονωτικά, λάδια για ψυκτικές μηχανές και λάδια αεροσυμπιεστών

4) **Ως προς το ιξώδες:**

Τόσο μεγάλη είναι η σημασία του ιξώδους ενός λιπαντικού (βλ. §14.1 και 13.7), ώστε να αποτελεί βασικό γνώρισμα κατάταξης σε κατηγορίες, ανάλογα με την τιμή του.

α) **Κλίμακα SAE.** Συνηθέστερα χρησιμοποιείται μια αυθαίρετη κλίμακα, γνωστή ως κλίμακα SAE. Την κλίμακα αυτή υπέδειξε η Αμερικανική εταιρεία μηχανικών αυτοκινήτου (Society of Automobile Engineers – SAE) και μετά τις ΗΠΑ την υιοθέτησαν όλες σχεδόν οι χώρες του κόσμου. Η κλίμακα SAE, αρχίζει από το 5, που αντιστοιχεί σε ένα πολύ λεπτόρρευστο λάδι, κατάλληλο ίσως για λεπτούς ωρολογιακούς μηχανισμούς και καταλήγει στο 250, που είναι ένα βαρύ παχύρρευστο λιπαντικό κατάλληλο για λίπανση οδοντωτών τροχών (γρανάζια). Η κλίμακα SAE περιέχει μόνο ακέραια πολλαπλάσια του 10, εκτός από την τιμή SAE 5.

Πρέπει να τονισθεί ότι ο αριθμός SAE λιπαντικών δεν έχει καμιά σχέση με την ποιότητά τους, αλλά φανερώνει μόνο την τιμή του ιξώδους τους (για τα μονότυπα), και υποδηλώνει έμμεσα το δείκτη ιξώδους (για τα πολύτυπα), όταν δίπλα στον αριθμό SAE υπάρχει η

ένδειξη W, που προέρχεται από την αγγλική λέξη winter (χειμώνας).

Τα ορυκτέλαια χωρίζονται στα **απλά** ή **μονότυπα λιπαντικά** (monograde) και στα **πολλαπλού ιξώδους** ή **πολύτυπα λιπαντικά** (multigrade). Τα πολύτυπα λιπαντικά πρέπει να ικανοποιήσουν δύο προδιαγραφές ιξώδους και η κατηγοριοποίησή τους κατά SAE περιλαμβάνει δύο αριθμούς.



### Παράδειγμα

Μονότυπο ορυκτέλαιο με SAE 30 (τριαντάρι), που ίσως είναι κατάλληλο για τη λίπανση μιας βενζινομηχανής στους θερινούς μήνες, στις χαμηλές θερμοκρασίες της χειμερινής περιόδου θα αποκτή ιξώδες τόσο υψηλό, που μπορεί να δυσχεραίνει την εκκίνηση της μηχανής. Αντίθετα η ένδειξη SAE 10W-30 φανερώνει πολύτυπο λιπαντικό που στις χαμηλές θερμοκρασίες του χειμώνα διατηρεί το ιξώδες του στην κατάλληλη τιμή (ως SAE 10), ενώ στις συνθήκες λειτουργίας μηχανής (τυπικά 100°C) συμπεριφέρεται σαν κανονικό τριαντάρι (SAE 30).

Τα πολύτυπα λιπαντικά καλύπτουν τιμές ιξώδους από SAE 5W μέχρι SAE 75W και για τα οποία γίνεται λόγος στην παράγραφο 14.4.5. Η λειτουργία των πολύτυπων λιπαντικών επιτυγχάνεται με:

α) Την επιλογή κατάλληλων πρώτων υλών.

β) Ειδική επεξεργασία εξευγενισμού.

γ) Ανάμειξη με ειδικά χημικά πρόσθετα, που διατηρούν την τιμή του ιξώδους σχετικά σταθερή σε σχέση με τη θερμοκρασία. Αυτά είναι γνωστά ως **βελτιωτικά Δείκτη Ιξώδους** (V.I. improvers) και διευρύνουν σημαντικά το φάσμα τιμής ιξώδους, που ένα λιπαντικό μπορεί να καλύπτει.

Η αντιστοιχία των αριθμών της κλίμακας SAE προς τις τιμές ιξώδους φαίνεται στον πίνακα 14.1. Όπως φαίνεται στον πίνακα αυτό, λιπαντικά με SAE 10W μέχρι SAE 20 είναι γενικά λεπτόρρευστα, κατάλληλα για χαμηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιούνται ακόμα για τον καθαρισμό των δικτύων λίπανσης, όταν αντικαθιστούμε το λιπαντικό. Η περιοχή SAE 30 μέχρι SAE 50 αντιστοιχεί σε λιπαντέλαια με μέσο και υψηλό ιξώδες κατάλληλα για τις ΜΕΚ. Ενώ η περιοχή SAE 70W μέχρι SAE 250 αντιστοιχεί σε λάδια που προορίζονται για τη λίπανση κιβωτίων ταχυτήτων και του διαφορικού (βαλβολίνες).

**Πίνακας 14.1**  
**Σχέσεις αριθμών κλίμακας SAE και τιμής ιξώδους**

| Αριθμός SAE | Τιμή ιξώδους            |                 |                             |
|-------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------|
|             | cSt (θερμοκρασία σε °C) | cSt στους 100°C | Χρήσεις                     |
| 0W          | < 6.200 (-35)           | > 3,8           | Λιπαντέλαιο MEK             |
| 5W          | < 6.600 (-30)           | > 3,8           | "                           |
| 10W         | < 7.000 (-25)           | > 3,8           | "                           |
| 15W         | < 7.000 (-20)           | > 4,1           | "                           |
| 20W         | < 9.500 (-15)           | > 5,6           | "                           |
| 25W         | < 13.000 (-10)          | > 5,6           | "                           |
| 20          |                         | 5,6 – 9,3       | "                           |
| 30          |                         | 9,3 – 12,5      | "                           |
| 40          |                         | 12,5 – 16,3     | "                           |
| 50          |                         | 16,3 – 21,9     | "                           |
| 60          |                         | 21,9 – 26,4     | "                           |
| 70W         |                         | > 4,1           | Λιπαντικό οδο-ντωτών τροχών |
| 80W         |                         | > 7,0           | "                           |
| 85W         |                         | > 11            | "                           |
| 90          |                         | 13,5 – 24,0     | "                           |
| 140         |                         | 24,0 – 41,0     | "                           |
| 250         |                         | > 41            | "                           |

β) **Κλίμακα ISO.** Από το έτος 1975 ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποιήσεως (ISO) καθιέρωσε ένα νέο σύστημα κατάταξης των ορυκτελαίων, που έχει γίνει δεκτό από τις περισσότερες χώρες του κόσμου.

Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, που καλύπτεται από το πρότυπο ISO 3448:2010, η ρευστότητα (ιξώδες) εκφράζεται σε μονάδες centistokes (cSt) σε θερμοκρασία 40°C, που είναι αντιπροσωπευτική των θερμοκρασιών λειτουργίας των λιπαντικών στις περισσότερες εφαρμογές.

Η ταξινόμηση ISO καθορίζει 18 κλάσεις ρευστότητας από 2 μέχρι 1.500 cSt σε 40°C, που καλύπτουν όλα τα προϊόντα: από το πετρέλαιο ως τα βαριά κυλινδρέλαια. Η κάθε κλάση χαρακτηρίζεται και αριθμείται από το ιξώδες στο μέσο των ορίων της με επέκταση  $\pm 10\%$  από την τιμή αυτή.



### Παράδειγμα

Η κλάση ISO10 καλύπτει προϊόντα με ιξώδες στους 40°C από 9 cSt (10-10%) μέχρι 11 cSt (10+10%), και αντιπροσωπεύεται από τη μέση τιμή 10 cSt.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η ταξινόμηση ISO έναντι της ταξινόμησης SAE είναι:

- 1) Περιλαμβάνει τον ελάχιστο αναγκαίο αριθμών κλάσεων (18) που καλύπτουν τις απαιτήσεις λίπανσης όλων των κατηγοριών μηχανών και μηχανημάτων και
- 2) με τη διεθνή αναγνώριση του συστήματος ISO από τους κατασκευαστές των μηχανών και μηχανημάτων διευκολύνονται σημαντικά τόσο οι μηχανικοί όσο και οι προμηθευτές λιπαντικών στον καθορισμό του κατάλληλου για κάθε περίπτωση λιπαντικού.

Στον πίνακα 14.2 παρέχεται η αντιστοιχία των κλάσεων ISO με τις τιμές ιξώδους στους 40°C.

**Πίνακας 14.2**  
**Ταξινόμηση λιπαντικών κατά ISO**

| Κλάση   | Ιξώδες cSt σε 40°C (μέση τιμή) | Όρια τιμής ιξώδους (cSt σε 40°C) |         |
|---------|--------------------------------|----------------------------------|---------|
|         |                                | Ελάχιστα                         | Μέγιστα |
| ISO2    | 2,2                            | 1,98                             | 2,42    |
| ISO3    | 3,2                            | 2,88                             | 3,52    |
| ISO5    | 4,6                            | 4,4                              | 5,06    |
| ISO7    | 6,8                            | 6,12                             | 7,48    |
| ISO10   | 10                             | 9                                | 11      |
| ISO15   | 15                             | 13,5                             | 16,5    |
| ISO22   | 22                             | 19,8                             | 24,2    |
| ISO32   | 32                             | 28,8                             | 35,2    |
| ISO46   | 46                             | 41,4                             | 50,6    |
| ISO68   | 68                             | 61,2                             | 74,8    |
| ISO100  | 100                            | 90                               | 110     |
| ISO150  | 150                            | 135                              | 165     |
| ISO220  | 220                            | 198                              | 242     |
| ISO320  | 320                            | 288                              | 352     |
| ISO460  | 460                            | 414                              | 506     |
| ISO680  | 680                            | 612                              | 748     |
| ISO1000 | 1000                           | 900                              | 1100    |
| ISO1500 | 1.500                          | 1.350                            | 1.650   |

### 14.3 Ορυκτέλαια

Είναι η σπουδαιότερη κατηγορία λιπαντικών, που καλύπτει σήμερα περίπου το 90% των εφαρμογών λίπανσης. Αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, σε σύγκριση με άλλες κατηγορίες λιπαντικών. Τα σπουδαιότερα από τα **πλεονεκτήματά** τους είναι:

- 1) Η εξαιρετική χημική σταθερότητα.
- 2) Η αρκετά καλή πρόσφυση στις μεταλλικές επιφάνειες.
- 3) Η κάλυψη μεγάλης περιοχής ιξώδους και
- 4) το σχετικά μικρό κόστος παραγωγής.

Τα ορυκτέλαια προέρχονται από το υπόλειμμα απόσταξης του φυσικού πετρελαίου, που απομένει στον πύργο απόσταξης μετά την απομάκρυνση των συστατικών που έχουν αποστάξει ως τους 360°C. Το υπόλειμμα της απόσταξης είτε χρησιμοποιείται ως καύσιμο (μαζούτ), είτε υποβάλλεται σε παραιτέρω επεξεργασία από την οποία παράγονται τα ορυκτέλαια.

### 14.4 Παραγωγή και επεξεργασία ορυκτελαίων

Οι κυριότερες φάσεις για την παραγωγή και επεξεργασία των ορυκτελαίων είναι οι παρακάτω:

#### 14.4.1 Απόσταξη σε κενό

Το μαζούτ προωθείται για απόσταξη σε ειδικές εγκαταστάσεις που λειτουργούν σε κενό (στην πραγματικότητα σε χαμηλή πίεση), ώστε η θερμοκρασία απόσταξης να μην υπερβαίνει τους 360°C και να μην υπάρχει έτσι κίνδυνος καταστροφής των υδρογονανθράκων από πυρόλυση. Το προϊόν της απόσταξης αυτής λέγεται **vacuum gas oil**, ενώ το υπόλειμμα της απόσταξης κατεργάζεται στη συνέχεια για την παραγωγή ασφάλτου. Το vacuum oil περιέχει τους υδρογονάνθρακες που είναι τα κύρια συστατικά των ορυκτελαίων. Με παραπέρα κλασματική απόσταξη τα ορυκτέλαια χωρίζονται σε ομάδες, ανάλογα με τη θερμοκρασία απόσταξης, που συμβαδίζει με το μοριακό βάρος, το ιξώδες και το ειδικό βάρος των παραγομένων προϊόντων.

Διακρίνονται τέσσερις ομάδες προϊόντων (κλασμάτων):

- 1) Τα **πολύ ελαφρά προϊόντα**, που είναι τα πρώτα αποστάγματα και μόνο ως καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν
- 2) **Λεπτόρρευστα λιπαντικά**, με ιξώδες αντίστοιχο των SAE 5W και SAE 10W, γνωστά ως ατρακτέλαια (spindle oils).

3) **Κανονικά ορυκτέλαια** με μέση τιμή ιξώδους (SAE 20 έως SAE50), που είναι η σπουδαιότερη κατηγορία αποσταγμάτων και αποτελούν τη βάση παραγωγής των περισσότερων λιπαντικών MEK και ατμοστροβίλων και

4) **βαριά αποστάγματα** ή **υπολείμματα απόσταξης με υψηλό ιξώδες**, από τα οποία παράγονται κυλινδρέλαια για τις ατμομηχανές και λιπαντικά για οδοστρώτους τροχούς και γρανάζια (βαλβόλινες).

Διευκρινίζεται ότι τα υπολείμματα απόσταξης, που προέρχονται από φυσικό πετρέλαιο με παραφινική βάση και που δεν περιέχουν άσφαλο, χρησιμοποιούνται αυτούσια ως **μελανά κυλινδρέλαια** και οφείλουν το όνομά τους στην παρουσία ασφαλτενίων με έντονο μελανό χρώμα. Ύστερα από διήθηση με αποχρωστικές ουσίες παράγονται τα **διηθημένα κυλινδρέλαια**, που έχουν ανοικτό χρώμα, είναι όμως αδιαφανή λόγω της παραφίνης που περιέχουν. Τα **διαφανή κυλινδρέλαια** παράγονται ύστερα από αποπαραφίνωση των διηθημένων κυλινδρελαίων (βλ. § 14.4.2).

Τα υπολείμματα απόσταξης που προέρχονται από φυσικό πετρέλαιο με ασφαλτούχα βάση υποβάλλονται σε **απασφάλτωση**, δηλαδή απομάκρυνση των ασφαλτικών συστατικών που περιέχουν. Η απασφάλτωση γίνεται συνήθως με εκχύλιση μέσω υγρού προπανίου.

#### 14.4.2 Αποκήρωση

Η **αποκήρωση** ή **αποπαραφίνωση** (dewaxing) είναι η επεξεργασία με την οποία απομακρύνονται από τα ορυκτέλαια τα παραφινούχα συστατικά με μεγάλο μοριακό βάρος, τα οποία είναι στερεά στις συνηθισμένες συνθήκες περιβάλλοντος. Τα συστατικά αυτά αποτελούν την παραφίνη και η παρουσία τους στα ορυκτέλαια είναι ανεπιθύμητη, γιατί ανεβάζει το σημείο θόλωσης και το σημείο ροής, δηλαδή γίνονται παχύρρευστα ή στερεοποιούνται σε σχετικά ψηλές θερμοκρασίες.

Για την αποκήρωση το λιπαντικό υποβάλλεται σε επεξεργασία με μείγμα ακετόνης-βενζολίου, που έχει την ιδιότητα να διαλύει τελείως το λιπαντικό, ενώ οι παραφίνες έχουν μέτρια διαλυτότητα, που γίνεται ακόμα μικρότερη σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε θερμοκρασία -10°C ως -15°C η διαλυτότητα σχεδόν μηδενίζεται και όλα τα παραφινικά συστατικά, αφού κρυσταλλωθούν, αποβάλλονται εντελώς από την υγρή μάζα, από την οποία και αποχωρίζονται με περιστρεφόμενα φίλτρα. Ο διαλύτης ανακτάται με απόσταξη, αφού εξατμίζεται

σε θερμοκρασία πολύ χαμηλότερη από το σημείο ζέσης που έχει το λιπαντικό (γύρω στους 70°C), ενώ το λιπαντικό που απομένει έχει απαλλαγεί σχεδόν πλήρως από την παραφίνη, που συλλέγεται από τα φίλτρα και αποτελεί αξιόλογο υποπροϊόν της βιομηχανίας των ορυκτελαίων. Αυτό χρησιμεύει ως πρώτη ύλη για σειρά στιλβωτικών προϊόντων, όπως παρκετίνες και στιλβωτικά δερμάτων, καθώς και για την κατασκευή κεριών.

#### 14.4.3 Κατεργασία με διαλύτες

Ανάλογα με την πετρελαιοπηγή από την οποία προέρχεται, το φυσικό πετρέλαιο περιέχει διάφορα είδη υδρογονανθράκων (παραφινικοί, αρωματικοί, ναφθениκοί) (βλ. § 3.5.2) ορισμένοι από τους οποίους δεν είναι κατάλληλοι ως συστατικά των λιπαντελαίων και πρέπει να απομακρύνονται. Η απομάκρυνση των ανεπιθύμητων αυτών συστατικών, που είναι κυρίως οι **ασφαλτικοί** και οι **αρωματικοί** υδρογονάνθρακες, γίνεται με **εκχύλιση** με διαλύτες που εκλεκτικά τους διαλύουν, αφήνοντας τα εκλεκτής ποιότητας **ναφθενικά** και **παραφινικά** συστατικά ανέπαφα. Το εξεγευρισμένο προϊόν, που έχει ως βάση ναφθενικούς και παραφινικούς υδρογονάνθρακες, διακρίνεται για την αντοχή του σε οξειδωση και την υψηλή τιμή του δείκτη ιξώδους. Αποτελεί τη βάση για την παραγωγή των υψηλής ποιότητας λιπαντικών, που διατίθενται στο εμπόριο ως λιπαντικά για βαριές απαιτήσεις (heavy duty lubricants), αφού ενισχυθεί με κατάλληλα πρόσθετα (βλ. § 14.4.5).

Για την εκχύλιση χρησιμοποιούνται συνήθως η **φουρφουράλη**, ένας οργανικός διαλύτης που παράγεται από πίτυρα. Ο διαλύτης εισάγεται στον πύργο εκχύλισης ή σε περιστρεφόμενες εκχυλιστικές συσκευές από το επάνω μέρος τους, ενώ στο κάτω μέρος καταθλίβεται το λιπαντικό που προορίζεται για εξεγευρισμό.

Έτσι ο διαλύτης, που είναι βαρύτερος από το λιπαντικό, οδεύει σε αντίστροφη προς το λιπαντικό ροή, δηλαδή από πάνω προς τα κάτω. Ο διαλύτης έρχεται σε πλήρη επαφή με το λιπαντικό που ανεβαίνει από κάτω προς τα πάνω, αφαιρώντας απ' αυτό με εκχύλιση όλα τα ανεπιθύμητα συστατικά. Μέσα στον πύργο εκχύλισης βρίσκονται μεταλλικά ελάσματα τοποθετημένα παράλληλα, ώστε να εξαναγκάζουν το λιπαντικό να έλθει σε κοντινότερη επαφή με το διαλύτη. Ο διαλύτης με τα κατάλοιπα που έχει εκχυλίσει οδηγείται από το κάτω μέρος του πύργου σε μονάδα ανάκτησης διαλύτη με απόσταξη. Το εξεγευρισμένο λιπαντικό παραλαμβάνεται από την κορυφή του πύργου και διαχωρίζεται, επίσης με απόσταξη, από τη μικρή ποσότητα διαλύτη που περιέχει.

#### 14.4.4 Αποχρωματισμός

Συχνά τα ορυκτέλαια μετά τις παραπάνω κατεργασίες έχουν βαθύ καστανόμαυρο χρώμα που οφείλεται σε διάφορες χρωστικές ουσίες, τις οποίες περιέχουν. Μαζί μ' αυτές συνυπάρχουν και άλλα ανεπιθύμητα συστατικά, δηλαδή ανθρακούχα κατάλοιπα, ίχνη οξέων, θειούχες ενώσεις και ρητίνες. Το λιπαντικό από τα συστατικά αυτά απαλλάσσεται με κατεργασία με **διηθητική γη**. Η διηθητική γη είναι ένα είδος χώματος, που αποτελείται από πυριτικά άλατα αργιλίου και μαγνησίου, τα οποία ενεργοποιούνται με πύρωση στους 450°C. Έχουν την ικανότητα να συγκρατούν με εκλεκτική προσρόφηση τις χρωστικές ύλες και τα άλλα ανεπιθύμητα συστατικά, που περιέχει το λιπαντικό. Το λιπαντικό αναμειγνύεται με τη διηθητική γη και, μετά την προσρόφηση, απαλλάσσεται απ' αυτή με διήθηση σε φιλτροπρέσες. Για τον αποχρωματισμό εφαρμόζονται σήμερα και άλλες διαδικασίες, όπως είναι η κατεργασία με υδρογόνο.

#### 14.4.5 Χημικά πρόσθετα (additives)

Στην τελική φάση παραγωγής των ορυκτελαίων γίνεται η ανάμειξή τους με ορισμένες ουσίες, που λέγονται **πρόσθετα** ή **βελτιωτικά** (additives). Σκοπός τους είναι να προσδώσουν στο παραγόμενο λιπαντικό ιδιότητες που δεν είχε ή να βελτιώσουν τις αρχικές του ιδιότητες. Η πετρελαιοβιομηχανία διαθέτει σήμερα πολλά τέτοια χημικά πρόσθετα, που μπορεί να ανταποκριθούν σε όλες τις απαιτήσεις λίπανσης των σύγχρονων μηχανών, που γίνονται όλο και μεγαλύτερες. Δεν είναι υπερβολή να λεχθεί ότι για κάθε ειδική απαίτηση υπάρχει το κατάλληλο χημικό πρόσθετο. Βέβαια, τα χημικά πρόσθετα επιβαρύνουν σημαντικά το κόστος των παραγόμενων λιπαντικών, όμως η επιβάρυνση αυτή αντισταθμίζεται από την παράταση ζωής των λιπαντικών και από την καλύτερη απόδοσή τους. Έτσι η φθορά της μηχανής είναι μικρότερη και συνεπώς μικρότερο είναι και το κόστος της συντήρησης.

Σε άλλες περιπτώσεις τα χημικά πρόσθετα μειώνουν ακόμα και το κόστος διύλισης. Για παράδειγμα, το επιθυμητό σημείο ροής ορυκτελαίου, αντί να το επιτύχουμε με έντονη αποκρήρωση, μπορούμε με λιγότερα έξοδα να το εξασφαλίσουμε προσθέτοντας σε μικρή αναλογία τα κατάλληλα χημικά πρόσθετα, που είναι οι ταπεινωτές σημείου ροής.

Τα σπουδαιότερα είδη χημικών προσθέτων είναι:

1) Τα **βελτιωτικά δείκτη ιξώδους** (V.I. improvers), που, αν προστεθούν σε αναλογία 2–10%, περιορίζουν

τη μεταβολή του ιξώδους με τη θερμοκρασία. Λιπαντέλαιο με υψηλή τιμή δείκτη ιξώδους (V.I.) είναι γνωστό ως multigrade (πολύτυπα).

2) Οι **ταπεινωτές σημείου ροής** (pour point depressants), που κατεβάζουν το σημείο ροής, δηλαδή την κατώτερη θερμοκρασία στην οποία το λιπαντικό μπορεί να ρέει. Συνεπώς, τα πρόσθετα αυτά έχουν αποφασιστική σημασία για την άνετη κυκλοφορία του λιπαντικού στο δίκτυο λίπανσης της μηχανής. Η αναλογία με την οποία τα προσθέτουμε στο λάδι είναι από 0,1–1%.

3) Τα **αντιρρυπαντικά πρόσθετα** (detergents), που προστίθενται κυρίως στα λάδια των ΜΕΚ και έχουν σκοπό να εμποδίσουν τη ρύπανση των κυλίνδρων από τα σχηματιζόμενα εξανθρακώματα. Αυτό οφείλεται στην ιδιότητα των ουσιών αυτών να περιβάλλουν τα εξανθρακώματα με μία λεπτή μεμβράνη, εμποδίζοντας έτσι την επικάθησή τους στα εσωτερικά τοιχώματα των κυλίνδρων.

4) Τα **αντιοξειδωτικά πρόσθετα** (antioxidants), που επιβραδύνουν ή ακόμα και εμποδίζουν τελείως την οξείδωση του λιπαντικού. Η οξείδωση του λιπαντικού είναι ανεπιθύμητη γιατί καταστρέφει τις λιπαντικές του ικανότητες και ακόμα μπορεί, με τα οξέα που παράγονται κατά την οξείδωση, να δράσει διαβρωτικά στις μεταλλικές επιφάνειες. Η αναλογία τους κυμαίνεται από 0,5–2%.

5) Οι **χαλινωτές** ή **παρεμποδιστές διάβρωσης** (corrosion inhibitors), που εμποδίζουν τη διάβρωση των μετάλλων, την οποία θα μπορούσαν να προκαλέσουν το νερό ή τα προϊόντα οξείδωσης του λαδιού. Αυτό οφείλεται στην υψηλή πολική έλξη που τα πρόσθετα αυτά διαθέτουν προς τις μεταλλικές επιφάνειες. Σχηματίζεται έτσι στις μεταλλικές επιφάνειες ένα συνεχές συνεκτικό στρώμα, που εμποδίζει την άμεση επαφή όλων των παραπάνω διαβρωτικών παραγόντων με τα μέταλλα.

6) Τα **προληπτικά φθοράς** (wear preventives), που προστίθενται για να περιορίσουν τη φθορά από την τριβή κάτω από συνθήκες οριακής λίπανσης. Μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

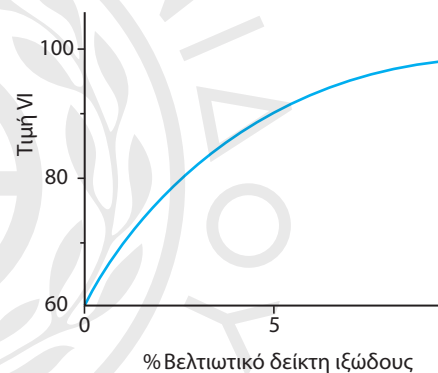
α) **Βελτιωτικά λιπαρότητας** (oiliness agents), που είναι ουσίες που μειώνουν το συντελεστή τριβής.

β) **Προληπτικά φθοράς** για συνηθισμένη καταπόνηση και

γ) **προληπτικά φθοράς** για πολύ υψηλές πιέσεις (extreme pressure additives), που αφορούν λιπαντέλαιο με την ένδειξη E.P. (extreme pressure) και έχουν ιδιαίτερη σημασία για λίπανση των μειωτήρων στρω-

φών των ατμοστροβίλων, όπου πράγματι αναπτύσσονται πολύ μεγάλες πιέσεις. Τα λιπαντέλαιο αυτά είναι γνωστά ως TEP (turbine extreme pressure).

Η βελτίωση ορισμένων ιδιοτήτων των ορυκτελαίων με χημικά πρόσθετα δεν είναι ανάλογη με την ποσότητα του χημικού προσθέτου. Ενώ στην αρχή υπάρχει θεαματική βελτίωση, από ορισμένο ποσοστό αναλογίας και πέρα η βελτίωση είναι ασήμαντη και το όφελος αμφίβολο. Η βάση δηλαδή της αξίας ενός λιπαντικού είναι η ποιότητα της πρώτης ύλης από την οποία προέρχεται και η επεξεργασία που έχει προηγηθεί. Στο διάγραμμα του σχήματος 14.1 φαίνεται ότι για ένα βασικό λιπαντικό με δείκτη ιξώδους 60, προσθέτοντας ένα βελτιωτικό δείκτη ιξώδους μέχρι 5% ανεβάζουμε το δείκτη ιξώδους στα όρια του 90. Για 10% πρόσθετο συνεισφέρουμε μόνο 10 μονάδες δείκτη ιξώδους ακόμα, ενώ πέρα από το 10% η βελτίωση του δείκτη ιξώδους είναι σχεδόν αμελητέα.



Σχ. 14.1

Τα περισσότερα χημικά πρόσθετα μετά από ορισμένες ώρες λειτουργίας της μηχανής εξαντλούνται ή καταστρέφονται. Η ανανέωσή τους μπορεί να γίνει, μόνο κατά την αναζωογόνηση του λιπαντικού, πράγμα που απαιτεί ειδικές εγκαταστάσεις. Μερική ενίσχυση του λιπαντικού γίνεται κατά τις τμηματικές συμπληρώσεις των δεξαμενών με καινούργιο λιπαντικό. Η ποσότητα του λιπαντικού, όμως, που προσθέτουμε πρέπει να είναι μικρή (λιγότερο από 10% της ποσότητας που η μηχανή περιέχει) και το λιπαντικό στη δεξαμενή υποδοχής να είναι θερμό.

#### 14.5 Συνθετικά λιπαντικά

Τα λιπαντικά της κατηγορίας αυτής δεν προέρχονται από το φυσικό πετρέλαιο, αλλά παράγονται συνθετικά.

Εφαρμόζονται σε περίπτωση που τα ορυκτέλαια δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των συνθηκών για τις οποίες προορίζονται. Η επιλογή των πρώτων υλών, αλλά και της διαδικασίας παραγωγής τους, επιτρέπουν την εξασφάλιση των ιδιοτήτων εκείνων, που μπορούν να ικανοποιήσουν τις ειδικές απαιτήσεις για κάθε περίπτωση λίπανσης. Παρά το υψηλό κόστος τους, η χρήση τους επεκτείνεται όλο και περισσότερο, γιατί το κόστος αυτό, όπως είπαμε και αλλού, αντισταθμίζεται από το κέρδος στη συντήρηση της μηχανής και γενικότερα στην παράταση της ζωής της.

Από τα σπουδαιότερα είδη συνθετικών λιπαντικών είναι τα ακόλουθα που έχουν βιομηχανική εφαρμογή:

### 1) Πολυ-αλφα-ολεφίνες

Πρόκειται για υδρογονάνθρακες της ομάδας πολυ-αλφα-ολεφινών που σχηματίζονται από τη σύνθεση αερίων και προϊόντων πετρελαίου. Έχουν ικανοποιητικές αντιοξειδωτικές και αντιτριβικές ιδιότητες και στην καθαρή τους μορφή χρησιμοποιούνται σε υδραυλικά συστήματα βιομηχανιών τροφίμων και φαρμάκων, στη λίπανση γραναζιών, αλυσίδων και ρουλεμάν. Η θερμοκρασιακή σταθερότητά τους είναι εξαιρετική. Οι πολυ-αλφα-ολεφίνες μπορούν να αναμιχθούν με ορυκτέλαια (προς ημι-συνθετικά λιπαντικά) και με εστέρες (για βέλτιστα σύνθετα λιπαντικά).

### 2) Εστέρες διβασικών οξέων

Πρόκειται για αλειφατικούς διεστέρες του γενικού τύπου:



από τους οποίους γνωστότερος είναι ο διισοοκτυλικός εστέρας του σεβακικού οξέος. Σπουδαιότερο προσόν τους είναι η εξαιρετική σταθερότητα του ιξώδους απέναντι στις μεταβολές της θερμοκρασίας, δηλαδή η πολύ μεγάλη τιμή του δείκτη ιξώδους. Έχουν επίσης ικανοποιητική χημική σταθερότητα, μικρή πτητικότητα και με τα πρόσθετα που περιέχουν δεν προκαλούν διαβρώσεις στα μέταλλα. Το μειονέκτημά τους είναι ότι προσβάλλουν χρώματα και πλαστικά ή εξαρτήματα από λάστιχο, με τα οποία έρχονται σε επαφή. Χρησιμοποιούνται σε μηχανές αεριοθωμένων αεροπλάνων, καθώς και για τη λίπανση ορισμένων οργάνων.

### 3) Οργανοφωσφορικοί εστέρες

Έχουν εξαιρετική λιπαρότητα και ικανοποιητικές τιμές δείκτη ιξώδους. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι η ευπάθειά τους ως προς την υδρόλυση, από την οποία παράγεται το εξαιρετικά διαβρωτικό φω-

σφορικό οξύ. Έχουν καλή θερμική σταθερότητα έως τους 150°C. Χρησιμοποιούνται ως υδραυλικά λάδια.

### 4) Εστέρες του πυριτικού οξέος

Έχουν την καλύτερη τιμή δείκτη ιξώδους, δηλαδή τη μικρότερη μεταβολή ιξώδους με τη θερμοκρασία, απ' όλα τα συνθετικά λιπαντικά. Υστερούν και αυτά ως προς την ευπάθεια στην υδρόλυση, από την οποία παράγεται πυριτικό οξύ [με γενικό τύπο  $\text{SiO}_x(\text{OH})_{4-2x}$ ] που μπορεί να προκαλέσει σοβαρές φθορές στους τριβείς τους οποίους λιπαίνουν. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή λιπαντικών λιπών (γράσα) με μικρή πτητικότητα.

### 5) Σιλικόνες

Είναι ένα από τα πιο γνωστά είδη συνθετικών λιπαντικών. Έχουν ως βάση προϊόντα πολυμερισμού των **σιλοξανών**, δηλαδή οργανοπυριτικών ενώσεων, από τις οποίες γνωστότερες είναι:

- 1) η διμεθυλοσιλαξόνη  $\text{CH}_3\text{SiOCH}_3$  και
- 2) η μεθυλοφαινολοσιλοξάνη  $\text{CH}_3\text{SiOC}_6\text{H}_5$ .

Διακρίνονται για τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) εξαιρετικά υψηλές τιμές δείκτη ιξώδους,
- 2) πολύ καλή αντοχή στην οξείδωση και
- 3) σταθερότητα στις υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 300°C).

Ένα από τα μειονεκτήματά τους είναι ότι δεν αντέχουν σε μεγάλες πιέσεις που αναπτύσσονται από υψηλά φορτία τριβών και που μπορεί να προκαλέσουν την ζελατινοποίησή τους.

Στον πίνακα 14.3 αναγράφονται τα κυριότερα γνωρίσματα και οι σπουδαιότερες εφαρμογές των συνθετικών λιπαντικών.

Ειδική κατηγορία συνθετικών λιπαντικών παρασκευάζονται με βάση συνθετικού υδρογονάνθρακες, και προορίζονται για λίπανση ΜΕΚ.

## 14.6 Στερεά λιπαντικά

Στην κατηγορία αυτή των λιπαντικών κατατάσσονται ορισμένες ουσίες, στερεές στη συνηθισμένη θερμοκρασία, που πρέπει να συγκεντρώνουν τις εξής βασικές ιδιότητες:

- 1) Πρόσφυση στα μέταλλα.
- 2) Ελαστικότητα-ευκαμψία.
- 3) Σταθερότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.
- 4) Να μην προσβάλλουν τις μεταλλικές επιφάνειες.

Σε σχέση με τα συνηθισμένα λιπαντικά πλεονεκτούν κατά το ότι αντέχουν σε θερμοκρασίες κατά πολύ υψηλότερες.

Συνηθέστερα είδη στερεών λιπαντικών είναι:

- 1) Ο γραφίτης.
- 2) Το διθειούχο μολυβδαίνιο.
- 3) Ο τάλκης.
- 4) Η μίκα

Συνήθως έχουν στρωματική υφή, που επιτρέπει τη λίπανση. Περισσότερο χρησιμοποιούνται ο γραφίτης και το διθειούχο μολυβδαίνιο, που αντέχουν μέχρι τους 400°C. Η άριστη πρόσφυση που έχει το διθειούχο μολυβδαίνιο στις μεταλλικές επιφάνειες μεταδίδεται

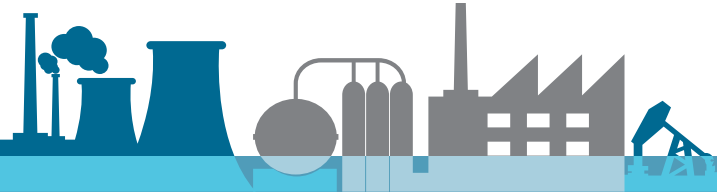
και στα ορυκτέλαια, στα οποία το προσθέτουμε, για να αυξήσουν την αντοχή τους σε πολύ μεγάλες πιέσεις. Τα λιπαντικά αυτά μπορούν να χαρακτηρισθούν ως **πολύ υψηλής πίεσης** (extreme pressure) γιατί είναι κατάλληλα για τη λίπανση τριβών που δέχονται εξαιρετικά μεγάλες πιέσεις (βλ. § 14.4.5).

Ως στερεά λιπαντικά, για συρματόσχοινα ή άλλες παρόμοιες εξωτερικές χρήσεις, χρησιμοποιούνται και ορισμένες οργανικές ενώσεις όπως τα λίπη, τα σαπούνια και τα κεριά.

**Πίνακας 14.3**  
**Κύρια χαρακτηριστικά των συνθετικών λιπαντικών**

| α/α | Είδος συνθετικού λιπαντικού  | Ιδιότητες                      |                      |               |                     |                      |             | Εφαρμογές   |
|-----|------------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------|---------------------|----------------------|-------------|---|
|     |                              | Σχέση ιξώδους και θερμοκρασίας | Αντοχή στην οξειδωση | Λιπαντικότητα | Θερμική σταθερότητα | Αντοχή στην υδρόλυση | Πτητικότητα |   |
| 1.  | Πολυ-αλφα-ολεφίνες           | ΠΚ                             | ΠΚ                   | Κ             | ΠΚ                  | Μ                    | χαμηλή      | Λίπανση ειδικών ευαίσθητων εφαρμογών με απαίτηση καθαρότητας, παρασκευή ημι-συνθετικών λιπαντικών                                 |
| 2.  | Εστέρες διβασικών οξέων      | ΠΚ                             | Κ                    | Κ             | Κ                   | Μ                    | χαμηλή      | Λίπανση μηχανών αεριωθουμένων αεροπλάνων. Υδραυλικά υγρά. Λίπανση συσκευών και οργάνων. Γράσο χαμηλής πτητικότητας.               |
| 3.  | Εστέρες του φωσφορικού οξέος | Κ                              | ΠΚ                   | ΠΚ            | Μ                   | Μ                    | πολύ χαμηλή | Παρασκευή γράσων με χαμηλή πτητικότητα και μεγάλη λιπαντική ικανότητα.  |
| 4.  | Εστέρες του πυριτικού οξέος  | Ε                              | Μ                    | Μ             | Ε                   | Μ                    | χαμηλή      | Υγρά μεταφοράς θερμότητας. Υδραυλικά υγρά για υψηλές θερμοκρασίες.  |
| 5.  | Σιλικόνες                    | Ε                              | Ε                    | Μ             | Κ                   | Ε                    | πολύ χαμηλή | Λίπανση συσκευών, που απαιτούν ελάχιστη μεταβολή του ιξώδους με τη θερμοκρασία. Παρασκευή γράσων μεγάλης αντοχής σε υψηλά φορτία. |





### 15.1 Σκοπός και σημασία του ποιοτικού ελέγχου

Ο ποιοτικός έλεγχος των λιπαντικών για τις ναυτικές εφαρμογές γίνεται σε δύο κυρίως περιπτώσεις:

1) Κατά την αρχική παραλαβή ορισμένης ποσότητας λιπαντικού από τις εταιρείες, με σκοπό να εξακριβωθεί κατά πόσο το λιπαντικό αυτό ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του τύπου στον οποίο ανήκει. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται πλήρης χημική ανάλυση, που μόνο σε κατάλληλα εξοπλισμένα χημικά εργαστήρια μπορεί να γίνει, οπότε και εκδίδεται **δελτίο ανάλυσης**, που συνοδεύει την ποσότητα του λιπαντικού απ' το οποίο προέρχονται τα δείγματα και παραδίδεται στον μηχανικό της εταιρείας που θα το χρησιμοποιήσει. Το δελτίο ανάλυσης έχει αξία κυρίως γιατί οι τιμές των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, που αναγράφονται στο δελτίο, αποτελούν μέτρο σύγκρισης για τις αντίστοιχες τιμές που θα προκύπτουν κατά τις περιοδικές δοκιμές του ίδιου λιπαντικού, όσο καιρό χρησιμοποιείται από το πλοίο, στο οποίο έχει χορηγηθεί.

Αν παρατηρηθεί σημαντική απόκλιση από τις αρχικές τιμές ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών του λιπαντικού, αυτό μπορεί να βοηθήσει στην επισημάνση κάποιας ανωμαλίας της μηχανής, στην οποία το λιπαντικό αυτό χρησιμοποιείται, και να οδηγήσει στην έγκαιρη αντιμετώπισή της. Για παράδειγμα, μια ασυνήθιστη μείωση του ιξώδους του λιπαντικού, που συνοδεύεται και από μείωση του σημείου ανάφλεξης του, φανερώνει διαρροή καυσίμου στο λιπαντικό. Στην περίπτωση αυτή το αίτιο ή η βλάβη πρέπει να αναζητηθεί στους καυστήρες, που συχνά παρουσιάζουν διαρροή καυσίμου, η οποία πρέπει έγκαιρα να εντοπιστεί και να αποκατασταθεί.

2) Η χρήση ενός λιπαντικού για μεγάλο χρονικό διάστημα σε μια μηχανή μπορεί να αλλοιώσει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του σε βαθμό που η εκπλήρωση της αποστολής του, δηλαδή η ορθή λίπανση, να είναι προβληματική. Για το ενδεχόμενο αυτό επιβάλλεται να γίνεται ο περιοδικός έλεγχος του λιπαντικού, που ονομάζεται **επιτήρηση ποιότητας**

(quality surveillance). Ο έλεγχος πραγματοποιείται σε ορισμένα χρονικά διαστήματα ή μετά από ορισμένες ώρες λειτουργίας της μηχανής, που ο μηχανικός έχει καθορίσει. Τα δείγματα αυτά στέλνονται στα ειδικά εργαστήρια, συνήθως της εταιρείας από την οποία προέρχεται το λιπαντικό, τα οποία εκδίδουν επίσης ένα δελτίο ανάλυσης με παρατηρήσεις ή υποδείξεις ανάλογα με τα αποτελέσματα των δοκιμών. Παράδειγμα τέτοιου **Δελτίου Ανάλυσης** (technical report) παρατίθεται στο τέλος του κεφαλαίου.

Η σημασία του ποιοτικού ελέγχου των λιπαντικών για τον μηχανικό εντοπίζεται σε δύο **κυρίως** σημεία:

1) Να μπορεί ο μηχανικός να εκτελεί μόνος του ορισμένες από τις δοκιμές και μετρήσεις με τα πρόχειρα εργαστηριακά μέσα που ενδεχομένως διαθέτει το πλοίο του (βλ. § 15.15).

Αν και η ακρίβεια των μετρήσεων στην περίπτωση αυτή αναμένεται να είναι χαμηλή, ο μηχανικός παίρνει άμεσα μια ένδειξη για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το λιπαντικό. Όταν υπάρχει και η παραμικρή αμφιβολία για τα αποτελέσματα μίας τέτοιας πρόχειρης εξέτασης, τότε δείγματα στέλνονται στα χημικά εργαστήρια της εταιρείας από την οποία προέρχεται το λιπαντικό για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

2) Να μπορεί να ερμηνεύει σωστά τα αποτελέσματα των δοκιμών που περιέχονται στα δελτία ανάλυσης που παίρνει από τα εργαστήρια των εταιρειών και σύμφωνα μ' αυτά να προβαίνει στις ενέργειες που απαιτούνται για τον εντοπισμό ή την αποκατάσταση μιας ανωμαλίας, την οποία η ανάλυση μπορεί να επισημάνει.

Πρέπει να τονισθεί ότι όλες σχεδόν οι εταιρείες πετρελαιοειδών, από τις οποίες τα πλοία του εμπορικού ναυτικού προμηθεύονται τα λιπαντικά, αναλαμβάνουν την παρακολούθηση της ποιότητας των λιπαντικών με ένα άρτιο και καλά οργανωμένο δίκτυο εργαστηρίων που είναι διασπαρμένα σε όλα τα μέρη της υδρογειού. Ο μηχανικός του πλοίου στην περίπτωση αυτή φροντίζει για την έγκαιρη αποστολή των δειγμάτων στο

πλησιέστερο εργαστήριο της εταιρείας, απ' την οποία προέρχονται τα λιπαντικά και με την οποία υπάρχει ειδική σύμβαση.

Από τα παραπάνω προκύπτει μια βασική διαφορά ανάμεσα στον ποιοτικό έλεγχο των καυσίμων και στον ποιοτικό έλεγχο των λιπαντικών:

Ο έλεγχος των καυσίμων γίνεται **μια φορά μόνο**, κατά την αρχική παραλαβή. Αλλοίωση των χαρακτηριστικών του κατά την παραμονή του στις δεξαμενές ή κατά τη χρήση του είναι απίθανη, εκτός από την περίπτωση ανωμαλίας, όπως ανάμειξή του με νερό λόγω διαρροής στο δίκτυο καυσίμου.

Ο έλεγχος των λιπαντικών πρέπει να είναι συνεχής, πράγμα που εξασφαλίζεται με την **επιτήρηση ποιότητας**.

Εκτός από τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας των λιπαντικών, οι εταιρείες ενημερώνουν συνεχώς τους πελάτες τους, για τις νεότερες εξελίξεις στον τομέα χρήσης των κατάλληλων λιπαντικών. Για τον σκοπό αυτό στέλνουν πίνακες των λιπαντικών, που θεωρούνται κατάλληλα για κάθε περίπτωση λίπανσης πάνω στο πλοίο.

Στο Παράρτημα Β αναγράφονται οι εμπορικές ονομασίες των σπουδαιότερων τύπων λιπαντικών για μερικές από τις γνωστότερες εταιρείες πετρελαιοειδών.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι κυριότερες εξετάσεις και δοκιμές που αφορούν στα υγρά λιπαντικά. Οι εξετάσεις των γράσων περιγράφονται στο κεφάλαιο 18.

## 15.2 Δειγματοληψία

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μιας χημικής ανάλυσης εξαρτάται κατά κύριο λόγο απ' τον τρόπο με το οποίο γίνεται η λήψη του δείγματος.

Οι βασικοί κανόνες για τη σωστή δειγματοληψία μπορούν να συνοψισθούν στα εξής:

### 1) Αντιπροσωπευτικότητα

Το δείγμα που θα σταλεί για εξέταση πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό όλης της ποσότητας του λιπαντικού απ' την οποία προέρχεται. Για τον σκοπό αυτό πρέπει το δείγμα να λαμβάνεται ζεστό και όσο η μηχανή βρίσκεται ακόμα σε λειτουργία. Αν αυτό δεν είναι δυνατό, πρέπει η δειγματοληψία να γίνει αμέσως μετά το κράτημα της μηχανής, ώστε το λιπαντικό να είναι ακόμα ζεστό.

Το δείγμα λαμβάνεται συνήθως από ειδικό κρου-

νό, που βρίσκεται πριν από τον φυγοκεντρικό καθαριστήρα, αφού προηγουμένως αφεθεί να τρέξει αρκετή ποσότητα λιπαντικού.

Ο πιο κατάλληλος χρόνος για τη δειγματοληψία είναι κατά τη διάρκεια της τελευταίας βάρδιας, πριν από τον κατάπλου του πλοίου στο λιμάνι.

### 2) Καθαρότητα

Τα δοχεία στα οποία συλλέγεται το δείγμα πρέπει να είναι **καθαρά** και **στεγνά**. Ο καθαρισμός πρέπει να γίνεται πρώτα με έναν οργανικό διαλύτη (π.χ. ακετόνη ή βενζίνη) και ύστερα με νερό. Τα ξεπλυμένα δοχεία στεγνώνονται σε φούρνο στη θερμοκρασία 100–105°C, ώστε να εξατμισθεί και η τελευταία σταγόνα νερού.

### 3) Συχνότητα

Εφόσον δεν υπάρχει ειδικός λόγος, όπως ανωμαλία της μηχανής, η δειγματοληψία του λιπαντικού για τον ποιοτικό έλεγχο πρέπει να γίνεται κάθε 3 μήνες για τα λιπαντικά MEK και κάθε 6 μήνες για τα τουρμπινέλαια. Προτιμότερο είναι η δειγματοληψία να γίνεται όταν το λιπαντικό συμπληρώσει ορισμένες ώρες λειτουργίας (200–600 h) και να τηρείται ειδικό μητρώο για κάθε μηχανήμα στο οποίο καταχωρούνται τα αποτελέσματα κάθε ανάλυσης. Έτσι θα μπορεί να έχουμε μια εικόνα της κατάστασης του λιπαντικού όσο διάστημα χρησιμοποιείται στη μηχανή, κάτι που συχνά φανερώνει και την κατάσταση της μηχανής.

Στα δοχεία που περιέχουν τα δείγματα, πριν σταλούν στο εργαστήριο για έλεγχο, τοποθετείται αυτοκόλλητη ετικέτα, στην οποία αναγράφονται το όνομα πλοίου, η ημερομηνία δειγματοληψίας, οι ωρες λειτουργίας, ο τύπος λιπαντικού, το λιπανόμενο μηχανήμα, η ποσότητα που αντιπροσωπεύει το δείγμα

## 15.3 Μακροσκοπική εξέταση

Γίνεται σε αντιπροσωπευτικό δείγμα του λιπαντικού με απλή παρατήρηση σε γυάλινο δοκιμαστικό σωλήνα ή σε άλλο κατάλληλο σκεύος.

Κατά τη μακροσκοπική εξέταση ελέγχονται τα εξής κυρίως σημεία:

1) **Εμφάνιση**. Το καινούργιο λιπαντικό πρέπει να είναι τελείως διαυγές. Για το μεταχειρισμένο λιπαντικό:

α) **αν πρόκειται για τουρμπινέλαιο** είναι ανεκτή μια μικρή θολερότητα, λόγω πιθανής παρουσίας νερού, και

β) **αν πρόκειται για λιπαντικό ΜΕΚ** είναι αναμενόμενο να δείχνει μαύρο και αδιαφανές.

2) **Ξένες ύλες.** Ελέγχεται προσεκτικά η παρουσία ξένων υλών, που μπορεί να αιωρούνται στο λιπαντικό ή να κατακαθίζονται στον πυθμένα του γυάλινου δοκιμαστικού σωλήνα. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην τυχόν παρουσία μεταλλικών τεμαχίων, δηλαδή ρινισμάτων ή ξεσμάτων, που είναι πολύ επικίνδυνα για τη μηχανή και ιδιαίτερα για τα ευπαθή αντιτριβικά κράματα των εδράνων. Αν διαπιστωθεί η παρουσία τέτοιων μεταλλικών ρινισμάτων, πρέπει το δείγμα να υποστεί διήθηση με χαρτί ή βαμβάκι, ώστε να συγκρατηθούν οι ξένες ύλες, και να εξεταστούν κατόπιν προσεκτικότερα. Έτσι τα συμπεράσματα από τη μακροσκοπική εξέταση θα είναι πιο ασφαλή.

3) **Χρώμα.** Το χρώμα ενός λιπαντικού μόνο ενδείξεις μπορεί να παρέχει για την ποιότητα ή για την κατάστασή του. Τα καινούργια λιπαντικά είναι γενικά ανοικτόχρωμα, ενώ με τη χρήση τους το χρώμα σκουραίνει. Αυτή η μεταβολή του χρώματος σε σκουρότερες αποχρώσεις είναι πιο αισθητή στα λιπαντικά ΜΕΚ, που περιέχουν διασκορπιστικά πρόσθετα, τα οποία συγκρατούν τα εξανθρακώματα σε αιώρηση. Στην περίπτωση αυτή ο βαθύς χρωματισμός, που το λιπαντικό αποκτά λίγες ώρες μετά την έναρξη της λειτουργίας του, σημαίνει ότι το λιπαντικό αυτό εκπληρώνει μια βασική αποστολή του, που είναι η διατήρηση της καθαρότητας των λιπανόμενων επιφανειών.

#### 15.4 Ιξώδες

Το **ιξώδες** είναι το αντίθετο της **ρευστότητας** και είναι το σπουδαιότερο από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά ενός λιπαντικού, η δε τιμή του αποτελεί αποφασιστικό παράγοντα για τις συνθήκες λίπανσης. Όταν η τιμή του ιξώδους είναι σχετικά υψηλή, θα έχουμε και σχετικά μεγάλο συντελεστή τριβής, άρα και μεγαλύτερη απώλεια έργου λόγω τριβής, όπως φαίνεται από την σχέση (5) της παραγράφου 13.3. Αντίθετα, σχετικά χαμηλό ιξώδες καθιστά αμφίβολη τη διατήρηση της λιπαντικής μεμβράνης, που μπορεί εύκολα να καταρρέει ή να συνθλίβεται από τις πιέσεις που ασκούν οι δυνάμεις σε έναν τριβέα, πράγμα που θα προκαλέσει τη γρήγορη φθορά του. Η υγρή λίπανση μπορεί να μεταπέσει σε συνθήκες οριακής λίπανσης, οι οποίες θα είναι αδύνατο πια να ελεγχθούν από το ιξώδες του λιπαντικού.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η μέτρηση του ιξώδους για τα μεταχειρισμένα λιπαντικά κατά τους διάφορους περιόδους ελέγχους, στους οποίους υποβάλλονται

αυτά μετά από ορισμένες ώρες λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή δεν επιτρέπεται μεταβολή του ιξώδους μεγαλύτερη από 10% της αρχικής τιμής, γιατί:

1) **Αύξηση** του ιξώδους μεγαλύτερη από 10% της αρχικής τιμής του (στις ίδιες συνθήκες μέτρησης) σημαίνει προχωρημένη αλλοίωση του λαδιού, από την οποία σχηματίζονται ασφαλούχα ή ρητινικά προϊόντα, που επέφεραν την παραπάνω αύξηση του ιξώδους. Η αύξηση του ιξώδους συμβαδίζει συνήθως με την αύξηση του αριθμού εξουδετέρωσης (οξύτητα) κι έτσι το λιπαντικό πρέπει να αντικατασταθεί.

2) **Μείωση** του ιξώδους κάτω από 10% της αρχικής τιμής του (στις ίδιες συνθήκες μέτρησης) οφείλεται συνήθως σε διαρροή καυσίμου στο λιπαντέλαιο, πράγμα που συνοδεύεται και από σημαντική μείωση του σημείου ανάφλεξης. Στην περίπτωση αυτή το λάδι πρέπει να αντικατασταθεί άμεσα, γιατί:

α) Υπάρχει κίνδυνος εκρήξεως στο στροφαλοθάλαμο.

β) Μειώνεται η συνοχή της λιπαντικής μεμβράνης σε βαθμό που συχνά συνθλίβεται, αφήνοντας τη λιπανόμενη επιφάνεια ακάλυπτη.

Αποφασιστική σημασία για το ιξώδες έχει η τιμή του παράγοντα  $vN/P$ , που συνδέεται με τον συντελεστή τριβής  $\mu$  με την παρακάτω σχέση:

$$\mu = k \cdot \frac{v \cdot N}{P}$$

Αυτό σημαίνει ότι η τιμή του συντελεστή τριβής  $\mu$ , που αναπτύσσεται στη λιπαντική μεμβράνη (εσωτερική τριβή των μορίων του λιπαντικού), εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

α) Από την τιμή του κινηματικού ιξώδους  $\nu$ , προς την οποία είναι ανάλογη.

β) Από την ταχύτητα περιστροφής  $N$  του άξονα που λιπαίνεται με το εξεταζόμενο λιπαντικό σε έναν συγκεκριμένο τριβέα, προς την οποία είναι επίσης ανάλογη.

γ) Από το φορτίο  $P$ , προς το οποίο ο συντελεστής τριβής  $\mu$  είναι αντιστρόφως ανάλογος και

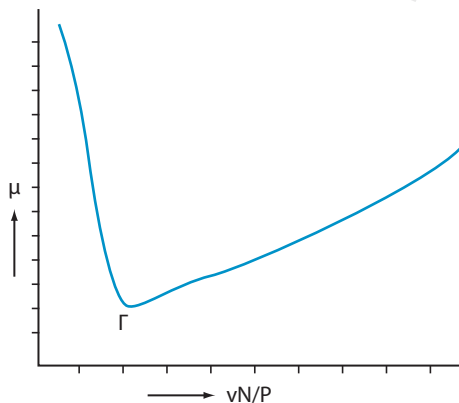
δ) από τον συντελεστή  $k$ , που εξαρτάται από τις άλλες συνθήκες που επικρατούν κατά τη λίπανση ή από τα ειδικά χαρακτηριστικά του τριβέα.

Τη σχέση μεταξύ του συντελεστή τριβής  $\mu$  και της ομάδας  $vN/P$  απεικονίζει η καμπύλη του σχήματος 15.1. Στο αριστερό τμήμα της καμπύλης, όπου επικρατεί η οριακή λίπανση, όταν μειώνεται η τιμή της ομάδας  $vN/P$ , έχουμε απότομες μεταβολές της τριβής, όπως φαίνεται από τις μεταβολές του συντελεστή  $\mu$ , που δύσκολα αντισταθμίζονται. Έτσι με οριακή λίπανση

ση, μια μικρή αύξηση της ταχύτητας περιστροφής  $N$  προκαλεί σημαντική ελάττωση της τριβής, ενώ με λιγότερες στροφές η τριβή αυξάνει απότομα. Γενικά οι συνθήκες της οριακής λίπανσης δύσκολα ελέγχονται, γιατί δεν επηρεάζονται ουσιαστικά από το ιξώδες, ενώ αντίθετα στην υδροδυναμική λίπανση, την οποία απεικονίζει το δεξιό τμήμα της καμπύλης του σχήματος 15.1, η μεταβολή της τριβής, όταν μεταβάλλεται ένας από τους παράγοντες της ομάδας  $vN/P$ , είναι ομαλότερη. Η μεταβολή μιας από τις μεταβλητές  $v$ ,  $N$  ή  $P$  είναι εύκολο να αντισταθμισθεί από αντίστοιχη μεταβολή μιας άλλης.

Για παράδειγμα, αν στην περιοχή της υδροδυναμικής λίπανσης μειωθούν οι στροφές  $N$ , μειώνεται η τιμή της ομάδας  $vN/P$ , που μετακινείται προς τα αριστερά, όπου βρίσκεται το **γόνατο** της καμπύλης  $\Gamma$ , μετά το οποίο μπαίνουμε στην οριακή λίπανση. Αυτό όμως στην πράξη σπάνια συμβαίνει, εκτός αν η πτώση των στροφών είναι πολύ απότομη. Διαφορετικά αντισταθμίζεται από την αύξηση του ιξώδους  $\nu$ , που οφείλεται στη μείωση της θερμοκρασίας του λιπαντικού, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 13.4. Έτσι η τιμή  $vN/P$  μένει σχεδόν σταθερή, πράγμα που εξασφαλίζει και αντίστοιχη σταθερότητα στην τιμή του συντελεστή τριβής  $\mu$  και γενικά στις συνθήκες λίπανσης, στο μέτρο που αυτές εξαρτώνται από τον συντελεστή  $\mu$ .

Αντίθετα, στην περιοχή της οριακής λίπανσης, την οποία αντιπροσωπεύει το αριστερό σκέλος της καμπύλης στο διάγραμμα του σχήματος 15.1, οι συνθήκες λίπανσης είναι γενικά ασταθείς. Οι μεταβολές στην ομάδα  $vN/P$ , που καθορίζουν την τιμή του συντελεστή τριβής  $\mu$ , δεν αντισταθμίζονται όπως στην υδροδυναμική λίπανση. Για παράδειγμα αν αυξηθεί το φορτίο  $P$ , η τιμή  $vN/P$  ελαττώνεται, πράγμα που



**Σχ. 15.1**  
Εξάρτηση του συντελεστή τριβής  
από το ιξώδες του λιπαντικού

ανεβάζει τον συντελεστή τριβής  $\mu$  σε πολύ υψηλά επίπεδα, όπως δείχνει η απότομη κλίση του αριστερού σκέλους του διαγράμματος, που αντιστοιχεί στην οριακή λίπανση. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση ειδικών λιπαντικών που να έχουν τη λεγόμενη *λιπαρότητα* (oiliness). Τα λιπαντικά αυτά είναι ενισχυμένα με ειδικά χημικά πρόσθετα (oiliness additives) που εξουδετερώνουν τα δυσμενή αποτελέσματα της οριακής λίπανσης. Η λείανση των κομβίων του άξονα στην περίπτωση αυτή πρέπει επίσης να είναι τέλεια, ώστε και πάλι να απομακρύνεται το ενδεχόμενο οριακής λίπανσης, που μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες στον τριβέα.

Η **μέτρηση** του ιξώδους ενός λιπαντικού βασίζεται, όπως και για τα καύσιμα και για όλα γενικά τα υγρά σώματα, στον χρόνο που απαιτείται για τη ροή ορισμένης ποσότητας δείγματος κάτω από αυστηρά καθορισμένες συνθήκες. Η ροή γίνεται από ειδικό ακροφύσιο και σε θερμοκρασία που, με τη βοήθεια μεγάλης ακρίβειας θερμοστατικών διατάξεων, διατηρείται σταθερή.

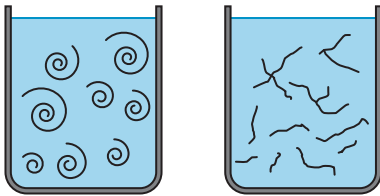
Οι συσκευές μέτρησης του ιξώδους λέγονται **ιξωδόμετρα** και περιγράφονται αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο του ποιοτικού ελέγχου καυσίμων (βλ. § 12.4).

### 15.5 Δείκτης ιξώδους

Ιδιαίτερη σημασία για ένα λιπαντικό δεν έχει μόνο η τιμή του ιξώδους του, αλλά και η σχέση ιξώδους-θερμοκρασίας, δηλαδή σε ποιον βαθμό η τιμή του ιξώδους επηρεάζεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας που το λιπαντικό αντιμετωπίζει μέσα στο δίκτυο λίπανσης της μηχανής. Τη σχέση ιξώδους-θερμοκρασίας εκφράζει η τιμή του λεγόμενου **δείκτη ιξώδους** που συμβολίζεται με  $\Delta.I.$  ή με  $V.I.$  (Viscosity Index). Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του  $V.I.$  ενός λιπαντικού, τόσο λιγότερο μεταβάλλεται το ιξώδες του από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Λιπαντικά με υψηλό  $V.I.$  έχουν αξιοσημείωτη σταθερότητα του ιξώδους απέναντι στις θερμοκρασιακές μεταβολές, πράγμα που αποτελεί ιδιότητα με μεγάλη σημασία. Τα λιπαντικά αυτά είναι γνωστά ως πολτύπα ή multigrade και με την ονομασία αυτή κυκλοφορούν στο εμπόριο. Παράγονται ύστερα από προσεκτική επιλογή των πρώτων υλών, κατάλληλη επεξεργασία και ανάμειξη με χημικά πρόσθετα που είναι βελτιωτικά του  $\Delta.I.$  ( $V.I.$  improvers).

Ο μηχανισμός δράσης των πρόσθετων αυτών μπορεί να εξηγηθεί αν δεχθούμε ότι τα μόριά τους έχουν σπειροειδή μορφή, που όταν θερμανθούν μετατρέπο-

νται σε επιμήκη μόρια. Σ' αυτήν την επιμήκη μορφή δυσχεραίνουν την κίνηση των μορίων του λιπαντικού, αυξάνουν τις τριβές των μορίων και επομένως δεν επιτρέπουν τη μείωση του ιξώδους (σχ. 15.2). Αντίθετα, όταν ελαττωθεί η θερμοκρασία, ανακτούν τη σπειροειδή μορφή, που δεν εμποδίζει την κίνηση των μορίων του λιπαντικού και έτσι η τιμή του ιξώδους ελάχιστα μεταβάλλεται.



Σχ. 15.2

Όλες αυτές οι διαδικασίες για την παραγωγή λιπαντικού με υψηλό δείκτη ιξώδους επιβαρύνουν σημαντικά το κόστος του, πράγμα που, όπως τονίσαμε παραπάνω, αντισταθμίζεται από το κέρδος που προκύπτει στη συντήρηση της μηχανής και από άλλα πλεονεκτήματα.

Τον ρόλο και τη σημασία του δείκτη ιξώδους αντιλαμβάνεται κανένας εύκολα αν λάβει υπόψη του τη μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας που συναντά ένα λιπαντικό κατά την εκκίνηση της μηχανής, έως τη στιγμή που αυτό θα βρεθεί στην κανονική λειτουργία της μηχανής. Η διακύμανση αυτή της θερμοκρασίας μπορεί να φθάσει τους 100°C και έτσι να μεταβάλει αισθητά το ιξώδες του λιπαντικού, σε βαθμό που η διατήρηση της λιπαντικής μεμβράνης, από την οποία εξαρτάται η ορθή λίπανση, να είναι αμφίβολη. Αυτό ακριβώς το ενδεχόμενο περιορίζεται τόσο περισσότερο, όσο ο δείκτης ιξώδους του λιπαντικού είναι μεγαλύτερος.

Για τη μέτρηση του δείκτη ιξώδους ενός λιπαντικού σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D2270-10 χρησιμοποιείται το κινηματικό ιξώδες του λιπαντικού, που μετρήθηκε σε ιξωδόμετρο με διαδικασία μέτρησης σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D445-19 στους 40°C και στους 100°C. Η κλίμακα δείκτη ιξώδους (V.I.) είναι μια αυθαίρετη κλίμακα, για τον καθορισμό της οποίας λαμβάνονται υπόψη οι τιμές δύο διαφορετικών λιπαντικών που παρουσίαζαν το ίδιο ιξώδες στους 100°C. Το μεν πρώτο ορυκτέλαιο από τυπικό πετρέλαιο του κόλπου του Μεξικού (ναφθενικής βάσης), εξαιρετικά ευπαθές στις μεταβολές της θερμοκρασίας, καταλαμβάνει το 0 της κλίμακας (V.I. = 0). Το δε δεύτερο ορυκτέλαιο από πετρέλαιο της Pennsylvania (παραφινικής βάσης),

πολύ λίγο ευαίσθητο στις αντίστοιχες μεταβολές της θερμοκρασίας, καταλαμβάνει το 100 της κλίμακας. Τέτοια πρότυπα λιπαντικά είναι διεθνώς καθιερωμένα και χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του δείκτη ιξώδους οποιουδήποτε άλλου λιπαντικού.

Σύμφωνα με την μέθοδο ASTM D2270-10 συμβολίζουμε με U το κινηματικό ιξώδες (σε cSt) του προς εξέταση ορυκτελαίου στους 40°C και με Y το κινηματικό ιξώδες (σε cSt) του ορυκτελαίου στους 100°C. Ο δείκτης ιξώδους (V.I.) δίνεται από τη σχέση:

$$V.I. = \frac{(L - U)}{(L - H)} \cdot 100 \quad (1)$$

όπου: L είναι το κινηματικό ιξώδες (σε cSt) ορυκτελαίου σε 40°C με V.I. = 0 και H είναι το κινηματικό ιξώδες (σε cSt) ορυκτελαίου σε 40°C με V.I. = 100.

Οι τιμές των L και H βρίσκονται από τον πίνακα 15.1 χρησιμοποιώντας ως είσοδο την τιμή Y (σε cSt). Για τιμές Y που δεν αναγράφονται και είναι ενδιάμεσες στον πίνακα, χρησιμοποιούμε γραμμική παρεμβολή. Για τιμές Y < 2 cSt ή Y > 70 cSt υπάρχουν μαθηματικοί τύποι για την εύρεση των L και H.

Η σχέση (1) ισχύει όταν U > H, οπότε και V.I. < 100. Σε περίπτωση που από τον πίνακα 15.1 προκύψει U < H τότε για την εύρεση του V.I. θα χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση (2):

$$V.I. = \frac{(\text{antilog } N) - 1}{0,00715} + 100 \quad (2)$$

$$\text{όπου: } N = \frac{\log H - \log U}{\log Y}$$

### Ασκήσεις

1. Το ιξώδες ενός προς εξέταση λιπαντικού παίρνει τιμή 4,50 cSt στους 100°C και 24,80 cSt στους 40°C. Να υπολογιστεί ο δείκτης ιξώδους (V.I.) του λιπαντικού σύμφωνα με την μέθοδο ASTM D2270-10.

### Λύση

Ο δείκτης ιξώδους του λιπαντικού θα βρεθεί με τη μέθοδο ASTM D2270-10. Θα θέσουμε U = 24,80 cSt. Για τον προσδιορισμό των L και H θα χρησιμοποιήσουμε τον πίνακα 15.1 της μεθόδου και θέτουμε ως τιμή εισόδου Y = 4,50 cSt.

Έτσι: L = 31,96 cSt και H = 23,81 cSt.

Πίνακας 15.1  
 Προσδιορισμός των παραμέτρων υπολογισμού του δείκτη ιξώδους σύμφωνα με τη  
 μέθοδο ASTM D2270-10 για τιμές ιξώδους σε 40°C και 100°C

| Kinematic<br>Viscosity<br>at<br>100°C,<br>mm <sup>2</sup> /s<br>(cSt) | L     |       | H    |       | Kinematic<br>Viscosity<br>at 100°C,<br>mm <sup>2</sup> /s<br>(cSt) | L    |       | H     |      | Kinematic<br>Viscosity<br>at 100°C,<br>mm <sup>2</sup> /s<br>(cSt) | L     |      | H     |       | Kinematic<br>Viscosity<br>at 100°C,<br>mm <sup>2</sup> /s<br>(cSt) | L    |       | H |  |
|---|-------|-------|------|-------|--|------|-------|-------|------|--|-------|------|-------|-------|--|------|-------|---|--|
|   | L     | H     | L    | H     |  | L    | H     | L     | H    |  | L     | H    | L     | H     |  | L    | H     |   |  |
| 2.00  | 7.994 | 6.394 | 7.00 | 78.00 | 48.57  | 12.0 | 201.9 | 103.0 | 17.0 | 369.4  | 180.2 | 24.0 | 683.9 | 301.8 | 42.5   | 1935 | 714.9 |   |  |
| 2.10  | 8.640 | 6.804 | 7.10 | 80.25 | 49.61  | 12.1 | 204.8 | 103.4 | 17.1 | 373.3  | 181.7 | 24.2 | 694.5 | 305.6 | 43.0   | 1978 | 728.2 |   |  |
| 2.20  | 9.309 | 7.410 | 7.20 | 82.39 | 50.69  | 12.2 | 207.8 | 110.7 | 17.2 | 377.1  | 183.3 | 24.4 | 704.2 | 309.4 | 43.5   | 2021 | 741.3 |   |  |
| 2.30  | 10.00 | 7.944 | 7.30 | 84.53 | 51.78  | 12.3 | 210.7 | 112.0 | 17.3 | 381.0  | 184.9 | 24.6 | 714.9 | 313.0 | 44.0   | 2064 | 754.4 |   |  |
| 2.40  | 10.71 | 8.496 | 7.40 | 86.66 | 52.88  | 12.4 | 213.6 | 113.3 | 17.4 | 384.9  | 186.5 | 24.8 | 725.7 | 317.0 | 44.5   | 2108 | 767.6 |   |  |
| 2.50  | 11.45 | 9.063 | 7.50 | 88.85 | 53.98  | 12.5 | 216.6 | 114.7 | 17.5 | 388.9  | 188.1 | 25.0 | 736.5 | 320.9 | 45.0   | 2152 | 780.9 |   |  |
| 2.60  | 12.21 | 9.647 | 7.60 | 91.04 | 55.09  | 12.6 | 219.6 | 115.0 | 17.6 | 392.7  | 189.7 | 25.2 | 747.2 | 324.9 | 45.5   | 2197 | 794.5 |   |  |
| 2.70  | 13.00 | 10.25 | 7.70 | 93.20 | 56.20  | 12.7 | 222.6 | 117.4 | 17.7 | 396.7  | 191.3 | 25.4 | 758.2 | 328.8 | 46.0   | 2243 | 808.2 |   |  |
| 2.80  | 13.80 | 10.87 | 7.80 | 95.43 | 57.31  | 12.8 | 225.7 | 118.7 | 17.8 | 400.7  | 192.9 | 25.6 | 769.3 | 332.7 | 46.5   | 2288 | 821.9 |   |  |
| 2.90  | 14.63 | 11.50 | 7.90 | 97.72 | 58.45  | 12.9 | 228.8 | 120.1 | 17.9 | 404.6  | 194.6 | 25.8 | 779.7 | 336.7 | 47.0   | 2333 | 835.5 |   |  |
| 3.00  | 15.49 | 12.15 | 8.00 | 100.0 | 59.60  | 13.0 | 231.9 | 121.5 | 18.0 | 408.6  | 196.2 | 26.0 | 790.4 | 340.5 | 47.5   | 2380 | 849.2 |   |  |
| 3.10  | 16.36 | 12.82 | 8.10 | 102.3 | 60.74  | 13.1 | 235.0 | 122.9 | 18.1 | 412.6  | 197.8 | 26.2 | 801.6 | 344.4 | 48.0   | 2426 | 863.0 |   |  |
| 3.20  | 17.26 | 13.51 | 8.20 | 104.6 | 61.89  | 13.2 | 238.1 | 124.2 | 18.2 | 416.7  | 199.4 | 26.4 | 812.8 | 348.4 | 48.5   | 2473 | 876.9 |   |  |
| 3.30  | 18.18 | 14.21 | 8.30 | 106.9 | 63.05  | 13.3 | 241.2 | 125.6 | 18.3 | 420.7  | 201.0 | 26.6 | 824.1 | 352.3 | 49.0   | 2521 | 890.9 |   |  |
| 3.40  | 19.12 | 14.93 | 8.40 | 109.2 | 64.18  | 13.4 | 244.3 | 127.0 | 18.4 | 424.9  | 202.6 | 26.8 | 835.5 | 356.4 | 49.5   | 2570 | 905.3 |   |  |
| 3.50  | 20.09 | 15.66 | 8.50 | 111.5 | 65.32  | 13.5 | 247.4 | 128.4 | 18.5 | 429.0  | 204.3 | 27.0 | 847.0 | 360.5 | 50.0   | 2618 | 919.6 |   |  |
| 3.60  | 21.08 | 16.42 | 8.60 | 113.9 | 66.48  | 13.6 | 250.6 | 129.8 | 18.6 | 433.2  | 205.0 | 27.2 | 857.5 | 364.6 | 50.5   | 2667 | 933.6 |   |  |
| 3.70  | 22.09 | 17.19 | 8.70 | 116.2 | 67.64  | 13.7 | 253.8 | 131.2 | 18.7 | 437.3  | 207.6 | 27.4 | 869.0 | 368.3 | 51.0   | 2717 | 948.2 |   |  |
| 3.80  | 23.13 | 17.97 | 8.80 | 118.5 | 68.79  | 13.8 | 257.0 | 132.6 | 18.8 | 441.5  | 209.3 | 27.6 | 880.6 | 372.3 | 51.5   | 2767 | 962.9 |   |  |
| 3.90  | 24.19 | 18.77 | 8.90 | 120.9 | 69.94  | 13.9 | 260.1 | 134.0 | 18.9 | 445.7  | 211.0 | 27.8 | 892.3 | 376.4 | 52.0   | 2817 | 977.5 |   |  |
| 4.00  | 25.32 | 19.56 | 9.00 | 123.3 | 71.10  | 14.0 | 263.3 | 135.4 | 19.0 | 449.9  | 212.7 | 28.0 | 904.1 | 380.6 | 52.5   | 2867 | 992.1 |   |  |
| 4.10  | 26.50 | 20.37 | 9.10 | 125.7 | 72.27  | 14.1 | 266.6 | 135.8 | 19.1 | 454.2  | 214.4 | 28.2 | 915.8 | 384.6 | 53.0   | 2918 | 1007  |   |  |
| 4.20  | 27.75 | 21.21 | 9.20 | 128.0 | 73.42  | 14.2 | 269.8 | 133.2 | 19.2 | 458.4  | 216.1 | 28.4 | 927.0 | 388.8 | 53.5   | 2969 | 1021  |   |  |
| 4.30  | 29.07 | 22.05 | 9.30 | 130.4 | 74.57  | 14.3 | 273.0 | 133.6 | 19.3 | 462.7  | 217.7 | 28.6 | 938.6 | 393.0 | 54.0   | 3020 | 1036  |   |  |
| 4.40  | 30.48 | 22.92 | 9.40 | 132.8 | 75.73  | 14.4 | 276.3 | 141.0 | 19.4 | 467.0  | 219.4 | 28.8 | 951.2 | 396.6 | 54.5   | 3073 | 1051  |   |  |
| 4.50  | 31.96 | 23.81 | 9.50 | 135.3 | 76.91  | 14.5 | 279.6 | 142.4 | 19.5 | 471.3  | 221.1 | 29.0 | 963.4 | 401.1 | 55.0   | 3126 | 1066  |   |  |
| 4.60  | 33.52 | 24.71 | 9.60 | 137.7 | 78.08  | 14.6 | 283.0 | 143.9 | 19.6 | 475.7  | 222.8 | 29.2 | 975.4 | 405.3 | 55.5   | 3180 | 1082  |   |  |
| 4.70  | 35.13 | 25.63 | 9.70 | 140.1 | 79.27  | 14.7 | 286.4 | 145.3 | 19.7 | 479.7  | 224.5 | 29.4 | 987.1 | 409.5 | 56.0   | 3233 | 1097  |   |  |
| 4.80  | 36.79 | 26.57 | 9.80 | 142.7 | 80.46  | 14.8 | 289.7 | 145.8 | 19.8 | 483.9  | 225.2 | 29.6 | 998.9 | 413.5 | 56.5   | 3286 | 1112  |   |  |
| 4.90  | 38.50 | 27.53 | 9.90 | 145.2 | 81.67  | 14.9 | 293.0 | 148.2 | 19.9 | 488.6  | 227.7 | 29.8 | 1011  | 417.6 | 57.0   | 3340 | 1127  |   |  |
| 5.00  | 40.23 | 28.49 | 10.0 | 147.7 | 82.87  | 15.0 | 296.5 | 149.7 | 20.0 | 493.2  | 229.5 | 30.0 | 1023  | 421.7 | 57.5   | 3396 | 1143  |   |  |
| 5.10  | 41.99 | 29.46 | 10.1 | 150.3 | 84.08  | 15.1 | 300.0 | 151.2 | 20.2 | 501.5  | 233.0 | 30.5 | 1055  | 432.4 | 58.0   | 3452 | 1159  |   |  |
| 5.20  | 43.76 | 30.43 | 10.2 | 152.9 | 85.30  | 15.2 | 303.4 | 152.6 | 20.4 | 510.8  | 236.4 | 31.0 | 1086  | 443.2 | 58.5   | 3507 | 1175  |   |  |
| 5.30  | 45.53 | 31.40 | 10.3 | 155.4 | 86.51  | 15.3 | 306.9 | 154.1 | 20.6 | 519.9  | 240.1 | 31.5 | 1119  | 454.0 | 59.0   | 3563 | 1190  |   |  |
| 5.40  | 47.31 | 32.37 | 10.4 | 158.0 | 87.72  | 15.4 | 310.3 | 155.6 | 20.8 | 528.8  | 243.5 | 32.0 | 1151  | 464.9 | 59.5   | 3619 | 1206  |   |  |
| 5.50  | 49.09 | 33.34 | 10.5 | 160.6 | 88.95  | 15.5 | 313.9 | 157.0 | 21.0 | 538.4  | 247.1 | 32.5 | 1184  | 475.9 | 60.0   | 3676 | 1222  |   |  |
| 5.60  | 50.87 | 34.32 | 10.6 | 163.2 | 90.19  | 15.6 | 317.5 | 158.6 | 21.2 | 547.5  | 250.7 | 33.0 | 1217  | 487.0 | 60.5   | 3734 | 1238  |   |  |
| 5.70  | 52.64 | 35.29 | 10.7 | 165.8 | 91.40  | 15.7 | 321.1 | 160.1 | 21.4 | 556.7  | 254.2 | 33.5 | 1251  | 498.1 | 61.0   | 3792 | 1254  |   |  |
| 5.80  | 54.42 | 36.26 | 10.8 | 168.5 | 92.65  | 15.8 | 324.6 | 161.6 | 21.6 | 566.4  | 257.8 | 34.0 | 1286  | 509.6 | 61.5   | 3850 | 1270  |   |  |
| 5.90  | 56.20 | 37.23 | 10.9 | 171.2 | 93.92  | 15.9 | 328.3 | 163.1 | 21.8 | 575.6  | 261.5 | 34.5 | 1321  | 521.1 | 62.0   | 3908 | 1286  |   |  |
| 6.00  | 57.97 | 38.19 | 11.0 | 173.9 | 95.19  | 16.0 | 331.9 | 164.6 | 22.0 | 585.2  | 264.9 | 35.0 | 1356  | 532.5 | 62.5   | 3966 | 1303  |   |  |
| 6.10  | 59.74 | 39.17 | 11.1 | 176.6 | 96.45  | 16.1 | 335.5 | 166.1 | 22.2 | 595.0  | 268.6 | 35.5 | 1391  | 544.0 | 63.0   | 4026 | 1319  |   |  |
| 6.20  | 61.52 | 40.15 | 11.2 | 179.4 | 97.71  | 16.2 | 339.2 | 167.7 | 22.4 | 604.3  | 272.3 | 36.0 | 1427  | 555.6 | 63.5   | 4087 | 1336  |   |  |
| 6.30  | 63.32 | 41.13 | 11.3 | 182.1 | 98.97  | 16.3 | 342.9 | 169.2 | 22.6 | 614.2  | 275.8 | 36.5 | 1464  | 567.1 | 64.0   | 4147 | 1352  |   |  |
| 6.40  | 65.16 | 42.14 | 11.4 | 184.9 | 100.2  | 16.4 | 346.6 | 170.7 | 22.8 | 624.1  | 279.6 | 37.0 | 1501  | 579.3 | 64.5   | 4207 | 1369  |   |  |
| 6.50  | 67.12 | 43.18 | 11.5 | 187.6 | 101.5  | 16.5 | 350.3 | 172.3 | 23.0 | 633.6  | 283.3 | 37.5 | 1538  | 591.3 | 65.0   | 4268 | 1386  |   |  |
| 6.60  | 69.16 | 44.24 | 11.6 | 190.4 | 102.8  | 16.6 | 354.1 | 173.8 | 23.2 | 643.4  | 286.8 | 38.0 | 1575  | 603.1 | 65.5   | 4329 | 1402  |   |  |
| 6.70  | 71.29 | 45.33 | 11.7 | 193.3 | 104.1  | 16.7 | 358.0 | 175.4 | 23.4 | 653.8  | 290.5 | 38.5 | 1613  | 615.0 | 66.0   | 4392 | 1419  |   |  |
| 6.80  | 73.48 | 46.44 | 11.8 | 196.2 | 105.4  | 16.8 | 361.7 | 177.0 | 23.6 | 663.3  | 294.4 | 39.0 | 1651  | 627.1 | 66.5   | 4455 | 1436  |   |  |
| 6.90  | 75.72 | 47.51 | 11.9 | 199.0 | 106.7  | 16.9 | 365.6 | 178.6 | 23.8 | 673.7  | 297.9 | 39.5 | 1691  | 639.2 | 67.0   | 4517 | 1454  |   |  |
|   |       |       |      |       |  |      |       |       |      |  |       | 40.0 | 1730  | 651.8 | 67.5   | 4580 | 1471  |   |  |
|   |       |       |      |       |  |      |       |       |      |  |       | 40.5 | 1770  | 664.2 | 68.0   | 4645 | 1488  |   |  |
|   |       |       |      |       |  |      |       |       |      |  |       | 41.0 | 1810  | 676.6 | 68.5   | 4709 | 1506  |   |  |
|   |       |       |      |       |  |      |       |       |      |  |       | 41.5 | 1851  | 689.1 | 69.0   | 4773 | 1523  |   |  |
|   |       |       |      |       |  |      |       |       |      |  |       | 42.0 | 1892  | 701.0 | 69.5   | 4839 | 1541  |   |  |
|   |       |       |      |       |  |      |       |       |      |  |       |      |       |       | 70.0   | 4905 | 1558  |   |  |

Επειδή  $U > H$  θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (1) στην οποία με αντικατάσταση παίρνουμε τον δείκτη ιξώδους:

$$V.I. = \frac{(31,96 - 24,81)}{(31,96 - 23,81)} \cdot 100 = 0,879 \cdot 100 \Rightarrow V.I. = 88$$

Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του ιξώδους των τριών λιπαντικών που εμπλέκονται στον παραπάνω υπολογισμό φαίνεται στο σχήμα 15.4

**2.** Το ιξώδες ενός προς εξέταση λιπαντικού παίρνει τιμή 7,50 cSt στους 100°C και 47,80 cSt στους 40°C. Να υπολογιστεί ο δείκτης ιξώδους (V.I.) του λιπαντικού σύμφωνα με την μέθοδο ASTM D2270-10.

### Λύση

Ο δείκτης ιξώδους του λιπαντικού θα βρεθεί με τη μέθοδο ASTM D2270-10. Θα θέσουμε  $U = 47,80$  cSt. Για τον προσδιορισμό των  $L$  και  $H$  θα χρησιμοποιήσουμε τον πίνακα 15.1 της μεθόδου και θέτουμε ως τιμή εισόδου  $Y = 7,50$  cSt.

Έτσι  $L = 88,85$  cSt και  $H = 53,98$  cSt.

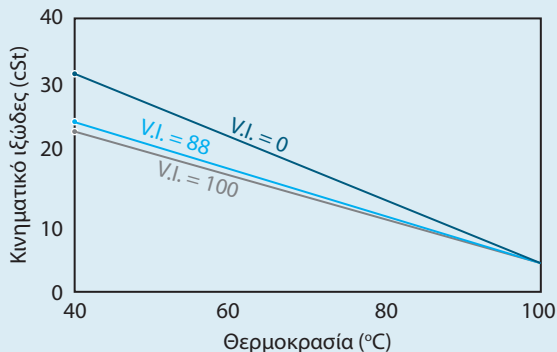
Επειδή  $U < H$  θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (2). Αφού προσδιορίσουμε την παράμετρο  $N$  θα κάνουμε την αντικατάσταση για να βρεθεί ο δείκτης ιξώδους:

$$N = \frac{\log 53,98 - \log 48,80}{\log 7,50} = \frac{0,528}{0,875} = 0,60$$

$$V.I. = \frac{(\text{antilog } 0,060) - 1}{0,00715} + 100 = \frac{1,148 - 1}{0,00715} + 100 =$$

$$= 20,7 + 1 \Rightarrow V.I. = 121$$

Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του ιξώδους των τριών λιπαντικών που εμπλέκονται στον παραπάνω



Σχ. 15.4

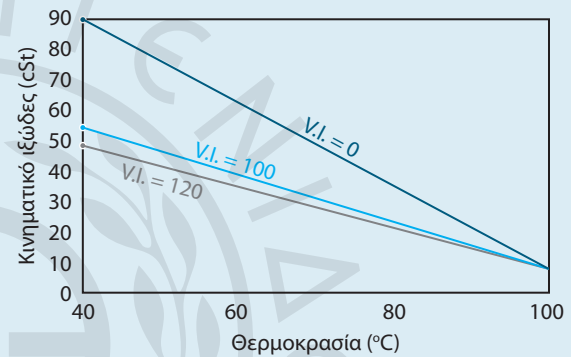
νω υπολογισμό φαίνεται στο σχήμα 15.5.

Συμπερασματικά τονίζεται ότι υψηλές τιμές δείκτη ιξώδους περιορίζουν τις ακραίες τιμές ιξώδους που αντιστοιχούν σε ορισμένη διακύμανση της θερμοκρασίας ενός λιπαντικού.

Αυτό έχει ως συνέπεια:

1) Σε χαμηλές θερμοκρασίες να μην αυξάνεται το ιξώδες σε βαθμό που να δυσχεραίνει την εκκίνηση της μηχανής και

2) σε υψηλές θερμοκρασίες το ιξώδες δεν ελαττώνεται κάτω από τα όρια εκείνα που εξασφαλίζουν τη διατήρηση της λιπαντικής μεμβράνης στους τριβείς ή τη στεγανότητα των ελατηρίων στα έμβολα.



Σχ. 15.5

### 15.6 Σημείο ροής, σημείο νέφωσης

Η μελέτη της «ψυχρής ροής» των λιπαντικών γίνεται με τη συσκευή που περιγράφηκε στην παράγραφο 12.9 για τα καύσιμα.

Κατά τη διάρκεια της ψύξης ενός λιπαντικού συναντάμε διαδοχικά τρεις θερμοκρασίες, σε κάθε μια από τις οποίες επέρχονται ορισμένες εμφανείς διαφορές στις ιδιότητές του:

1) Το **σημείο νέφωσης** ή **σημείο θόλωσης** (cloud point)  $T_c$  είναι η θερμοκρασία, στην οποία το δείγμα του λιπαντικού ψυχόμενο εμφανίζει θολερότητα. Αυτή οφείλεται στην αποβολή από τη μάζα του λιπαντικού των παραφινικών συστατικών, που στη θερμοκρασία  $T_c$  γίνονται αδιάλυτα.

2) **Σημείο ακινησίας**  $T_a$  είναι η υψηλότερη θερμοκρασία στην οποία το λιπαντικό έχει ακινητοποιηθεί κατά την ψύξη του.

Στην πράξη, μετά τον προσδιορισμό του σημείου νέφωσης, το δείγμα του λιπαντικού που είναι τοποθετημένο σε πρότυπο γυάλινο σωλήνα υποβάλλεται σε

διαδοχικές ψύξεις κατά  $3^{\circ}\text{C}$ . Σε κάθε ψύξη ο γυάλινος σωλήνας τοποθετείται σε οριζόντια θέση για 5 s, και εξετάζεται κατά πόσο η ελεύθερη επιφάνειά του λιπαντικού παρουσιάζει κύρτωση. Στη θερμοκρασία που δεν θα παρατηρηθεί η κύρτωση, ορίζουμε το σημείο ακινησίας.

3) Το **σημείο ροής**  $T_p$  (pour point) συμβατικά καθορίζεται  $3^{\circ}\text{C}$  πάνω από το σημείο ακινησίας και είναι ουσιαστικά η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία μπορεί να ρέει ένα λιπαντικό.

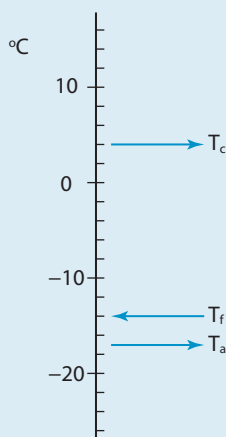


### Παράδειγμα

Για ένα λιπαντικό με υψηλή συγκέντρωση παραφινικών συστατικών μετρήθηκαν πειραματικά (με τη συσκευή που περιγράφηκε στην παραγρ. 15.9) οι παρακάτω θερμοκρασίες:

- α) Σημείο νεφώσης  $T_c = 4^{\circ}\text{C}$
- β) Σημείο ακινησίας  $T_a = -17^{\circ}\text{C}$
- γ) Σημείο ροής  $T_f = T_a + 3 = -17 + 3 = -14^{\circ}\text{C}$ .

Οι θερμοκρασίες αυτές παρουσιάζονται στο σχήμα 15.6. Η σημασία του σημείου νέφωσης έγκειται στις περιπτώσεις εκείνες κατά τις οποίες το λιπαντικό πρέπει να διατηρεί τη διαύγειά του σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπως είναι το πέρασμά του από φίλτρα, οπότε η δημιουργία κρυστάλλων από παραφίνη μπορεί να προκαλέσει απόφραξη των φίλτρων.



**Σχ. 15.6**  
Κρίσιμα σημεία κατά τη ψύξη ενός λιπαντικού

Πολύ μεγαλύτερη σημασία για τα λιπαντικά έχει το σημείο ροής γιατί από αυτό εξαρτάται η αντλητικότητα τους στο δίκτυο λίπανσης σε χαμηλές θερμοκρασίες, που μπορεί να ενσκήψουν στην πράξη (πέραςμα του πλοίου από ψυχρές ζώνες). Η τιμή του σημείου ροής εξαρτάται κυρίως από το είδος των υδρογοναν-

θράκων από τους οποίους αποτελείται το λιπαντικό. Οι υδρογονάνθρακες με ευθεία άλυσσο (παραφινικοί) έχουν γενικά υψηλό σημείο ροής, που μπορεί να μειωθεί με την κατεργασία της αποκήρωσης ή αποπαραφίνωσης (βλ. § 14.4.2), δηλαδή με την απομάκρυνση των παραφινικών συστατικών, στα οποία ακριβώς οφείλεται η υψηλή τιμή του σημείου ροής. Μετά είναι δυνατό να προστεθούν ειδικά πρόσθετα, γνωστά ως **ταπεινωτικά σημείου ροής** (pour point depressants) για τα οποία γίνεται λόγος στην παράγραφο 14.4.5. Στην πράξη τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με συνδυασμό αποκήρωσης και χημικών πρόσθετων, των οποίων η αναλογία δεν υπερβαίνει το 1%.

Τα πρόσθετα για την ταπείνωση του σημείου ροής ενεργούν στην επιφάνεια των παραφινικών κρυστάλλων, όπου και σχηματίζουν ένα είδος περιβλήματος που εμποδίζει τη συνένωσή τους και συνεπώς την αποβολή τους κατά τη ψύξη. Οι κρύσταλλοι της παραφίνης παραμένουν στο λιπαντικό σε λεπτή διασπορά μέχρι θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από εκείνες που αντιστοιχούν σε λιπαντικό χωρίς τέτοια πρόσθετα.

### 15.7 Αντοχή στην οξείδωση

Παρά την αξιόλογη χημική σταθερότητα, την οποία τα ορυκτέλαια οφείλουν στη μοριακή τους δομή, οι συνθήκες κάτω από τις οποίες χρησιμοποιούνται ευνοούν μια προοδευτική οξείδωση, που προκαλεί αλλοίωση των μορίων τους. Από την αλλοίωση αυτή παράγονται ανεπιθύμητα προϊόντα, όπως οργανικά οξέα και εστέρες, των οποίων η παρουσία στο λιπαντικό μπορεί να έχει τα εξής δυσάρεστα για τη μηχανή επακόλουθα:

- 1) Διαβρωτικές διεργασίες, λόγω της οξύτητας που συνήθως εμφανίζουν και
- 2) Σχηματισμός λάσπης, λόγω πολυμερισμού των οξυγονούχων ενώσεων με αποτέλεσμα την αύξηση του ιξώδους, κάτι που δυσχεραίνει τη λίπανση.

Η αντοχή στην οξείδωση ελέγχεται εργαστηριακά, υποβάλλοντας δείγμα του λιπαντικού σε καταπόνηση, κάτω από συνθήκες όμοιες μ' αυτές που συναντά στην πράξη κατά τη λειτουργία του. Οι βασικοί παράγοντες στους οποίους οφείλεται η οξείδωση των ορυκτελαίων κατά τη χρήση τους είναι:

- 1) Υψηλή θερμοκρασία και μάλιστα οι συνεχείς διακυμάνσεις της.
- 2) Η επαφή με το οξυγόνο του αέρα.
- 3) Η επαφή με συστατικά των καυσαερίων, όπως οξείδια του θείου.



4) Η επαφή με μέταλλα, που δρουν καταλυτικά στην οξειδωση (επιτάχυνση της χημικής αντίδρασης).

Η δοκιμή αντοχής στην οξειδωση γίνεται ακριβώς κάτω από την επίδραση των παραπάνω παραγόντων με συνθήκες που με αυστηρότητα καθορίζονται από τη μέθοδο που εφαρμόζεται για την εκτέλεση της δοκιμής.

Σε γενικές γραμμές η δοκιμή αντοχής στην οξείδωση γίνεται ως εξής:

Το δείγμα του λαδιού παραμένει σε επαφή με οξυγόνο σε σταθερή θερμοκρασία για ορισμένο χρόνο. Στο δοχείο που περιέχει το δείγμα τοποθετούνται μεταλλικά σύρματα, συνήθως από χαλκό και σίδηρο, που ενεργούν σαν καταλύτες, με τρόπο ανάλογο μ' αυτόν που προκαλείται από τη δράση των μετάλλων της μηχανής. Μετά από τον προκαθορισμένο χρόνο που διαρκεί η δοκιμή, ο έλεγχος του βαθμού οξειδώσεως γίνεται με συνδυασμό δοκιμών όπως:

- 1) Του αριθμού εξουδετέρωσης,
- 2) του σχηματισμού λάσπης,
- 3) του ιξώδους και
- 4) του ανθρακούχου υπολείμματος.

Έτσι:

1) Η αύξηση της οξύτητας του λιπαντικού, που μετρείται με τον αριθμό εξουδετέρωσης (βλ. § 15.8), για μια δοκιμή 1.000 ωρών δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 2 mg KOH ανά γραμμάριο δείγματος και

2) ο σχηματισμός της λάσπης που οφείλεται στα προϊόντα οξείδωσης, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 5 mg ανά 10 g δείγματος, για δοκιμή διάρκειας 2,5 h.

### 15.8 Αριθμός εξουδετέρωσης

Ο αριθμός εξουδετέρωσης αντιστοιχεί στα χιλιοστόγραμμα (mg) καυστικού καλίου KOH, που απαιτούνται για την εξουδετέρωση των ελεύθερων οξέων που περιέχονται σε 1 g δείγματος του ορυκτέλαιου. Επομένως ο αριθμός εξουδετέρωσης χαρακτηρίζει την **οξύτητα** του λιπαντικού, που οφείλεται στην παρουσία ή στον προοδευτικό σχηματισμό οξέων. Γι' αυτό, ο αριθμός εξουδετέρωσης έχει σημασία στις εξής κυρίως περιπτώσεις:

1) Στα καινούργια λιπαντικά, που δεν περιέχουν χημικά πρόσθετα. Σ' αυτά η τιμή του αριθμού εξουδετέρωσης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1.

2) Στα μεταχειρισμένα λιπαντικά. Η παρακολούθηση της τιμής του κατά τις περιοδικές αναλύσεις, μπορεί να αποκαλύψει τυχόν αλλοιώσεις που τα λιπαντικά αυτά παθαίνουν κατά τη χρήση τους. Από ένα όριο

και πάνω τα λιπαντικά πρέπει να αντικαθίστανται.

3) Σε ορισμένα λιπαντικά ο έλεγχος της αντοχής του λιπαντικού στην οξειδωση γίνεται με βάση την αύξηση του αριθμού εξουδετέρωσης μετά από 1.000 h επαφής με οξυγόνο κάτω από ειδικές συνθήκες (βλ. § 15.7). Στη διάρκεια των 1.000 h ο αριθμός εξουδετέρωσης δεν πρέπει να παρουσιάζει αύξηση μεγαλύτερη από 2 mg KOH.

Σήμερα, όμως, τα περισσότερα λιπαντικά ενισχύονται με αλκαλικά πρόσθετα, που ως κύριο σκοπό έχουν την εξουδετέρωση των όξινων συστατικών των καυσαερίων, όπως SO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub>, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν επικίνδυνη διάβρωση στα μεταλλικά μέρη της μηχανής με τα οποία έρχονται σε επαφή. Έτσι, τα περισσότερα λιπαντικά όχι μόνο δεν έχουν οξύτητα, αλλά αντιθέτως έχουν μεγάλη αλκαλικότητα, που είναι γνωστή ως αριθμός TBN (total base number), δηλαδή **ολικός αριθμός αλκαλικότητας**. Ο ολικός αριθμός αλκαλικότητας (TBN) δείχνει την ποσότητα οξέων, εκφρασμένη σε ισοδύναμη ποσότητα (mg) KOH, που απαιτούνται για να εξουδετερώσουν τα αλκαλικά συστατικά που περιέχονται σε 1 g δείγματος του λιπαντικού.

Η μέτρηση του αριθμού TBN στα χημικά εργαστήρια γίνεται με **τιτλοδότηση** (titration), στην οποία εκτελείται αναλυτικά η αντίδραση εξουδετέρωσης των αλκαλικών συστατικών του λιπαντικού με ασθενές οξύ, το οποίο προστίθεται στο διάλυμα με ακρίβεια. Ειδικός αισθητήρας (ηλεκτροχημικό κελί) χρησιμοποιείται για τον ακριβή προσδιορισμό του σημείου εξουδετέρωσης.

Τα χημικά πρόσθετα, στα οποία οφείλεται η υψηλή αλκαλικότητα των λιπαντικών, είναι σύμπλοκες χημικές ενώσεις που έχουν και αντιρρυπαντικές ιδιότητες. Τα πρόσθετα αυτά περιέχουν υψηλή αναλογία αλάτων ασθενών οξέων με ισχυρές βάσεις, όπως το ανθρακικό ασβέστιο CaCO<sub>3</sub>. Τα άλατα αυτά αντιδρούν με τα όξινα συστατικά των καυσαερίων, τα οποία εξουδετερώνουν σχηματίζοντας ακίνδυνα άλατα, όπως θειικό ασβέστιο CaSO<sub>4</sub>. Τα παραπάνω άλατα, επειδή είναι συνήθως αδιάλυτα στα ορυκτέλαια, συνδυάζονται με συστατικά των πρόσθετων, που αποτελούνται από φαινολικά ή σουλφονικά άλατα ή αλκυλοφαινολοσουλφίδια, που είναι διαλυτά στα λιπαντικά και στα οποία περιέχονται σε μορφή λεπτών κolloειδών αιωρημάτων.

### 15.9 Εξανθράκωμα

Όπως και στα καύσιμα ο προσδιορισμός του εξαν-

θρακώματος γίνεται καίγοντας ορισμένη ποσότητα δείγματος κάτω από ορισμένες συνθήκες, που τις χαρακτηρίζει απουσία περίσσειας αέρα. Η τιμή του εξανθρακώματος ανάγεται σε επί % του αρχικού δείγματος και φανερώνει την τάση του λιπαντικού να σχηματίζει ανθρακούχα κατάλοιπα, όταν βρεθεί κάτω από παρόμοιες συνθήκες μέσα στη μηχανή.

Οι μέθοδοι μέτρησης του εξανθρακώματος κατά Conradson και κατά Ramsbottom, περιγράφονται στην παράγραφο 12.11.

Η τιμή του εξανθρακώματος στα περισσότερα λιπαντικά MEK δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,3%, ενώ για τα κυλινδρόλαια μπορεί να φθάσει το 3%.

Η τιμή του εξανθρακώματος ενός λιπαντικού εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

1) Από τον **τρόπο επεξεργασίας**. Η εκχύλιση με διάλυτη, που γίνεται κατά τον εξευγενισμό των λιπαντικών (βλ. § 14.4.3) δίνει προϊόντα με χαμηλό εξανθράκωμα.

2) Από το **ιξώδες**. Λιπαντικά με μικρό ιξώδες έχουν και χαμηλή τιμή εξανθρακώματος

3) Από το **είδος των υδρογονανθράκων**. Λιπαντικά ναφθενικής βάσης έχουν λιγότερο εξανθράκωμα από λιπαντικά παραφινικής βάσης.

Το εξανθράκωμα που ένα λιπαντικό μπορεί να αποβάλλει στη μηχανή κατά τη λειτουργία του, εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως:

- 1) Η ποιότητα του καυσίμου που χρησιμοποιείται,
- 2) η αναλογία καυσίμου/αέρα και
- 3) η παρουσία ξένων προσμείξεων.

Η τιμή του εξανθρακώματος ενός λιπαντικού παρέχει επίσης ενδείξεις και για τον βαθμό ρύπανσης ή αλλοίωσης που μπορεί να έχει υποστεί κατά την αποθήκευση ή τη χρήση του. Μια ασυνήθιστη αύξηση του εξανθρακώματος, που αποκαλύπτεται κατά τον περιοδικό έλεγχο, μπορεί να οφείλεται σε ρύπανση, σε προϊόντα οξείδωσης ή σε εξωτερικούς παράγοντες, όπως σκόνες και ρινίσματα.

### 15.10 Συντελεστής αντοχής (work factor)

Η δοκιμή αυτή παρέχει ενδείξεις για την ικανότητα ενός λιπαντικού να αντέχει στην αλλοίωση, όταν καταπονείται κάτω από ορισμένες συνθήκες. Η δοκιμή γίνεται στον τριβέα μιας πρότυπης μηχανής, της οποίας οι συνθήκες λειτουργίας καθορίζονται με ακρίβεια από την αντίστοιχη προδιαγραφή, και διαρκεί 100 h.

Μέτρο της αντοχής του λιπαντικού αποτελεί η αλλοίωση που έχει υποστεί, συγκρίνοντας τις τιμές ορισμένων χαρακτηριστικών πριν και μετά τη δοκιμή και

κυρίως το ιξώδες, το εξανθράκωμα και τον αριθμό εξουδετέρωσης.

Από τη διαφορά των τιμών των χαρακτηριστικών αυτών, πριν και μετά τη δοκιμή, υπολογίζεται ο συντελεστής αντοχής από ειδικούς πίνακες. Η τιμή του συντελεστή είναι 1, όταν η διαφορά αυτή είναι μηδέν, που σημαίνει ότι το λιπαντικό δεν έπαθε καμιά αλλοίωση κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Όσο μικρότερη από τη μονάδα είναι η τιμή του συντελεστή αντοχής, τόσο μικρότερη σταθερότητα θα έχει το λιπαντικό κατά τη χρήση του.

### 15.11 Πτητικότητα

Η πτητικότητα ενός λιπαντικού εκφράζει την τάση που έχει να σχηματίζει ατμούς σε ορισμένες θερμοκρασίες, τις οποίες συναντά μέσα στη μηχανή. Μέτρο της πτητικότητας είναι το λεγόμενο **σημείο ανάφλεξης** (flash point), δηλαδή η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία το θερμαινόμενο δείγμα του λιπαντικού σχηματίζει αρκετούς ατμούς, ώστε να αναφλέγεται στιγμιαία κατά την προσέγγιση μικρής φλόγας κάτω από ορισμένες συνθήκες. Ανάλογη σημασία έχει και το **σημείο καύσης**, δηλαδή η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία οι παραγόμενοι ατμοί στην επιφάνεια του θερμαινόμενου δείγματος είναι αρκετοί, ώστε μετά την ανάφλεξη, η καύση να συνεχίζεται επί 5 sec τουλάχιστον. Η μέτρηση του σημείου ανάφλεξης γίνεται με τρόπο ανάλογο μ' αυτόν που ισχύει για τα καύσιμα, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 12.6. Έχουμε και εδώ σημείο ανάφλεξης ανοικτού δοχείου (Σ.Α.Α.Δ.) και σημείο ανάφλεξης κλειστού δοχείου (Σ.Α.Κ.Δ.). Τα αποτελέσματα σε ανοιχτό δοχείο είναι συνήθως κατά 20-40°C υψηλότερα από αυτά που προκύπτουν με τη συσκευή Pensky-Martens σε κλειστό δοχείο.

Ο προσδιορισμός των σημείων ανάφλεξης και καύσης για καινούργιο λιπαντικό δεν έχει ιδιαίτερη σημασία. Αποτελεί ένδειξη της προέλευσής του ή του τύπου των υδρογονανθράκων που το αποτελούν. Κατά κανόνα ορυκτέλαια ναφθενικής βάσης έχουν χαμηλότερα σημεία ανάφλεξης και καύσης, σε σύγκριση με ορυκτέλαια με ίδιο ιξώδες αλλά παραφινικής βάσης. Στην περίπτωση αυτή το σημείο ανάφλεξης χρησιμεύει ως στοιχείο ταυτότητας του λιπαντικού (πίν. 15.2).

Ιδιαίτερη σημασία έχει η μέτρηση του σημείου ανάφλεξης για τα μεταχειρισμένα λιπαντικά κατά τον περιοδικό έλεγχο, στον οποίο υποβάλλονται μετά από ορισμένες ώρες λειτουργίας. Η μέτρηση αυτή γίνεται πάντοτε σε συσχέτισμό με το αμεταχειριστο λιπαντι-

Πίνακας 15.2

|    | Είδος λιπαντικού  | Σημείο ανάφλεξης σε °C |         |
|----|-------------------|------------------------|---------|
|    |                   | SAE 10 W               | SAE 50  |
| 1. | Ναφθενικής βάσης  | 160-205                | 200-230 |
| 2. | Παραφινικής βάσης | 190-230                | 230-265 |

κό, από το οποίο προέρχεται το εξεταζόμενο δείγμα. Μείωση της τιμής του σημείου ανάφλεξης κάτω από ορισμένα όρια, μαρτυρεί την παρουσία καυσίμου στο λιπαντικό, που συνήθως οφείλεται σε διαρροή.

Μια τέτοια ένδειξη επιβεβαιώνεται με άμεση μέτρηση του καυσίμου, που περιέχει το λιπαντικό και που δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5%. Αν αυτό συμβαίνει τότε υπάρχει σοβαρός κίνδυνος έκρηξης στο στροφαλοθάλαμο, όταν δημιουργηθούν και οι άλλες προϋποθέσεις για ένα τέτοιο ενδεχόμενο, όπως υψηλή θερμοκρασία, σπινθήρας και κατάλληλη αναλογία αέρα.

### 15.12 Βαθμός καθαρότητας

Οι ξένες προσμείξεις που μπορεί να περιέχει το λιπαντικό έχουν άμεση επίδραση στην εκπλήρωση της αποστολής του. Επίσης οι ξένες προσμείξεις επιταχύνουν την οξειδωση του λιπαντικού και έτσι μειώνουν τη διάρκεια ζωής του.

Οι ουσίες αυτές μπορεί να είναι νερό, ανόργανα συστατικά ή ασφαλτικά κατάλοιπα.

Ο βαθμός καθαρότητας ενός λιπαντικού μπορεί να ελεγχθεί με τους εξής τρόπους:

#### 1) Μακροσκοπικά

Δείγμα του λιπαντικού σε γυάλινο κυλινδρικό δοχείο εξετάζεται στο διερχόμενο φως. Έτσι μπορεί να αποκαλυφθεί η παρουσία ξένων συστατικών που αιωρούνται στο λιπαντικό.

#### 2) Με φυγοκέντρωση

Δείγμα 10 ml του λιπαντικού αραιώνεται με κατάλληλο διαλύτη και φυγοκεντρείται για 10 min με ταχύτητα περιστροφής 1.750 rpm. Οι ξένες ύλες που περιέχει, συγκεντρώνονται λόγω διαφοράς πυκνότητας στον πυθμένα των σωλήνων φυγοκέντρωσης, που είναι κατάλληλα βαθμολογημένοι.

Έτσι, με απλή ανάγνωση βρίσκεται η περιεκτικότητα των ξένων συστατικών, που περιέχει το δείγμα, σε μονάδες όγκου. Ο όγκος αυτός των ακαθαρσιών και προσμείξεων εκφράζεται σε % κατ' όγκο του λιπαντικού και αναφέρεται ως **αριθμός κατακρήμνισης** (precipitation number). Η τιμή του στα καινούργια λιπαντι-

κά πρέπει να είναι μηδέν, ενώ στα μεταχειρισμένα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1.

#### 3) Προσδιορισμός του νερού

Το νερό που περιέχει ένα λιπαντικό προσδιορίζεται συνήθως με απόσταξη, στην οποία υποβάλλεται, αφού προηγουμένως αραιωθεί με κατάλληλο διαλύτη. Τα καινούργια λιπαντέλαια δεν πρέπει να περιέχουν καθόλου νερό, ενώ στα μεταχειρισμένα επιτρέπεται κάποια μικρή περιεκτικότητα. Το νερό που απομονώνεται από το λιπαντικό, υποβάλλεται σε παραπέρα εργαστηριακό έλεγχο για να διαπιστωθεί αν περιέχει άλλα συστατικά και κυρίως χλωριούχο νάτριο NaCl. Η παρουσία χλωριούχου νατρίου στο νερό που περιέχει ένα λιπαντικό, δείχνει ότι αυτό είναι θαλασσινό και προέρχεται απ' το δίκτυο ψύξης. Έτσι επισημαίνεται πιθανή διαρροή στο σύστημα αυτό. Το χλωριούχο νάτριο είναι διαβρωτικό για τα έδρανα. Χλωριούχο νάτριο μπορεί να περιέχει ένα λιπαντικό MEK και χωρίς να περιέχει καθόλου νερό, γιατί το νερό της διαρροής μπορεί να έχει εξατμισθεί στις συνθήκες λειτουργίας του λαδιού.

#### 4) Τέφρα

Ο βαθμός καθαρότητας ενός λιπαντικού ελέγχεται προσδιορίζοντας την τέφρα που αφήνει μετά από την τέλεια καύση ορισμένης ποσότητας δείγματος. Ασυνήθιστη αύξηση της τιμής της τέφρας ενός λιπαντικού, παρέχει ένδειξη μόλυνσης με ανόργανα συστατικά, όπως ρινίσματα, σκόνη και άμμος, των οποίων η πηγή πρέπει να εντοπίζεται και να εξουδετερώνεται από το προσωπικό της μηχανής.

### 15.13 Δοκιμή απογαλάκτωσης

Με τη δοκιμή αυτή ελέγχεται η ταχύτητα με την οποία ένα λιπαντέλαιο αποχωρίζεται από το νερό με το οποίο προηγουμένως είχε αναμειχθεί σχηματίζοντας γαλάκτωμα. Η δοκιμή αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για τα τουρμπινέλαια, τα οποία συχνά σχηματίζουν γαλάκτωμα με τον ατμό ή το συμπύκνωμα με το οποίο έρχονται σε επαφή. Στην περίπτωση αυτή ενδιαφέρει η ταχύτητα με την οποία μπορεί να γίνει ο αποχωρισμός του νερού.

Η δοκιμή απογαλάκτωσης περιλαμβάνει δύο στάδια:

#### 1) Σχηματισμός γαλακτώματος.

Το δείγμα του λιπαντικού αναδεύεται επί 10 min στους 55°C σε γυάλινο κύλινδρο, με ίσο όγκο νερού, οπότε σχηματίζεται γαλάκτωμα.

#### 2) Διαχωρισμός του γαλακτώματος.

Το γαλάκτωμα που έχει σχηματισθεί αφήνεται σε ηρεμία ώσπου να διαχωριστούν οι δύο στιβάδες: του

νερού και του λιπαντικού. Ο διαχωρισμός αυτός, που οφείλεται στη διάσπαση του γαλακτώματος, λέγεται **απογαλάκτωση**. Ο χρόνος για την πλήρη απογαλάκτωση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 30 min.

### 15.14 Μηχανικές δοκιμασίες

Τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών που εξετάζονται στις προηγούμενες παραγράφους, δίνουν πλήρη εικόνα για την ποιότητα του λιπαντικού ως προς:

- 1) Την πρώτη ύλη που έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τους.
- 2) Την επεξεργασία που έχει υποστεί.
- 3) Τα πρόσθετα που έχουν χρησιμοποιηθεί.
- 4) Την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το λιπαντικό, όταν πρόκειται για μεταχειρισμένο.

Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών εξασφαλίζουν την ποιότητα του λιπαντικού **μόνο κατά τη στιγμή της αρχικής του χρήσης**. Δεν δίνουν καμιά πληροφορία για τη συμπεριφορά του στην πράξη, πέρα από λίγες ώρες μετά την έναρξη της χρήσης του για μια συγκεκριμένη περίπτωση λίπανσης.

Το κενό αυτό στον ποιοτικό έλεγχο των λιπαντικών καλύπτουν οι λεγόμενες **μηχανικές δοκιμασίες**, στις οποίες τα λιπαντικά υποβάλλονται παράλληλα με τις άλλες δοκιμές. Οι μηχανικές δοκιμασίες στηρίζονται στη χρησιμοποίηση του λιπαντικού σε πρότυπη μηχανή για ορισμένο χρόνο και με αυστηρά προκαθορισμένες συνθήκες.

Στο τέλος της δοκιμής ελέγχονται προσεκτικά τα μέρη της μηχανής που θα μπορούσαν να έχουν υποστεί καταστρεπτική επίδραση από ακατάλληλο λιπαντικό. Τα μέρη αυτά είναι: τα ελατήρια, τα έδρανα αξόνων, τα χιτώνια, οι βαλβίδες και τα έμβολα.

Μετά τη δοκιμή συγκρίνεται το βάρος και η εμφάνισή τους γενικά με αυτήν που είχαν πριν από τη δοκιμή. Από τα αποτελέσματα της σύγκρισης βαθμολογείται η ποιότητα του λιπαντικού, πράγμα για το οποίο χρειάζεται αρκετή πείρα.

Από τα συνθετέτερα είδη μηχανών που χρησιμοποιούνται για τις μηχανικές δοκιμασίες, αναφέρονται δύο, που προβλέπονται από την προδιαγραφή MIL-L-9000 και αφορούν στα λιπαντέλαια μηχανών diesel.

#### 1) **Μηχανή Caterpillar** (1-G).

Λειτουργεί με πετρέλαιο που περιέχει θείο 1%. Η δοκιμή διαρκεί 480 ώρες και αποβλέπει στην εξακρίβωση της ικανότητας του λιπαντικού να προλαβαίνει τη διάβρωση, τις μηχανικές φθορές και τη συσσώρευση καταλοίπων.

Η θερμοκρασία του λιπαντικού κατά τη διάρκεια

της δοκιμής διατηρείται στους 63°C.

#### 2) **Μηχανή General Motors** (GM-71).

Η δοκιμή που γίνεται με τη μηχανή GM-71 διαρκεί 300 ώρες και αποβλέπει στην εκτίμηση της συμπεριφοράς λιπαντικού που ρυπαίνεται κατά τη χρήση του με θαλασσινό νερό. Κατά τη δοκιμή η θερμοκρασία του λιπαντικού διατηρείται σε σχετικά υψηλά επίπεδα (γύρω στους 120°C), που ευνοούν την επιτάχυνση της οξείδωσης. Η μηχανή τροφοδοτείται με πετρέλαιο που περιέχει θείο μέχρι 1%.

### 15.15 Δοκιμές που μπορούν να γίνουν στο πλοίο

Οι δοκιμές των λιπαντικών που περιγράφονται στις προηγούμενες παραγράφους γίνονται συνήθως σε ειδικά εργαστήρια, που διαθέτουν τον απαιτούμενο εργαστηριακό εξοπλισμό και ειδικευμένο προσωπικό. Αρκετά πλοία όμως, είναι εφοδιασμένα με στοιχειώδη εργαστηριακά μέσα, με τα οποία ο μηχανικός πρέπει να είναι σε θέση να εκτελεί ορισμένες βασικές μετρήσεις και δοκιμές.

Ειδικότερα οι δοκιμές στο πλοίο γίνονται:

1) Όταν υπάρχει άμεση ανάγκη για πρόχειρη, έστω, ανάλυση, που προκύπτει ύστερα από κάποια ανωμαλία της μηχανής, όπως είναι η διαρροή καυσίμου ή νερού.

2) Μετά από τη συμπλήρωση του προκαθορισμένου χρόνου για ανάλυση και δεν προβλέπεται προσέγγιση σε λιμάνι με εργαστηριακές ευκολίες για την κανονική ανάλυση του λιπαντικού.

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός, που απαιτείται για τις δοκιμές της κατηγορίας αυτής, είναι απλός και συχνά βρίσκεται σε μεταλλικά κιβώτια μικρών διαστάσεων, που αποτελούν το **πρόχειρο φορητό εργαστήριο** του πλοίου, τα λεγόμενα **KIT**.

Οι σπουδαιότερες από τις εξετάσεις που μπορεί ο μηχανικός να εκτελέσει με το πρόχειρο φορητό εργαστήριο είναι:

#### 1) **Μακροσκοπική εξέταση.**

Δείγμα του λιπαντικού τοποθετείται σε γυάλινο δοκιμαστικό σωλήνα και εξετάζεται προσεκτικά κάτω από διερχόμενο φως. Με τον τρόπο αυτό αναζητείται η παρουσία ξένων επιβλαβών προσμείξεων, όπως νερό, σκόνες, μεταλλικά ρινίσματα και κατάλοιπα.

#### 2) **Αλκαλικότητα.**

Μικρή ποσότητα του λιπαντικού τοποθετείται σε δοκιμαστικό σωλήνα και αναμειγνύεται με διπλάσια ποσότητα νερού που περιέχει δύο σταγόνες δείκτη **κυανού βρωμοθυμόλης**, η οποία έχει την ιδιότητα να δίνει κίτρινο χρώμα όταν στο λιπαντικό υπάρχουν οξέα.

Ο σωλήνας θερμαίνεται ελαφρά και αναταράσσεται το περιεχόμενό του, οπότε οι βάσεις που περιέχονται στο λιπαντικό, εκχυλίζονται και μεταφέρονται στην υδάτινη στιβάδα. Αν η στιβάδα αυτή χρωματισθεί κίτρινη, το λιπαντικό έχει χάσει την αλκαλικότητά του και πρέπει αμέσως να αντικατασταθεί. Αν το λιπαντικό εξακολουθεί να είναι αλκαλικό, από τα πρόσθετα που περιέχει, η υδάτινη στιβάδα παίρνει χρώμα μπλε.

### 3) Νερό.

Η παρουσία του ανιχνεύεται με πολλούς τρόπους, από τους οποίους αναφέρονται οι εξής:

α) Με ειδικές χάρτινες λωρίδες που έχουν εμποτισθεί με κατάλληλο δείκτη, δηλαδή με ουσία που αλλάζει χρώμα όταν έλθει σε επαφή με νερό.

β) Με θέρμανση δείγματος λιπαντικού σε δοκιμαστικό σωλήνα, οπότε αν περιέχει νερό, αυτό αποχωρίζεται και κατακάθεται στον πυθμένα, όταν βέβαια η ποσότητά του είναι αρκετή.

γ) Με εμβάπτιση στο λιπαντικό λωρίδας απορροφητικού χαρτιού, η οποία μετά καίγεται. Αν υπάρχει νερό η καύση γίνεται με μικρούς κρότους (τσιτσιρίσματα). Η μέθοδος αυτή δεν είναι πολύ αξιόπιστη.

δ) Με προσθήκη μικρής ποσότητας ανθρακασβεστίου σε δείγμα του λιπαντικού μέσα σε δοκιμαστικό σωλήνα. Αν υπάρχει νερό παράγεται ασετυλίνη, που αναγνωρίζεται από τη χαρακτηριστική οσμή της. Διευκρινίζεται πάντως ότι η οσμή αυτή δεν προέρχεται από την ασετυλίνη, που είναι ένα άοσμο αέριο, αλλά από τις προσμείξεις που το ανθρακασβέστιο περιέχει.

### 4) Ιξώδες.

Για τη μέτρησή του χρησιμοποιούνται απλά ιξωδόμετρα, γνωστά με το όνομα **Visgauge**. Είναι γυάλινοι σωλήνες, στους οποίους τοποθετείται το εξεταζόμενο δείγμα, μέσα στο οποίο ρίχνεται μεταλλική σφαίρα. Ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει η σφαίρα στον πυθμένα του σωλήνα αποτελεί μέτρο της τιμής ιξώ-

δους του εξεταζόμενου δείγματος. Ο χρόνος αυτός συγκρίνεται προς τον αντίστοιχο χρόνο λιπαντικών με γνωστό ιξώδες.

### 5) Καύσιμο.

Η παρουσία καυσίμου στα λιπαντέλαια έχει ως άμεση συνέπεια την ελάττωση της τιμής του ιξώδους του. Επομένως η ανίχνευση του καυσίμου και η κατά προσέγγιση ποσοτική εκτίμησή του, γίνεται συγκρίνοντας το ιξώδες του δείγματος που δοκιμάζεται προς το ιξώδες δείγματος από το ίδιο λιπαντικό, που περιέχει γνωστή αναλογία καυσίμου.

Η σύγκριση γίνεται ως εξής: Με μια ποσότητα αμεταχείριστου λιπαντικού, από το οποίο προέρχεται το εξεταζόμενο δείγμα, σχηματίζονται μια σειρά από 5 μείγματα με πετρέλαιο περιεκτικότητας 2, 4, 6, 8 και 10%. Μαζί με το δείγμα χωρίς καύσιμο έχουμε μια σειρά 6 δειγμάτων, που φέρουν τις ενδείξεις 0, 2, 4, 6, 8 και 10, που αντιστοιχούν στην περιεκτικότητα διαλυμένου καυσίμου. Σε μια καθαρή γυάλινη πλάκα, που στηρίζεται με κλίση 45° περίπου, στάζουμε στην ίδια γραμμή από μια σταγόνα από το εξεταζόμενο δείγμα και από τα 6 μείγματα, που περιέχουν τις γνωστές αναλογίες καυσίμου. Μετά ορισμένο χρόνο συγκρίνονται οι αποστάσεις που διανύουν στη γυάλινη πλάκα οι σταγόνες των δειγμάτων. Η περιεκτικότητα σε καύσιμο του εξεταζόμενου δείγματος θα είναι αυτή που αντιστοιχεί στο πρότυπο δείγμα, που διάνυσε στον ίδιο χρόνο την ίδια απόσταση με το υπό δοκιμή λιπαντέλαιο.

Ως μέτρο σύγκρισης του ιξώδους, και απ' αυτό της περιεκτικότητας σε καύσιμο, μπορεί επίσης να ληφθεί ο χρόνος ροής από την οπή μεταλλικού δοχείου χωρητικότητας 25 ml σχήματος δακτυλήθρας, η οποία αποτελεί ένα υποτυπώδες ιξωδόμετρο.

**ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ  
ΔΕΛΤΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

ΠΛΟΙΟ .....X  
 ΠΛΟΙΟΚΤΗΤΗΣ .....Z  
 ΤΥΠΟΣ ΛΙΠΑΝΤΙΚΟΥ .....Υ  
 ΜΗΝΑΣ ΠΑΡΑΛΑΒΗΣ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ .....Durban  
 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ .....Κύρια Μηχανή  
 (Diesel)  
 ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΛΑΒΗΣ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ .....15-10-2020

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

Ιξώδες κατά Redwood I στους 40°C (cSt) ..... 65  
 Νερό, % κατ' όγκο ..... 0,30  
 Αλάτι, % κατά βάρος ..... 0,11  
 Αδιάλυτα σε κανονικό επάνιο (% κατά βάρος) ..... 1,04  
 Ολικός αριθμός οξέων (mg KOH/γραμ. λιπαντικού) ..... 0,85  
 Αριθμός ισχυρών οξέων (mg KOH/γραμ. λιπαντικού) ..... < 0,01  
 Σημείο ανάφλεξης (κλειστού δοχείου) °C ..... 230

**Παρατηρήσεις**

Συνιστάται πλύση του λιπαντικού με θερμό νερό για τη μείωση της υψηλής περιεκτικότητας σε αλάτι με την οποία αναμένεται και βελτίωση του ολικού αριθμού οξέων. Αναμένουμε αποστολή νέου δείγματος για εξέταση.

Για την εταιρεία .....

(Υπογραφή)

**MARINE LUBRICATION SERVICE  
TECHNICAL REPORT**

VESSEL .....X  
 OWNERS .....Z  
 GRADE .....Υ  
 PORT HANDLED IN .....Durban  
 DATE .....15-10-2020  
 POSITION FROM WHICH SAMPLE(S) DRAWN .....Main Engine

**ANALYSIS RESULTS**

Viscosity at 40°C (cSt) ..... 65  
 Water (% Vol) ..... 0,30  
 Salt (% Wt) ..... 0,11  
 Sediment Insol. in n-Heptane (% Wt) ..... 1,04  
 Total acid number (mg KOH/gm oil) (T.A.N.) ..... 0,85  
 Strong acid number (mg KOH/gm oil) (S.A.N.) ..... below 0,01  
 Flash point (Closed) °C ..... 230

**Comments**

Charge to be hot fresh water washed to reduce the high salt level. This will also improve the T.A.N. (Total acid number) value. Further sample after treatment.

For .....

MARINE SALES SUPERINTENDENT



### 16.1 Γενικά για τη λίπανση ΜΕΚ

Η λίπανση των μηχανών εσωτερικής καύσης (πετρελαιομηχανές, βενζινομηχανές) γίνεται συνήθως με αναγκαστική κυκλοφορία, την οποία εξασφαλίζει η αντλία του λιπαντικού. Η αντλία αυτή βρίσκεται μέσα στον στροφαλοθάλαμο μόνο στις μηχανές μικρής ιπποδύναμης. Στις περισσότερες περιπτώσεις βρίσκεται χωριστά, κοντά στην ελαιοδεξαμενή, από την οποία αντλεί το λιπαντέλαιο και το διανέμει διά μέσου του δικτύου λίπανσης στα λιπανόμενα μέρη της μηχανής, που είναι:

- 1) Τα έδρανα βάσης.
- 2) Οι τριβείς διωστήρων.
- 3) Οι πείροι εμβόλων.
- 4) Τα τοιχώματα του κυλίνδρου και τα έμβολα και
- 5) Οι μειωτήρες.

Τα ορυκτέλαια που χρησιμοποιούνται για τη λίπανση των ΜΕΚ έχουν ορισμένα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, όπως ιξώδες, σημείο ανάφλεξης, σημείο ροής, σταθερότητα στην οξείδωση και σταθερότητα ιξώδους-θερμοκρασίας, των οποίων οι τιμές αναγράφονται στον πίνακα προδιαγραφών. Όμως τα ορυκτέλαια πρέπει να έχουν και έντονες απορρυπαντικές ιδιότητες, δηλαδή να μπορούν να απομακρύνουν από τις λιπανόμενες επιφάνειες τα εξανθρακώματα που σχηματίζονται και επικάθονται σ' αυτές. Τα εξανθρακώματα αυτά σχηματίζονται συνήθως από την υπερθέρμανση του εμβόλου και έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών σ' αυτά, που οφείλονται στην κακή και ανομοιόμορφη μετάδοση της θερμότητας, την οποία προκαλούν τα εξανθρακώματα. Για την αύξηση της απορρυπαντικής ικανότητας των λιπαντελαίων ΜΕΚ χρησιμοποιούνται κατάλληλα απορρυπαντικά πρόσθετα (detergents), που συμβάλλουν στη διατήρηση της καθαρότητας των επιφανειών των χιτωνίων και των εμβόλων. Η υπερθέρμανση των εμβόλων εξάλλου, εκτός από ρωγμές μπορεί να προκαλέσει και έκρηξη στον στροφαλοθάλαμο, ιδίως όταν το λιπαντικό περιέχει διαλυμένο καύσιμο από κακή λειτουργία των

καυστήρων. Η έκρηξη στον στροφαλοθάλαμο αποφεύγεται με την καλή συντήρηση της μηχανής, ώστε οι καυστήρες να λειτουργούν ικανοποιητικά. Αποφεύγεται επίσης και με τη χρήση λιπαντικού καλής ποιότητας, δηλαδή ενισχυμένου με τα κατάλληλα απορρυπαντικά πρόσθετα, ώστε η μηχανή να διατηρείται καθαρή και να αποτρέπεται έτσι η υπερθέρμανση από τα εξανθρακώματα.

Εκτός από τα απορρυπαντικά πρόσθετα, τα λιπαντέλαια των ΜΕΚ ενισχύονται με:

- 1) **Βελτιωτικά δείκτη ιξώδους**, που αυξάνουν την τιμή του δείκτη ιξώδους, δηλαδή περιορίζουν τη μεταβολή του ιξώδους με τη θερμοκρασία.
- 2) **Αντιοξειδωτικά** πρόσθετα, που περιορίζουν τον βαθμό και την ταχύτητα οξείδωσης, παρατείνοντας έτσι τη χρήση τους.

Διακρίνονται τρεις κατηγορίες λιπαντελαίων ΜΕΚ.

1) **Κοινά λιπαντικά** (regular), που χρησιμοποιούνται σε αργόστροφες μηχανές με μικρά φορτία και γενικά όπου δεν προβλέπονται δυσμενείς συνθήκες λίπανσης. Τα λιπαντικά αυτά δεν περιέχουν πρόσθετα.

2) **Λιπαντικά μερικώς ενισχυμένα** (premiurn), που έχουν ενισχυθεί με αντιοξειδωτικά πρόσθετα και επομένως κατάλληλα για τη λίπανση ΜΕΚ, στις οποίες προβλέπονται συνθήκες με μέτρια καταπόνηση του λιπαντικού, τόσο από το φορτίο όσο και από τη θερμοκρασία. Στο εμπόριο φέρουν το συμβολισμό DG, όταν πρόκειται για λάδια πετρελαιομηχανών και MM όταν πρόκειται για λάδια βενζινομηχανών.

3) **Λιπαντικά βαριών απαιτήσεων** (heavy duty), που έχουν ενισχυθεί με αντιοξειδωτικά και απορρυπαντικά πρόσθετα, ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν τις πιο δυσμενείς συνθήκες λίπανσης, ως προς το φορτίο και τις θερμοκρασίες. Τα λιπαντικά της κατηγορίας αυτής συμβολίζονται με MS για τις βενζινομηχανές, ενώ τα αντίστοιχα λιπαντέλαια των μηχανών diesel συμβολίζονται με DS ή HD.

Ειδικότερα για τις πετρελαιομηχανές, ανάλογα με το τμήμα της πετρελαιομηχανής που πρόκειται να λιπάνουν, διακρίνονται σε:

1) **Λιπαντικά κυλίνδρων** ή **κυλινδρέλαια** (cylinder oils), που χρησιμοποιούνται μόνο για τη λίπανση των τοιχωμάτων των κυλίνδρων, στις μηχανές εκείνες στις οποίες η λίπανση των κυλίνδρων γίνεται χωριστά. Πρόκειται για τις μηχανές με ζύγωμα (crosshead engines) όπως είναι κατ' εξοχή οι αργόστροφες πετρελαιομηχανές που χρησιμοποιούνται στο εμπορικό ναυτικό.

2) **Λιπαντικά στροφαλοθαλάμων** (crankcase oils), που χρησιμοποιούνται μόνο για τη λίπανση των τριβών και την ψύξη των εμβόλων, και πάλι στις περιπτώσεις που η λίπανσή τους γίνεται χωριστά, ανεξάρτητα από τη λίπανση των κυλίνδρων, δηλαδή στις αργόστροφες ναυτικές πετρελαιομηχανές.

Στις μικρές μηχανές μέσης και υψηλής ταχύτητας, που λειτουργούν χωρίς ζύγωμα, δηλαδή με **διωστήρα** (trunk piston engines), η λίπανση είναι ενιαία τόσο για τους κυλίνδρους όσο και για τους τριβείς. Το δίκτυο λίπανσης είναι κοινό και η ποιότητα του λιπαντικού ενιαία, και καθορίζεται από τις αντίστοιχες προδιαγραφές. Στις αργόστροφες ναυτικές πετρελαιομηχανές τα δίκτυα λίπανσης των κυλίνδρων είναι ανεξάρτητα από το δίκτυο των τριβών και φυσικά και τα λιπαντικά των δύο αυτών τμημάτων είναι διαφορετικά. Συνήθως τα κυλινδρέλαια είναι βαρύτερα από τα λάδια των ελαιοδεξαμενών (κάρτερ) και περισσότερο ενισχυμένα με αλκαλικά πρόσθετα για την εξουδετέρωση του θειικού οξέος που παράγεται κατά την καύση του πετρελαίου.

Η σύγκριση των ιδιοτήτων για τα λιπαντικά κάρτερ σε σχέση με τα κυλινδρέλαια φαίνεται **ενδεικτικά** στον πίνακα 16.1.

**Πίνακας 16.1**  
**Σύγκριση βασικών ιδιοτήτων**  
**ορυκτελαίων μηχανών Diesel**

| Κύρια χαρακτηριστικά               | Όρια τιμών       |                     |
|------------------------------------|------------------|---------------------|
|                                    | Λιπαντικά κάρτερ | Λιπαντικά κυλίνδρου |
| Πυκνότητα (tn/m <sup>3</sup> )     | 0,885-0,881      | 0,943-0,948         |
| Σημείο ανάφλεξης Κ.Δ. (°C)         | 221-238          | 260-265             |
| Σημείο ροής (°C)                   | -20              | -18 έως -12         |
| Κινηματικό ιξώδες (cSt στους 40°C) | 133-135          | 150-235             |
|                                    | 12-13            | 12-18               |
| Δείκτης ιξώδους                    | 88-90            | 73-85               |
| Ολικός αριθμός βάσης (TBN)         | 4-10             | 54-70               |

## 16.2 Λίπανση βενζινομηχανών

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές στον τρόπο λίπανσης μεταξύ των δίχρονων και τετράχρονων βενζινομηχανών, γι' αυτό η λίπανση των δύο αυτών κατηγοριών εξετάζεται χωριστά.

### 16.2.1 Δίχρονες βενζινομηχανές

Η λίπανση των δίχρονων βενζινομηχανών γίνεται με μείγμα λιπαντέλαιου με βενζίνη σε αναλογία από 1:10 ως 1:25. Το μείγμα αυτό είναι έτοιμο από την αρχή, δηλαδή από την αποθήκη του καυσίμου, από όπου και αντλείται σαν καύσιμο προς τον εξαεριωτήρα. Κατά την εξαέρωση της βενζίνης, το λιπαντικό που απομένει παρασύρεται με μορφή λεπτών σταγονιδίων, διοχετεύεται προς τον στροφαλοθάλαμο και αποτίθεται σε όλες τις εσωτερικές επιφάνειες, λιπαίνοντας τα έδρανα και το κατώτερο τμήμα των τοιχωμάτων του κυλίνδρου. Μέρος του λιπαντικού μπαίνει μαζί με το καύσιμο στο θάλαμο καύσης, όπου, αφού λιπάνει τον κύλινδρο, καίγεται τελικά μαζί με τη βενζίνη. Έτσι η λίπανση των συνηθισμένων τριβών δεν μπορεί να είναι ικανοποιητική. Γι' αυτό στις δίχρονες βενζινομηχανές συνήθως χρησιμοποιούνται ένσφαιροι τριβείς (ρουλεμάν).

Το σπουδαιότερο πρόβλημα που παρουσιάζει αυτός ο τρόπος λίπανσης των δίχρονων βενζινομηχανών είναι η ρύπανση των κυλίνδρων από τα εξανθρακώματα ή άλλα προϊόντα από την ατελή καύση του λαδιού που καίγεται μαζί με τη βενζίνη. Η ατελής καύση του λιπαντικού στις δίχρονες βενζινομηχανές φαίνεται εύκολα και από την έντονη οσμή και τον πυκνό καπνό που αφήνουν συχνά οι εξατμίσεις των μηχανών αυτών. Το πρόβλημα αυτό κατά μέγα μέρος αντιμετωπίζεται με την επιλογή άριστης ποιότητας λιπαντικών, που αναμειγνύονται με βενζίνη για την παρασκευή του τελικού μείγματος. Πρέπει τα λιπαντικά αυτά να συγκεντρώνουν, εκτός από τα άλλα, δύο κυρίως ιδιότητες:

- 1) να έχουν κατάλληλο ιξώδες και
- 2) να μην αφήνουν κατάλοιπα κατά την καύση.

Παρόλο που τις ιδιότητες αυτές συγκεντρώνουν κυρίως τα ναφθενικής βάσης ορυκτέλαια (§ 3.6), όμως χρησιμοποιούνται ορυκτέλαια με υψηλό δείκτη ιξώδους, που αποτελούν τη βάση παραγωγής λιπαντικών για δίχρονες βενζινομηχανές. Παρά τα παραπάνω, η ατελής καύση και οι συνέπειές της στην ταχύτερη ρύπανση των κυλίνδρων στις δίχρονες βενζινομηχανές, που οφείλονται στον τρόπο λίπανσης, αποτελούν ένα γνωστό μειονέκτημα σε σύγκριση με τις τετράχρονες



βενζινομηχανές. Αυτό αντισταθμίζεται από άλλα γνωστά πλεονεκτήματα που οι δίχρονες βενζινομηχανές παρουσιάζουν και κυρίως τη μεγαλύτερη ισχύ στον ίδιο όγκο. Σε πολλές περιπτώσεις τα λιπαντικά περιέχουν πρόσθετα που διατηρούν καθαρούς τους σπινθηριστές.

### 16.2.2 Τετράχρονες βενζινομηχανές

Στις τετράχρονες βενζινομηχανές η λίπανση γίνεται με αμιγές ορυκτέλαιο, του οποίου οι ιδιότητες καθορίζονται από τις σχετικές προδιαγραφές ανάλογα με την ποιότητά του.

Σημαντικότερες είναι οι αμερικανικές προδιαγραφές MIL-PRF-2104 και MIL-L-46152, με διεθνή αναγνώριση και εφαρμογή. Τα κύρια χαρακτηριστικά που οι προδιαγραφές αυτές καθορίζουν, αναγράφονται στους πίνακες 16.2 και 16.3. Οι ίδιες προδιαγραφές ισχύουν και για τη λίπανση μηχανών diesel.

Η λίπανση των βενζινομηχανών διακρίνεται σε λίπανση εδράνων, λίπανση κυλίνδρων και λίπανση λοιπών μερών.

Κάθε είδος λίπανσης εξετάζεται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.

#### 1) Λίπανση εδράνων

Τα κύρια έδρανα όλων σχεδόν των βενζινομηχανών λιπαίνονται **υπό πίεση**, που μπορεί να υποβοηθείται με εκτίναξη. Τα έδρανα του στροφάλου και του διωστήρα μπορούν να λιπαίνονται με δύο τρόπους:

α) υπό πίεση με διόδους μέσω του κύριου άξονα και

β) με εμβάπτιση μέσα στο λιπαντέλαιο του δοχείου (κάρτερ) και από την εκτίναξη του λιπαντικού, που προκαλείται κατά την περιστροφή.

Τη λίπανση υποβοηθάει μία σειρά από ακροφύσια λιπαντικού, που έχουν κατάλληλη διάταξη και παίρνουν το λιπαντικό από την αντλία τροφοδότησης.

#### 2) Λίπανση κυλίνδρων

Στους κυλίνδρους το λιπαντικό έχει διπλή αποστολή: την ψύξη του εμβόλου και τη λίπανση των τοιχωμάτων των κυλίνδρων.

**Πίνακας 16.2**  
**Προδιαγραφή λιπαντέλαιων MEK MIL-PRF-2104**

| Κύρια χαρακτηριστικά                 | Μέθοδος ASTM | SAE 10 | SAE 30 | SAE 40 | SAE 50 |
|--------------------------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 1) Κινηματικό ιξώδες σε 100°C (cSt)  | D445-19      |        |        |        |        |
| α) Ελάχιστη τιμή                     |              | 5,7    | 9,6    | 12,9   | 16,8   |
| β) Μέγιστη τιμή                      |              | 7,5    | 12,9   | 16,8   | 22,7   |
| 2) Δυναμικό ιξώδες, σε 0°C (cproise) | D2602        |        |        |        |        |
| α) Ελάχιστη τιμή                     |              | 1200   |        |        |        |
| β) Μέγιστη τιμή                      |              | 2400   | –      | –      | –      |
| 3) Δείκτης ιξώδους (min)             | D2270-10     | –      | 75     | 80     | 85     |
| 4) Σημείο ροής, °C (max)             | D97-17b      | –32    | –18    | –15    | –9     |
| 5) Σημείο ανάφλεξης, °C (min)        | D92-12       | 200    | 220    | 226    | 235    |

#### Παρατηρήσεις:

1) Εκτός από τα παραπάνω αναγράφονται οι τιμές των παρακάτω χαρακτηριστικών, για τα οποία η προδιαγραφή δεν καθορίζει όρια.

- Εξανθράκωμα (μέθοδος Ramsbottom, ASTM D524-15).
- Πυκνότητα (μέθοδος ASTM D287-12b).
- Περιεκτικότητα σε φώσφορο (μέθοδος ASTM D1091-11).
- Περιεκτικότητα σε χλώριο (μέθοδος ASTM D808-16).
- Περιεκτικότητα σε θείο (μέθοδος ASTM D1552-16).
- Θειική τέφρα (μέθοδος ASTM D874-13a).
- Οργανομεταλλικές ενώσεις (μέθοδος ASTM D811-82).

2) Από την προδιαγραφή επίσης προβλέπονται δοκιμές αναφερόμενες σε:

- Αφρισμό.
- Σταθερότητα.
- Αναμειξιμότητα με λιπαντέλαια, που έχουν παρόμοιες προδιαγραφές (MIL-L-46152, MIL-PRF-21260).
- Μηχανικές δοκιμές που να εξασφαλίζουν ικανοποιητική συμπεριφορά στην πράξη (§ 15.15).

**Πίνακας 16.3**  
**Προδιαγραφή λιπαντελαίων MEK MIL-L-46152**

| Κύρια χαρακτηριστικά                      | Μέθοδος ASTM | SAE                 |      |                     |                     |                     |
|---|--------------|---------------------|------|---------------------|---------------------|---------------------|
|   |              | 10W                 | 30   | 5 W – 20            | 10 W-30             | 15 W-40             |
| 1) Κινηματικό ιξώδες, σε 100°C (cSt)      | D445-19      |                     |      |                     |                     |                     |
| α) Ελάχιστη τιμή                          |              | 5,6                 | 9,3  | 5,6                 | 9,3                 | 12,5                |
| β) Μέγιστη τιμή                           |              | 7,4                 | 12,5 | 9,3                 | 12,5                | 16,3                |
| 2) Δυναμικό ιξώδες, (cPoise)              | D2602        |                     |      |                     |                     |                     |
| α) Ελάχιστη τιμή                          |              | 3500<br>(σε – 25°C) | –    | 3250<br>(σε – 30°C) | 3500<br>(σε – 25°C) | 3500<br>(σε – 20°C) |
| β) Μέγιστη τιμή                           |              | 3500<br>(σε – 20°C) | –    | 3500<br>(σε – 25°C) | 3500<br>(σε-20°C)   | 3500<br>(σε – 15°C) |
| 3) Όρια αντλητικότητας, °C (max)          | D3829-20     | –25                 | –    | –30                 | –25                 | –20                 |
| 4) Δείκτης ιξώδους (min)                  | D2270-10     | αναφέρεται          | 75   | αναφέρεται          | αναφέρεται          | αναφέρεται          |
| 5) Σημείο ροής, °C (min)                  | D97-17b      | –32                 | – 18 | –40                 | –32                 | –23                 |
| 6) Σημείο ανάφλεξης, °C (min)             | D92-12       | 205                 | 200  | 205                 | 205                 | 215                 |
| 7) Περιεκτικότητα σε φωσφόρο % κ.β. (max) | D1091-11     | 0,14                | 0,14 | 0,14                | 0,14                | 0,14                |

**Παρατηρήσεις:**

- Εκτός από τα παραπάνω αναγράφονται οι τιμές των παρακάτω χαρακτηριστικών, για τα οποία οι προδιαγραφές δεν καθορίζουν όρια:
  - Πυκνότητα (ASTM D287-12b).
  - Θείο (μέθοδος ASTM D1552-16).
  - Μεταλλικά στοιχεία (ASTM D811-82).
  - Εξανθράκωμα (ASTM D524-25 — μέθοδος Ramsbottom).
  - Θεϊκή τέφρα (ASTM D874-13a).
- Από την προδιαγραφή προβλέπονται επίσης δοκιμές αναφερόμενες σε:
  - Αφρισμό
  - Σταθερότητα.
  - Αναμειξιμότητα με άλλα παρομοίων προδιαγραφών λιπαντικά (MIL-PRF-2104, MIL-L-46167)
  - Μηχανικές δοκιμές, που να εξασφαλίζουν ικανοποιητική συμπεριφορά στην πράξη (βλ. § 12.15).

Τα έμβολα ψύχονται με λιπαντικό που εκτοξεύεται από διόδους διά μέσου του σώματος του διωστήρα και προέρχεται από τα κομβία του στροφάλου.

Τα τοιχώματα του κυλίνδρου λιπαίνονται με εκτίναξη του λιπαντικού του κάρτερ από τα αντίβαρα ζυγοστάθμισης του στροφαλοφόρου άξονα. Τα τοιχώματα μπορεί επίσης να λιπαίνονται με εκτίναξη λιπαντικού που προέχεται από τα κομβία των στροφάλων.

Οι οδοντωτοί τροχοί και οι βαλβίδες λιπαίνονται με λιπαντικό που καταθλίβεται από το επάνω μέρος της μηχανής και κατά την επιστροφή του στο κάρτερ με τη βαρύτητα. Έτσι λιπαίνονται τα διάφορα σημεία που συναντά κατά την κάθοδό του.

Το λιπαντικό και των δυο προηγούμενων περιπτώσεων (έδρανα-κύλινδροι) είναι κοινό και καλύπτεται από τις προδιαγραφές που αναφέρονται στον πίνακα 16.3. Τα λιπαντικά αυτά είναι ενισχυμένα με απορρυ-

παντικά πρόσθετα που απομακρύνουν τα εξανθρακώματα διατηρώντας καθαρά τα κρίσιμα μέρη της μηχανής με τα οποία το λιπαντικό έρχεται σε επαφή.

Εκτός από τα απορρυπαντικά, τα λιπαντικά των βενζινομηχανών ενισχύονται:

α) Με αντιοξειδωτικά πρόσθετα που παρατείνουν την ζωή τους και

β) με βελτιωτικά δείκτη ιξώδους (V.I. improvers) που διευρύνουν τα όρια θερμοκρασιών, στις οποίες τα λιπαντικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιούνται (βλ. § 15.6). Τα λάδια αυτά είναι γνωστά ως multigrade και φυσικά είναι ακριβότερα. Έτσι, το λάδι SAE 20 δεν εξασφαλίζει εύκολη εκκίνηση της μηχανής στις θερμοκρασίες κάτω από –10°C, επειδή αυξάνεται πολύ το ιξώδες του. Το αντίστοιχο λάδι με βελτιωτικό δείκτη ιξώδους, με ένδειξη SAE 5W20 στη θερμοκρασία λειτουργίας συμπεριφέρεται σαν SAE 20, σε χαμηλές

όμως θερμοκρασίες δεν αυξάνει το ιξώδες του παρά πολύ, επιτρέποντας εύκολα την εκκίνηση της μηχανής ως τους  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Τα συστήματα λίπανσης της κυρίως μηχανής (έδρανα - κύλινδροι) μπορούν να καταταγούν σε δυο κατηγορίες:

α) **Σύστημα υγρής ελαιολεκάνης**, που εξασφαλίζει τη λίπανση με συνδυασμό πίεσης και εκτίναξης. Έχει το πλεονέκτημα ότι είναι οικονομικό και ότι οι κίνδυνοι απόφραξης των σωληνώσεων είναι λιγότεροι. Βασικό μειονέκτημά του είναι ότι η στάθμη του λιπαντικού στο κάρτερ αυξομειώνεται κατά τις εκτινάξεις και προκαλεί αντίστοιχες διακυμάνσεις κατά τη λίπανση.

β) **Σύστημα ξηρής ελαιολεκάνης** (πίεσης), που εξασφαλίζει τη λίπανση μόνο με πίεση, και γι' αυτόν το λόγο είναι πλήρης και σταθερή. Το σύστημα όμως είναι δαπανηρότερο και παρουσιάζει τον κίνδυνο απόφραξης των σωληνώσεων από τις αποθέσεις, που προκαλεί η φυγόκεντρη δύναμη. Το μειονέκτημα αυτό, όμως, αντιμετωπίστηκε με ενισχυμένα φίλτρα και με διατάξεις ασφάλειας με ενδεικτικές λυχνίες που ενεργοποιούνται όταν η πίεση του δικτύου πέσει κάτω από τα όρια ασφάλειας.

### 3) Λίπανση λοιπών μερών

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το σύστημα μετάδοσης κίνησης που μπορεί να θεωρηθεί τμήμα ή συμπλήρωμα της κυρίως μηχανής.

Το σύστημα αυτό αποτελείται κυρίως από τα εξής κύρια μέρη:

α) Το **κιβώτιο ταχυτήτων**, που είναι ένα είδος μειωτήρων και ρυθμίζει τη σχέση μετάδοσης κίνησης μεταξύ του κινητήρα και του άξονα.

β) Τον **συμπλέκτη**, που συνδέει ή αποδεσμεύει τον κινητήρα από το κιβώτιο ταχυτήτων, άρα και από τον άξονα και

γ) Το **διαφορικό**, που ενδιαφέρει κυρίως τα αυτοκίνητα και επιτρέπει στους τροχούς να στρέφονται με διαφορετικές ταχύτητες, όταν το αυτοκίνητο κινείται σε κυκλικές τροχιές.

Για τους συμπλέκτες χρησιμοποιούνται κατάλληλα υδραυλικά λάδια που πρέπει απαραίτητα να συγκεντρώνουν τις εξής βασικές ιδιότητες:

α) Αντοχή σε οξειδωση.

β) Υψηλή τιμή πυκνότητας, γιατί η μετάδοση της ισχύος εξαρτάται από την κινητική ενέργεια του ρευστού, που είναι ανάλογη προς την πυκνότητα.

γ) Κατάλληλο ιξώδες, που να επιτρέπει την άνετη κυκλοφορία ρευστού.

δ) Αντιδιαβρωτική προστασία.

Για το διαφορικό και για το κιβώτιο ταχυτήτων συνήθως χρησιμοποιείται ενιαίος τύπος λιπαντικού με βάση τα ορυκτέλαια, που κυκλοφορούν στο εμπόριο με το κοινό όνομα **βαλβολίνες**. Μερικές βαλβολίνες έχουν υψηλό ιξώδες και είναι ενισχυμένες με χημικά πρόσθετα, τα οποία αυξάνουν την αντοχή στις πολύ υψηλές πιέσεις που αναπτύσσονται στα γρανάζια και των δυο αυτών μηχανισμών. Μια από τις γνωστότερες προδιαγραφές για βαλβολίνες είναι και η MIL-L-2105C, που τα κυριότερα χαρακτηριστικά της περιέχονται στον πίνακα 16.4.

## 16.3 Λίπανση μηχανών diesel

### 16.3.1 Γενικά για τη λίπανση των μηχανών diesel

Στις μηχανές diesel (πετρελαιομηχανές) ισχύουν οι ίδιες βασικές αρχές λίπανσης, όπως και στις βενζινομηχανές, αφού και τα δυο είδη μηχανών ανήκουν στην κατηγορία MEK. Επομένως έχουν κοινά χαρακτηριστικά σε πολλούς τομείς, και μεταξύ αυτών και στη λίπανση.

Σε όλους τους τύπους μηχανών diesel εφαρμόζονται κυκλοφοριακά συστήματα με πίεση του τύπου υγρής ή ξηρής ελαιολεκάνης.

Η λίπανση των πετρελαιομηχανών, σε σύγκριση με τις βενζινομηχανές, απαιτεί πολύ μεγαλύτερη προσοχή και παρουσιάζει περισσότερα προβλήματα, γιατί:

1) Τα συνολικά φορτία είναι πολύ μεγαλύτερα, επομένως ασκούνται πολύ μεγάλες πιέσεις.

2) Οι θερμοκρασίες είναι συνήθως πολύ υψηλότερες, και μάλιστα κυμαινόμενες συχνά σε πλατιά όρια.

3) Χρησιμοποιούνται καύσιμα με ολοένα πιο χαμηλή ποιότητα που επιδρούν δυσμενώς στο λιπαντικό.

Για να αντιμετωπισθούν όλες αυτές οι συνθήκες λειτουργίας των πετρελαιομηχανών η τεχνολογία των λιπαντικών έχει φθάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα τελειότητας. Τόσο η παραγωγή των λιπαντέλαιων όσο και οι αντίστοιχες προδιαγραφές εξασφαλίζουν την ποιότητα εκείνη που χρειάζεται, ώστε η λίπανση να επιτελεί με απόλυτη επιτυχία την τόσο ζωτικής σημασίας αποστολή της, τη διατήρηση δηλαδή της μηχανής σε καλή κατάσταση και την εν γένει αποδοτική λειτουργία της. Εκτός όμως από τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις ποιότητας που οι αγοραστές των λιπαντικών καθορίζουν, ο ανταγωνισμός μεταξύ των εταιρειών παραγωγής και διάθεσης των λιπαντικών έχει βελτιώσει πολύ την ποιότητά τους.

Η λίπανση των πετρελαιομηχανών διακρίνεται:

**Πίνακας 16.4**  
**Προδιαγραφή βαλβολίνης MIL-L-2105 C**

| Κύρια χαρακτηριστικά  | Μέθοδος ASTM | SAE        |            |            |
|---|--------------|------------|------------|------------|
|   |              | 75 W       | 80 W-90    | 85 W – 140 |
| 1) Κινηματικό ιξώδες σε 100°C (cSt)   |              |            |            |            |
| α) Ελάχιστη τιμή  | D445-19      | 4,1        | 13,5       | 24         |
| β) Μέγιστη τιμή   |              |            | 24         | 41         |
| 2) Θερμοκρασία στην οποία το δυναμικό ιξώδες αποκτά τιμή 150.000 cpoise (max) | D2983-20     | - 40°C     | - 26°C     | - 12°C     |
| 3) Σημείο ανάφλεξης, °C (min)   | D92-12       | 150        | 165        | 180        |
| 4) Δείκτης ιξώδους  | D2270-10     | αναφέρεται | αναφέρεται | αναφέρεται |
| 5) Αδιάλυτα σε πεντάνιο   | D893-14      | αναφέρεται | αναφέρεται | αναφέρεται |
| 6) Πυκνότητα  | D287-12b     | αναφέρεται | αναφέρεται | αναφέρεται |

**Παρατηρήσεις:**

1) Για τις τιμές των χαρακτηριστικών 4, 5 και 6 δεν προδιαγράφονται όρια. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών απλώς αναφέρονται, καθώς επίσης και των παρακάτω.

- Σημείο ροής (ASTM D97-17b).
- Φώσφορος (ASTM D1091-11).
- Αζωτο (ASTM D3228-20).
- Θείο (ASTM D1552-16).
- Χλώριο (ASTM D808-16).
- Οργανομεταλλικές ενώσεις (ASTM D811-82).

1) Στη λίπανση των κυλίνδρων.

2) Στη λίπανση των τριβέων.

Τα δύο δίκτυα λίπανσης, δηλαδή των κυλίνδρων και των τριβέων, άλλοτε μεν τροφοδοτούνται από κοινή δεξαμενή με τα ίδια λιπαντέλαια και άλλοτε είναι τελείως ανεξάρτητα μεταξύ τους, με χωριστές δεξαμενές, και φυσικά με διαφορετικό είδος λαδιού, ανάλογα με το είδος της μηχανής. Κοινό δίκτυο λίπανσης με ενιαίο τύπο λιπαντικού έχουν οι μηχανές χωρίς **ζύγωμα** (trunk piston engines), πράγμα που ισχύει για ταχύστροφες κατ' εξοχή πετρελαιομηχανές μικρής ισχύος. Αντίθετα, στις βαριές αργόστροφες μηχανές diesel του εμπορικού ναυτικού που έχουν ζύγωμα (crosshead engines), έχουμε δύο δίκτυα λίπανσης με διαφορετικό λιπαντικό: ένα για τους κυλίνδρους και ένα για τους τριβείς.

Ο τρόπος λίπανσης και ειδικότερα η διάταξη των δικτύων ή το είδος των χρησιμοποιούμενων συστημάτων λίπανσης ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο της μηχανής. Τα συστήματα λίπανσης περιγράφονται με λεπτομέρεια στο βιβλίο Μηχανές Εσωτερικής Καύσης του Ιδρύματος Ευγενίδου. Μια γενική διαγραμματική διάταξη δικτύου λίπανσης μηχανής diesel δείχνει το σχήμα 16.1.

Η αναρρόφηση του λαδιού με τις αντλίες Α<sub>1</sub> και Α<sub>2</sub> γίνεται από τη δεξαμενή Δ. Στις μικρές μηχανές δεν

υπάρχει ξεχωριστή δεξαμενή και ο πυθμένας της βάσης της δεξαμενής διαμορφώνεται κατάλληλα, ώστε να αποτελεί τον **ελαιοσυλλέκτη** ή **ελαιολεκάνη** (κάρτερ) μέσα στον οποίο βρίσκεται η αντλία λιπαντικού. Στις μεγάλες μηχανές το κάρτερ αποτελεί ιδιαίτερη δεξαμενή, που βρίσκεται στη βάση της μηχανής ή και μέσα στα διπύθμενα και φέρει:

1) Τον εξυδατωτικό κρουνό Ε, για την απομάκρυνση του νερού και της λάσπης.

2) Τον καταμετρικό σωλήνα Κ, που χρησιμεύει και ως εξαεριστικό του δικτύου. Μεταξύ των αντλιών Α<sub>1</sub> και Α<sub>2</sub> παρεμβάλλεται ο ρυθμιστής πίεσεως Ρ, από τον οποίο το λιπαντικό επιστρέφει στη δεξαμενή όταν η πίεση κατάθλιψης υπερβαίνει την προκαθορισμένη τιμή.

Το δίκτυο συμπληρώνεται με:

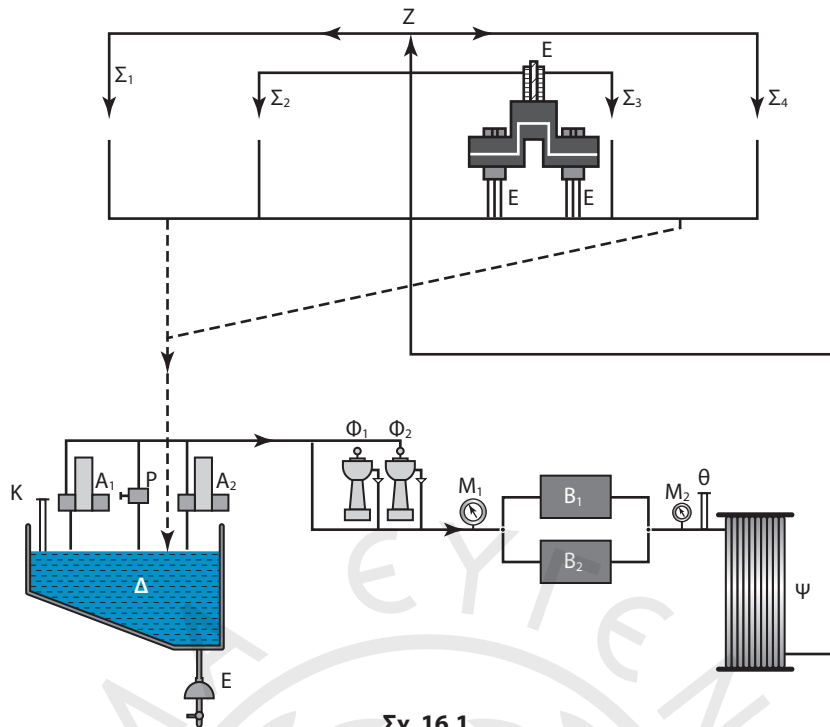
1) Τους φυγοκεντρικούς καθαριστήρες Φ<sub>1</sub> και Φ<sub>2</sub>.

2) Τα φίλτρα Β<sub>1</sub> και Β<sub>2</sub>.

3) Δυο θλιβόμετρα Μ<sub>1</sub> και Μ<sub>2</sub>, που δίνουν τις ενδείξεις της πίεσης πριν και μετά τα φίλτρα.

4) Θερμόμετρο Θ για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του λιπαντικού.

Το λιπαντικό διά μέσου των σωληνώσεων διανομής Ζ διακλαδίζεται στους στροφάλους και ειδικότερα στο επάνω μέρος των εδράνων της βάσης. Από την τρύπα που υπάρχει στο κομβίο του στροφάλου,



**Σχ. 16.1**  
 Διάγραμμα δικτύου λίπανσης μηχανής Diesel

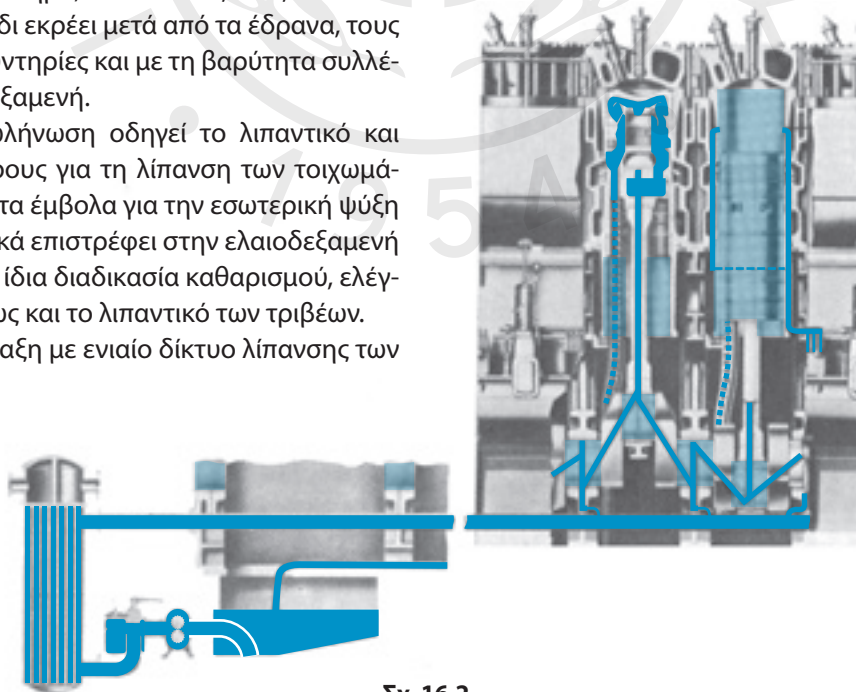
το λάδι φθάνει στον εσωτερικό οχετό του στροφάλου και διά μέσου των διάτρητων βραχιόνων, στους τριβείς των κομβίων του στροφάλου. Από εκεί το λιπαντικό οδηγείται προς τον πείρο ή το ζύγωμα (αν υπάρχει) είτε από την εσωτερική τρύπα του διωστήρα E, είτε από σωληνώσεις που είναι τοποθετημένες στο εξωτερικό του διωστήρα, λιπαίνοντας τους αντίστοιχους τριβείς. Το λάδι εκρέει μετά από τα έδρανα, τους τριβείς και τις ευθυντηρίες και με τη βαρύτητα συλλέγεται στην ελαιοδεξαμενή.

Παράλληλη σωλήνωση οδηγεί το λιπαντικό και προς τους κυλίνδρους για τη λίπανση των τοιχωμάτων τους και προς τα έμβολα για την εσωτερική ψύξη τους. Απ' αυτά τελικά επιστρέφει στην ελαιοδεξαμενή για να υποστεί την ίδια διαδικασία καθαρισμού, ελέγχου και ψύξης, όπως και το λιπαντικό των τριβέων.

Μια τέτοια διάταξη με ενιαίο δίκτυο λίπανσης των

κυλίνδρων και των τριβέων δείχνει και το σχήμα 16.2 για μια δίχρονη πετρελαιομηχανή Nordberg TS-21.

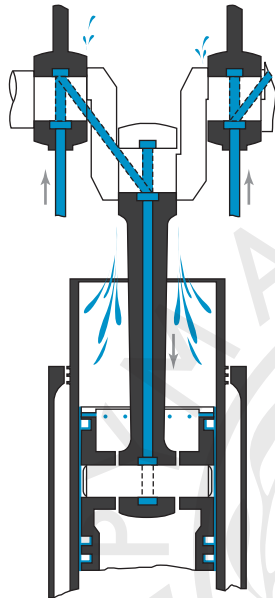
Η λίπανση των κυλίνδρων στη μηχανή αυτή γίνεται με μηχανικούς λιπαντήρες που στέλνουν το λιπαντικό στα τοιχώματα του κυλίνδρου.



**Σχ. 16.2**  
 Λίπανση δίχρονης πετρελαιομηχανής Nordberg (ενιαίο δίκτυο)

Η λίπανση όμως των κυλίνδρων μπορεί να γίνει και με εκτίναξη του λιπαντικού, όπως φαίνεται στο σχήμα 16.3.

Το λιπαντικό, καθώς ξεφεύγει από τους τριβείς του στροφαλοφόρου άξονα, εκτοξεύεται στο κάτω μέρος του κυλίνδρου και στα τοιχώματά του, με τη βοήθεια της φυγόκεντρης δύναμης που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή του στροφάλου.



**Σχ. 16.3**

Λίπανση κυλίνδρων με εκτίναξη

### 16.3.2 Λίπανση τριβέων

Η λίπανση των τριβέων αποβλέπει στον σχηματισμό και την διατήρηση λιπαντικής μεμβράνης ανάμεσα στο έδρανο και τον άξονα, για τον περιορισμό των τριβών που αναπτύσσονται κατά την περιστροφή.

Η λιπαντική μεμβράνη πρέπει να έχει την ικανότητα να διατηρείται, όσο μεγάλα φορτία και να αναπτύσσονται στον τριβέα (μπορεί να φθάνουν τα 500 bar). Αυτό εξαρτάται:

- 1) Από την παροχή λιπαντικού.
- 2) Από την ποιότητα του λιπαντικού.
- 3) Από τη σχεδίαση και την κατασκευή του τριβέα.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 16.4 το λιπαντικό διοχετεύεται υπό πίεση στο επάνω μέρος του τριβέα και διά μέσου της κυκλικής αύλακας Α διανέμεται στην εσωτερική επιφάνεια Ε.

Ο σχηματισμός της λιπαντικής μεμβράνης κατά την περιστροφή του άξονα, φαίνεται σταδιακά στο σχήμα 16.5.

### ΦΑΣΗ I

Ο άξονας είναι ακίνητος και το μεγαλύτερο μέρος του λιπαντικού είναι συγκεντρωμένο στο επάνω μέρος του τριβέα.

### ΦΑΣΗ II

Με την έναρξη της περιστροφής ο άξονας ανυψώνεται και το λιπαντικό εισχωρεί στο κάτω μέρος, όπου έχουμε συνθήκες οριακής λίπανσης (βλ. § 13.5).

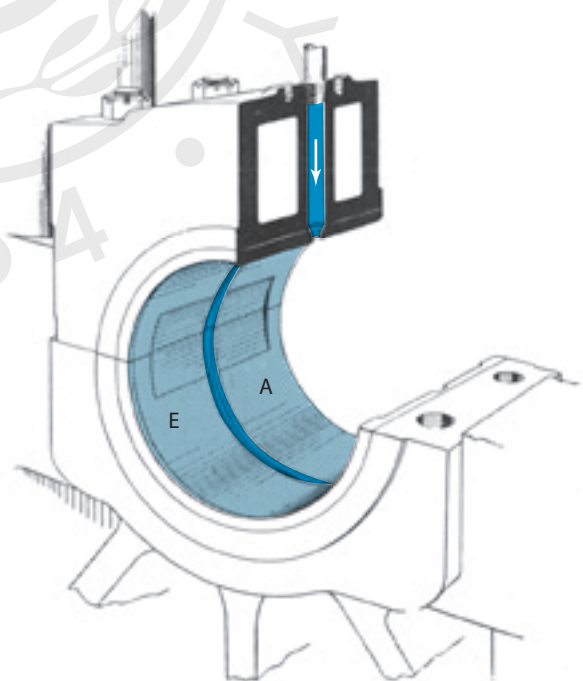
### ΦΑΣΗ III

Η αντλία λιπαντικού, που κινείται από τον άξονα, στέλνει αρκετό λιπαντέλαιο, ώστε να συμπληρώσει τα κενά που δημιουργούνται κατά την περιστροφή ανάμεσα στο κομβίο και στο έδρανο. Η λίπανση γίνεται τώρα υγρή (βλ. § 13.5).

### ΦΑΣΗ IV

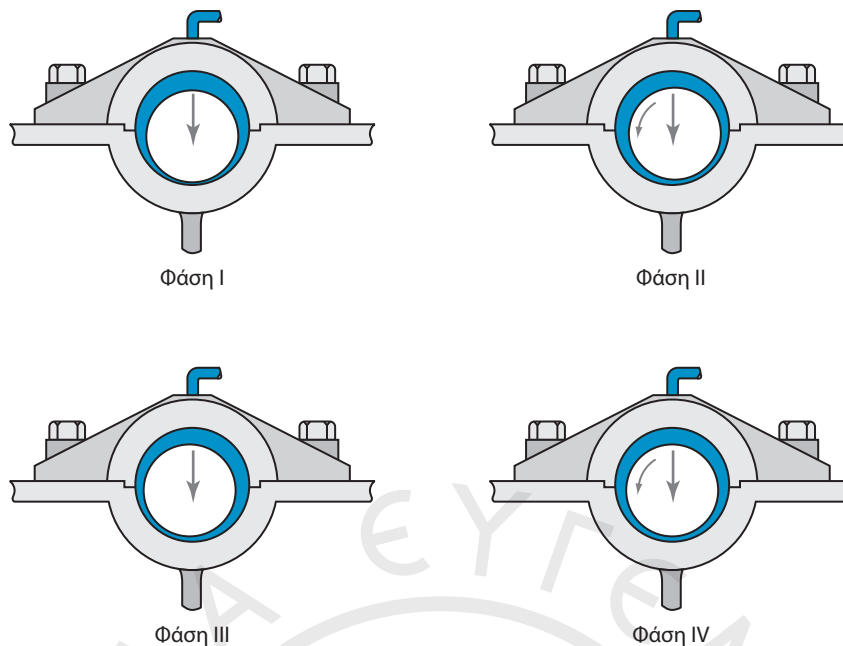
Ο άξονας έχει αποκτήσει τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής, οπότε το πάχος της μεμβράνης έχει αποκτήσει τιμές που να αντέχουν στα αναπτυσσόμενα φορτία. Από τη φυγόκεντρη δύναμη που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή, η μέγιστη τιμή πίεσης μετατοπίζεται προς το δεξιό μέρος του τριβέα (βλ. §13.6).

Τα κύρια φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του λιπα-



**Σχ. 16.4**

Λίπανση τριβέων



Σχ. 16.5

ντελαίου, που προορίζεται για τη λίπανση τριβών, αναγράφονται στον πίνακα 16.1.

### 16.3.3 Λίπανση κυλίνδρου

Η λίπανση των κυλίνδρων στις μηχανές diesel έχει ως σκοπό:

1) Την ελάττωση των τριβών μεταξύ των ελατηρίων που περιβάλλουν το έμβολο και των τοιχωμάτων του χιτωνίου. Έτσι και οι μηχανικές φθορές περιορίζονται και ο βαθμός απόδοσης βελτιώνεται.

2) Την ψύξη.

3) Τη στεγανοποίηση των κυλίνδρων, ώστε να εμποδίζεται η διαφυγή καυσαερίων προς τον στροφαλοθάλαμο.

4) Την προστασία από διάβρωση.

Η λίπανση του κυλίνδρου γίνεται συνήθως με δυο τρόπους:

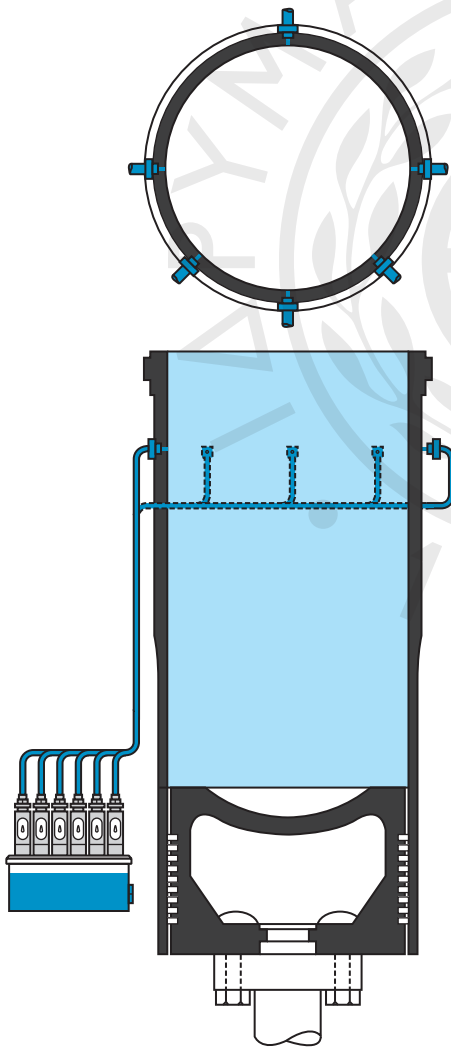
1) **Με εκτίναξη λαδιού** που εφαρμόζεται κυρίως στις ταχύστροφες μηχανές, χωρίς ζύγωμα, οι οποίες έχουν κοινό δίκτυο λίπανσης με τους τριβείς. Ένα μέρος του λιπαντικού, μετά τη λίπανση των τριβών, επιστρέφοντας στη δεξαμενή με τη βαρύτητα, παρασύρεται και εκτινάσσεται, από τον περιστρεφόμενο στροφαλοφόρο άξονα. Ένα μεγάλο μέρος από το λιπαντέλαιο που εκτινάσσεται καταλήγει στα χιτώνια των κυλίνδρων, τα οποία και λιπαίνει διά μέσου των ελατηρίων. Η διάταξη αυτή, που εικονίζεται στο σχήμα 16.3, είναι απαρχαιωμένη και δεν χρησιμοποιείται

πια. Μπορεί να τη συναντήσει κάποιος σε παλιού τύπου μηχανές.

2) **Με μηχανικούς λιπαντήρες** (λουμπρικέτες) που είναι ειδικές αντλίες για σταγονομετρική λίπανση των κυλίνδρων και χρησιμοποιούνται σε όλες τις αργόστροφες πετρελαιομηχανές με ζύγωμα. Οι αντλίες αυτές ενεργοποιούνται από τη μηχανή με ειδικούς κνώδακες. Η εισαγωγή του λαδιού γίνεται από ειδικά διαμορφωμένες στον κύλινδρο λαδότρυπες (quills), 6 ως 8 τον αριθμό, που βρίσκονται στο ύψος μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου ελατηρίου συμπίεσης, όταν το έμβολο βρίσκεται στο κάτω νεκρό σημείο (ΚΝΣ) της διαδρομής του. Έτσι το έμβολο, καθώς ανεβαίνει προς το ΑΝΣ συμπαρασύρει το λάδι, λιπαίνοντας με τον τρόπο αυτό τον κύλινδρο (σχ. 16.6). Στις δίχρονες μηχανές το λάδι καταθλίβεται σε σημεία, που βρίσκονται στη ζώνη μεταξύ των δυο κατώτερων ελατηρίων του εμβόλου, όταν αυτό βρίσκεται στο ΑΝΣ, γιατί σε χαμηλότερα σημεία το λάδι θα διαφεύγει από τις θυρίδες με επιβλαβή αποτελέσματα, τόσο για τη λίπανση όσο και για τη ρύπανση της μηχανής.

Το λιπαντικό που χρησιμοποιείται για τη λίπανση των κυλίνδρων των ταχύστροφων μηχανών έχει την ίδια ποιότητα και καλύπτεται από τις ίδιες προδιαγραφές, όπως και το λιπαντικό των τριβών. Τέτοιες είναι οι προδιαγραφές MIL-PRF-2104 και MIL-L-46152 που περιέχονται στους πίνακες 16.2 και 16.3. Στις αργόστροφες βαριές μηχανές με ζύγωμα, όπου η λίπανση

των κυλίνδρων γίνεται από χωριστό δίκτυο που τροφοδοτείται από ιδιαίτερη δεξαμενή, το λιπαντέλαιο διαφέρει από εκείνο που λιπαίνει τους τριβείς κυρίως ως προς το ιξώδες (SAE 40 ή 50) και την ενίσχυση με αλκαλικά πρόσθετα που ανεβάζουν την συνολική αλκαλικότητα (TBN) σε πολύ υψηλές τιμές (60-70). Αυτό έχει ως σκοπό να εξουδετερώσει τα οξέα που παράγονται από τα καυσαέρια των μηχανών diesel, ιδίως όταν χρησιμοποιούν βαριά καύσιμα με βάση το μαζούτ, που περιέχουν πολύ θείο (μέχρι 3%), πράγμα που κατ' εξοχή συμβαίνει με τις αργόστροφες ναυτικές πετρελαιομηχανές. Τα λιπαντικά αυτά ονομάζονται **κυλινδρέλαια μηχανών diesel** (diesel cylinder oils) και δεν πρέπει να συγχέονται με τα κυλινδρέλαια των ατμομηχανών, που είναι τελείως διαφορετικά ως προς τη σύνθεση και τις ιδιότητές τους.



Σχ. 16.6

Μηχανική λίπανση κυλίνδρων

### 16.3.4 Λίπανση στροβιλοφυσητήρων

Οι στροβιλοφυσητήρες, που όπως είναι γνωστό αποτελούν βασικό τμήμα όλων σχεδόν των σύγχρονων πετρελαιομηχανών, λιπαίνονται από δίκτυο που συνδέεται με το κύριο δίκτυο λίπανσης των τριβών κ.λπ. της μηχανής. Το λιπαντέλαιο των στροβιλοφυσητήρων το παίρνουμε από τον σωλήνα του δικτύου λίπανσης των ζυγμάτων, απ' όπου καταθλίβεται σε δεξαμενή ύψους, που βρίσκεται αρκετά μέτρα πάνω απ' τον άξονα του στροβίλου. Από τη δεξαμενή αυτή λιπαίνονται οι στροβιλοφυσητήρες με στατική πίεση. Η όλη διάταξη λίπανσης των στροβιλοφυσητήρων περιγράφεται με λεπτομέρεια στο βιβλίο του Ιδρύματος Ευγενίδου «Μηχανές Εσωτερικής Καύσης», τόμ. Α.

### 16.4 Προδιαγραφές λιπαντελαίων μηχανών diesel

Η ποιότητα των λιπαντελαίων που προορίζονται για τις μηχανές diesel, καλύπτεται από διεθνείς προδιαγραφές που εκδίδουν διάφοροι κρατικοί οργανισμοί, όπως:

1) Στις ΗΠΑ οι στρατιωτικές προδιαγραφές.

α) MIL-PRF-2104

β) MIL-L-46152

γ) MIL-L-45199

δ) MIL-PRF-21260

ε) MIL-PRF-9000

Τα κύρια χαρακτηριστικά των δυο πρώτων προδιαγραφών, δηλαδή του (MIL-PRF-2104 και MIL-L-46152) αναγράφονται αντίστοιχα στους πίνακες 16.2 και 16.3.

Χαρακτηρίζονται συνήθως με γράμματα του αγγλικού αλφαβήτου Α, Β, C, D, Ε κ.λπ., που δείχνουν την εξέλιξη της προδιαγραφής με την πάροδο του χρόνου.

2) Στη Μεγάλη Βρετανία.

α) DEF-2101-B

β) OMD-112

γ) OMD-113(O-278)

3) Στη Γερμανία.

– Οι προδιαγραφές DIN

Προδιαγραφές όμως εκδίδουν και οι μεγάλες κατασκευαστικές εταιρείες (Ford, General Motors, Caterpillar, Fiat κ.λπ.) τις οποίες συνιστούν στους πελάτες τους.

Γενικότερα όμως, οι κατασκευαστές όλων των πετρελαιομηχανών, στα εγχειρίδια λειτουργίας, που συνοδεύουν κάθε μηχανή, καθορίζουν τους τύπους των λιπαντικών που συνιστούν ιδιαίτερα, ως το καταλληλότερο για κάθε περίπτωση. Ο μηχανικός είναι υπο-



χρεωμένος να συμμορφώνεται σχολαστικά ως προς τον τύπο του λιπαντικού που ο κατασκευαστής υποδεικνύει, όχι όμως και ως προς την εταιρεία παραγωγής των λιπαντικών. Με βάση τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υποδεικνυόμενου λιπαντικού, θα πρέπει να αναζητεί το προϊόν της εταιρείας εκείνης, που συνδυάζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα ως προς την ποιότητα, το κόστος και την αξιοπιστία της εταιρείας.

Εκτός από τα συνηθισμένα ορυκτέλαια για τη λίπανση των κυλίνδρων χρησιμοποιούσαν στο παρελθόν και γαλακτώματα, δηλαδή διασπορά σε μια φάση λαδιού σε νερό. Το νερό έχει τη δυνατότητα να συγκρατεί σε διάλυση μεγάλα ποσά υδατοδιαλυτών αλκαλικών πρόσθετων, που μπορούν να εξουδετερώσουν αποτελεσματικά τα όξινα προϊόντα της καύσης. Έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα να διατηρούν τον κύλινδρο σε πολύ καθαρότερη κατάσταση σε σύγκριση με τα αμιγή ορυκτέλαια. Μειονεκτούν όμως κατά την ευπάθεια που παρουσιάζουν στο διαχωρισμό των δύο φάσεων. Στην αγορά κυκλοφορούν με διάφορα εμπορικά ονόματα, όπως είναι π.χ. το Alexia oil της εταιρείας Shell, το Tro - Mar DX της ESSO κλπ. Σήμερα όμως έχουν βρεθεί πρόσθετα που διαλύονται στα ορυκτέλαια και τους προσδίδουν υψηλές τιμές TBN.

### 16.5 Νεότερες εξελίξεις στη λίπανση των πετρελαιομηχανών

Η ποιότητα των βαριών καυσίμων με βάση το μαζούτ, που χρησιμοποιούνται σήμερα στις ναυτικές πετρελαιομηχανές, γίνεται ολοένα και χαμηλότερη, στην προσπάθεια να εξασφαλισθούν πιο φθηνά καύσιμα. Αυτό αποβλέπει στη μείωση του κόστους των θαλάσσιων μεταφορών και στον αποτελεσματικότερο ανταγωνισμό των μεταφορών γενικότερα, έχει όμως δυσμενείς επιπτώσεις στη λειτουργία και στη συντήρηση των μηχανών.

Οι σημαντικότερες από τις ιδιότητες των βαριών καυσίμων, που σήμερα χρησιμοποιούνται στις μηχανές diesel, είναι:

1) Η **περιεκτικότητα σε θείο**, που μπορεί να φθάσει μέχρι 3% αλλά υπάρχει περιορισμός στο 0,5% από 1/1/2020.

Το παράγόμενο κατά την καύση θειικό οξύ αποτελεί σοβαρό κίνδυνο διάβρωσης, αν δεν αντιμετωπισθεί κατάλληλα.

2) Η **ποιότητα καύσης**, δηλαδή ο **αριθμός κετσόνιου**, που στα βαριά καύσιμα είναι γενικά πολύ χαμηλός (CN 20) και αυξάνει την καθυστέρηση ανάφλεξης

της. Αυτό έχει ως συνέπεια μεγαλύτερο **κτύπημα**, που οφείλεται σε απότομη αύξηση της πίεσης μετά την ανάφλεξη, και περισσότερη ρύπανση από τα προϊόντα ατελούς καύσης.

3) Η **πυκνότητα** που μπορεί να φθάσει το 1,00 tn/m<sup>3</sup> δημιουργεί προβλήματα απομάκρυνσης του νερού κατά το φυγοκεντρικό διαχωρισμό.

4) Η **αστάθεια** του καυσίμου, που μπορεί να οδηγήσει σε αποχωρισμό ασφαλτικών καταλοίπων, δημιουργώντας προβλήματα κατά την καύση. Αυτή οφείλεται κυρίως στο ότι κατά τη διέλευση των ασφαλτικών καταλοίπων από τους καυστήρες μεταβάλλεται η γωνία έκτοξευσης του πετρελαίου από τους καυστήρες και το βάθος δεισδυσσης στον θάλαμο καύσης, με συνέπεια να παρατηρούνται θερμοκρασίες υψηλότερες από τις κανονικές.

Τα προβλήματα αυτά, που προκαλούνται από τη χαμηλή ποιότητα των καυσίμων που τροφοδοτούνται στις σύγχρονες ναυτικές πετρελαιομηχανές, μπορούν να αντιμετωπισθούν με δυο κυρίως τρόπους:

1) **Με καλύτερη σχεδίαση και κατασκευή των μηχανών**, κυρίως στους παρακάτω τομείς:

α) Στο σύστημα έγχυσης του καυσίμου,

β) στο σχήμα και τις διαστάσεις του θαλάμου καύσης,

γ) στη θερμοκρασία του εισαγόμενου αέρα, με κατάλληλη προθέρμανση,

δ) στη βελτίωση των στροβιλοφυσητήρων, για να παρέχουν περισσότερο αέρα και μάλιστα με κατάλληλο στροβιλισμό, ώστε να εξασφαλίζει καλύτερη καύση και

ε) στη χρησιμοποίηση καλύτερης ποιότητας υλικών για την κατασκευή των εμβόλων, των ελατηρίων, των χιτωνίων και των βαλβίδων.

2) **Με τη βελτίωση της ποιότητας των λιπαντικών**, κυρίως ως προς τις ακόλουθες ιδιότητες:

α) **Καλύτερη και αποτελεσματικότερη απορρυπαντικότητα**, ώστε να απομακρύνονται εύκολα όλα τα ανθρακούχα κατάλοιπα που αποβάλλονται από τα καύσιμα. Αυτό κατορθώνεται με ενίσχυση των λιπαντέλαιων με περισσότερα απορρυπαντικά πρόσθετα (detergents) (βλ. § 14.4.5).

β) **Μεγαλύτερη θερμική σταθερότητα**, για να αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά οι αυξημένες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την καύση των βαριών καυσίμων. Για τον σκοπό αυτό τα λιπαντικά των εδράνων ενισχύονται με αντιοξειδωτικά πρόσθετα, που εμποδίζουν την αλλοίωσή τους από την επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών.

γ) **Αυξημένη αλκαλικότητα**, αρκετή ώστε να εξουδετερώνεται όλο το θειικό οξύ που παράγεται από την καύση των θειούχων ενώσεων που περιέχουν τα βαριά καύσιμα. Η τιμή του TBN, προκειμένου για κυλινδρέλαια κυμαίνεται σήμερα γύρω στο 70 με τάση να ξεπεράσει το 100. Στις μηχανές με ζύγωμα, όταν έχουν κοινό δίκτυο λίπανσης για τους κυλίνδρους και για τα έδρανα, η ολική αλκαλικότητα του λιπαντέλαιου (TBN) κυμαίνεται από 25 ως 30.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η αύξηση της ολικής αλκαλικότητας (TBN), που προέρχεται από την αύξηση της αναλογίας των αλκαλικών προσθέτων, δεν είναι απλή υπόθεση. Απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή από τις βιομηχανίες που παράγουν ορυκτέλαια για τη λίπανση των πετρελαιομηχανών.

Η υψηλή περιεκτικότητα των αλκαλικών προσθέτων, μπορεί να έχει τις ακόλουθες ανεπιθύμητες συνέπειες:

- Τον σχηματισμό γαλακτωμάτων με το νερό, που αναπόφευκτα αναμειγνύεται με το λιπαντικό (από τα γαλακτώματα αυτά το νερό δύσκολα αποχωρίζεται, πράγμα που είναι εντελώς ανεπιθύμητο για τη μηχανή).
- Τις δυσχέρειες στο φιλτράρισμα του λιπαντέλαιου, που οφείλονται στην επίδραση των αλκαλικών προσθέτων στα προϊόντα της οξειδωσης, στα προϊόντα της επίδρασης του νερού και στον σχηματισμό γαλακτώματος, και
- στην υδρόλυση των χημικών προσθέτων, από

την οποία παράγονται ανόργανα συστατικά (π.χ. ασβεστίου) που στα αλκαλικά πρόσθετα υπήρχαν σε μορφή οργανομεταλλικών ενώσεων. Με την υδρόλυση επέρχεται μια πολύ γρήγορη μείωση της ολικής αλκαλικότητας (TBN) του λιπαντικού, και έτσι η εξουδετέρωση των όξινων συστατικών των καυσαερίων ( $SO_2$ ,  $NO_x$ ) είναι αμφίβολη.

Τα παραπάνω προβλήματα μελετώνται ήδη προσεκτικά από τους κατασκευαστές λιπαντελαίων για τις ΜΕΚ, ώστε ο αριθμός TBN, που τόσο μεγάλη σημασία έχει για την ποιότητά τους, να μπορεί να διατηρείται υψηλός χωρίς το ενδεχόμενο να εμφανισθούν τα προβλήματα αυτά κατά τη χρήση του λαδιού στη μηχανή.

δ) **Αντοχή στην πίεση**, που οφείλεται στα υψηλά φορτία των σύγχρονων αργόστροφων μεγάλης ιπποδύναμης ναυτικών πετρελαιομηχανών. Από την ιδιότητα αυτή εξαρτάται η διατήρηση της λιπαντικής μεμβράνης στα λιπαινόμενα μέρη της μηχανής. Και η ιδιότητα αυτή εξασφαλίζεται με την προσθήκη καταλλήλων χημικών προσθέτων.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες (ποιότητα λιπαντικών και σχεδίαση-κατασκευή της μηχανής), πρέπει να συνεργάζονται κατάλληλα, ώστε να αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά τα δυσμενή αποτελέσματα από τη χρήση των χαμηλής ποιότητας, αλλά φθηνών καυσίμων στις σύγχρονες ναυτικές πετρελαιομηχανές.



### 17.1 Αίτια των αλλοιώσεων

Η προοδευτική αλλοίωση της ποιότητας των λιπαντικών κατά τη χρήση τους είναι ως ένα βαθμό, αναπόφευκτη και επιβάλλει τον περιοδικό έλεγχο της ποιότητάς τους, από την οποία εξαρτάται η ίδια η ζωή της μηχανής.

Τα αίτια των αλλοιώσεων των λιπαντέλαιων μπορεί να καταταγούν σε δύο κατηγορίες, σε **φυσιολογικά αίτια** και σε **αίτια**, που οφείλονται σε **αντικανονική ή ανώμαλη λειτουργία της μηχανής**.

#### 17.1.1 Φυσιολογικά αίτια αλλοιώσεων των λιπαντικών

Παρά την εξαιρετική σταθερότητα του μορίου των λιπαντέλαιων, που την οφείλουν στη δομή τους (υδρογονάνθρακες), η βαθμιαία αλλοίωσή τους είναι αναπόφευκτη και οφείλεται στις συνθήκες κάτω από τις οποίες το λιπαντικό επιτελεί τον προορισμό του.

Τα κυριότερα αίτια της φυσιολογικής αλλοιώσεως είναι τα εξής:

#### 1) Η επαφή με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα

Αυτή προκαλεί βαθμιαία οξείδωση του μορίου των υδρογονανθράκων από την οποία σχηματίζονται οξυγονούχες ενώσεις με όξινο χαρακτήρα, ενώ ταυτόχρονα δημιουργείται πολυμερισμός του μορίου τους. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη διαβρωτικών δράσεων στα μέταλλα, και τον σχηματισμό λάσπης, που επιδρούν στην ικανότητα του λιπαντικού να εκτελέσει τον σκοπό του.

Η έκταση και ο βαθμός των αλλοιώσεων αυτών εξαρτάται από τις συνθήκες, κάτω από τις οποίες το λιπαντικό εργάζεται, καθώς και από την ποιότητά του. Το πρόβλημα της οξείδωσης των λιπαντικών αντιμετωπίζεται με τα κατάλληλα αντιοξειδωτικά πρόσθετα, που επιβραδύνουν ή και αναστέλλουν τελείως την οξείδωση. Αν η αλλοίωση προχωρήσει πέρα από ορισμένο βαθμό, όπως συνάγεται κυρίως από την αύξηση της οξύτητας, του ιξώδους και του αριθμού κατακρήμνισης (βλ. § 12.13), το λιπαντικό πρέπει να αντικατασταθεί άμεσα.

#### 2) Επίδραση θερμοκρασίας

Οι υψηλές θερμοκρασίες τις οποίες το λιπαντικό συναντά κατά τη διαδρομή του στο δίκτυο λίπανσης και κυρίως η διαρκής αυξομείωση της θερμοκρασίας, συχνά επιταχύνουν την αλλοίωση από την οξειδωτική δράση του αέρα και αυξάνουν τις συνέπειες που αναφέρθηκαν παραπάνω και μάλιστα σε συντομότερο χρονικό διάστημα.

#### 3) Καταλυτική δράση των μετάλλων

Τα μεταλλικά μέρη των μηχανών με τα οποία το λιπαντικό έρχεται σε επαφή, καθώς και τα μεταλλικά ριπίσματα από τις εσωτερικές φθορές της μηχανής, επιταχύνουν την αλλοίωση του λαδιού. Το πορώδες των μετάλλων φέρνει σε κοντινότερη επαφή το λιπαντικό με το οξυγόνο του αέρα και τα θερμά καυσαέρια και επιταχύνει τη χημική αντίδραση της αλλοίωσης του λιπαντικού.

Όλα τα προϊόντα που παράγονται από την αλλοίωση του λιπαντικού είναι αδιάλυτα στο λιπαντικό και είτε κυκλοφορούν ως αιώρημα σ' αυτό είτε καθιζάνουν ως λάσπη, ή τέλος υφίστανται θερμική διάσπαση (κυρίως στις MEK) και προκαλούν το σχηματισμό εξανθρακωμάτων.

Τα πρόσθετα (additives) με τα οποία αντιμετωπίζονται οι ανωμαλίες από τις παραπάνω αλλοιώσεις είναι:

α) Τα **αντιοξειδωτικά πρόσθετα** (anti-oxidants), που παρεμποδίζουν την αρχική οξείδωση ή την εξέλιξή της στο λιπαντέλαιο από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο και τους άλλους οξειδωτικούς παράγοντες, όπως θερμοκρασιακές εναλλαγές και καταλυτική δράση των μετάλλων.

β) Οι **επιβραδυντές ή χαλινωτές οξείδωσης** (oxidation inhibitors), που επιβραδύνουν την οξείδωσή του.

γ) Τα **απορρυπαντικά (καθαριστικά ή διασκορπιστικά)** πρόσθετα (detergents), που διατηρούν τα αδιάλυτα προϊόντα αιωρούμενα μέσα στο λιπαντέλαιο σε λεπτό διαμερισμό, εμποδίζοντας έτσι την επικάθη-

σή τους στις εσωτερικές επιφάνειες των κυλίνδρων, άρα και τη ρύπανσή τους. Σημαντικό μέρος των ακαθαρσιών και κυρίως των εξανθρακωμάτων, που τα πρόσθετα κρατούν διασπαρμένα στη μάζα του λιπαντικού, συγκρατούνται από τα φίλτρα. Τα υπόλοιπα κυκλοφορούν στο δίκτυο λίπανσης χωρίς να προκαλούν καμιά ανωμαλία. Έτσι το λιπαντικό των MEK, που περιέχει απορρυπαντικά πρόσθετα, αμέσως μετά τις πρώτες ώρες λειτουργίας αποκτά σκούρο καστανοκόκκινο χρώμα, που όχι μόνο δεν προκαλεί ανησυχία, αλλά αποτελεί και ένδειξη ότι το λιπαντικό επιτελεί αποτελεσματικά τον προορισμό του.

Περισσότερη ανάγκη από τα παραπάνω πρόσθετα έχουν τα λιπαντικά των MEK που εργάζονται κάτω από βαριές συνθήκες φορτίου και θερμοκρασιών. Τα λιπαντικά που ενισχύονται με τα πρόσθετα αυτά ανήκουν στις κατηγορίες DG και DS ή HD (βλ. § 16.1).

δ) Οι **επιβραδυντές διάβρωσης** (corrosion inhibitors), που παρεμποδίζουν τη διάβρωση των μετάλλων.

### 17.1.2 Λειτουργικά αίτια των αλλοιώσεων

Εκτός από τα παραπάνω φυσιολογικά αίτια, αλλοίωση των λιπαντικών μπορούν να προκαλέσουν και τα ακόλουθα αίτια, που προέρχονται από λειτουργικές ανωμαλίες της μηχανής και που ο μηχανικός πρέπει έγκαιρα να επισημάνει και να αποκαταστήσει.

#### 1) Παρουσία νερού

Η παρουσία του νερού στα λιπαντέλαια μπορεί να είναι φυσιολογική, προερχόμενη από την υγρασία του αέρα ή από τη συμπύκνωση ατμών (ατμοσφαιρικός), συνθηθέστερα όμως προδίδει διαρροή από το δίκτυο ψύξης της μηχανής. Τα ανώτατα επιτρεπτά όρια περιεκτικότητας σε νερό των καινούργιων λιπαντέλαιων MEK είναι 0,1%. Για τα λάδια των μηχανών ατμού δεν καθορίζονται ανώτατα όρια, αρκεί ο αποχωρισμός του νερού με φυγοκέντριση να είναι εύκολος. Αυτό εξαρτάται από τα άλλα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του λιπαντικού και κυρίως από την ικανότητα **απογαλάκτωσης**. Ο χρόνος που απαιτείται για τον αποχωρισμό των δυο φάσεων έχει ιδιαίτερη σημασία, κυρίως για τα τουρμπινέλαια, και καθορίζεται με αυστηρότητα από τις ειδικές προδιαγραφές. Στα λιπαντέλαια των MEK, νερό πάνω από 0,5%, αποτελεί αιτία αλλοίωσης του λιπαντέλαιου, αφού επιταχύνει την οξείδωση και διευκολύνει τη διαβρωτική δράση πάνω στα μέταλλα. Πρέπει να καταβάλλεται προσπάθεια απομάκρυνσης νερού με φυγοκέντριση. Μεγαλύτερη σημασία έχει η περιεκτικότητα του νερού σε NaCl, αφού αυτό επιτείνει τη διαβρωτική δράση στα μέταλλα.

#### 2) Καυσαέρια

Τη διαφυγή των καυσαερίων προς τον χώρο του λιπαντέλαιου εμποδίζει κατ' αρχάς η στεγανότητα του χώρου καύσης, την οποία εξασφαλίζουν τα ελατήρια του εμβόλου μαζί με το λιπαντικό. Ωστόσο η επαφή των καυσαερίων με το λιπαντέλαιο, προκαλεί την αλλοίωσή του λιπαντέλαιου, κυρίως λόγω της παρουσίας SO<sub>2</sub>, που το καθιστά όξινο και συνεπώς διαβρωτικό. Η υψηλή αλκαλικότητα (TBN) των κυλινδρέλαιων πετρελαιομηχανών, που πρέπει να ελέγχεται και να παρακολουθείται συνεχώς, εξουδετερώνει το SO<sub>2</sub> και τις δυσάρεστες για τη μηχανή συνέπειές του.

#### 3) Διαρροή καυσίμου

Η διαρροή καυσίμου αφορά στις MEK και οφείλεται στην κακή λειτουργία των καυστήρων πετρελαίου που μπορεί να προκαλέσει κίνδυνο έκρηξης στον στροφαλοθάλαμο από την επικίνδυνη μείωση του σημείου ανάφλεξης, την οποία προκαλεί η παρουσία του καυσίμου, ως πτητικότερου υγρού, μέσα στο λιπαντικό.

Μπορεί επίσης να προκαλέσει την αισθητή μείωση του ιξώδους, άρα και απώλεια της λιπαντικής ικανότητας του λιπαντέλαιου.

Λιπαντικό που περιέχει καύσιμο σε αναλογία πάνω από 5% πρέπει να παρακολουθείται συχνότατα και να εντοπίζονται τα αίτια της διαρροής καυσίμου, τα οποία και πρέπει να αποκαθίστανται άμεσα. Σε τέτοιες περιπτώσεις επιβάλλεται η αντικατάσταση του λιπαντικού.

Η παρουσία καυσίμου στα λιπαντέλαια ελέγχεται με τρεις τρόπους:

- α) Με άμεση μέτρηση του καυσίμου, που γίνεται με απόσταση με υδρατμούς,
- β) με μέτρηση του σημείου ανάφλεξης και
- γ) με μέτρηση του ιξώδους.

Στις δυο τελευταίες περιπτώσεις η περιεκτικότητα του λιπαντικού σε καύσιμο προκύπτει από τη σύγκριση των τιμών σημείου ανάφλεξης και ιξώδους προς τις αντίστοιχες τιμές του αμεταχείριστου λιπαντικού από το οποίο προέρχεται το δείγμα που λαμβάνεται από τη μηχανή (βλ. § 12.6).

#### 4) Πλημμελής λειτουργία των φίλτρων.

Αυτή οφείλεται σε απόφραξη ή γενικότερα σε κακή κατάσταση των φίλτρων και έχει ως αποτέλεσμα τη βαθμιαία ρύπανση του λιπαντικού με ξένες ύλες, τις οποίες τα φίλτρα δεν συγκρατούν. Ένδειξη της ανωμαλίας αυτής αποτελεί ο **αριθμός κατακρήμνισης** (§ βλ.

12.2). Σε πολλές περιπτώσεις, όταν η τιμή του δείκτη αυτού υπερβεί το 0,1 το λιπαντικό πρέπει να αντικατασταθεί.

## 17.2 Συνέπειες των αλλοιώσεων – Τρόπος αντιμετώπισης

Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω αιτιών που αλλοιώνουν το λιπαντέλαιο, το υποβαθμίζει ποιοτικά, σε βαθμό που να μην μπορεί πια να ανταποκριθεί στην κύρια αποστολή του, δηλαδή τη λίπανση των τριβόμενων επιφανειών. Αυτό οφείλεται στις συνέπειες που έχει η αλλοίωση του λιπαντικού, την οποία οι παράγοντες που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο προκαλούν. Οι συνέπειες αυτές μπορούν να συνοψισθούν στα εξής:

1) Αύξηση της οξύτητας, άρα και της διαβρωτικότητας.

2) Αύξηση του ιξώδους από την οξειδωση του λιπαντικού, σε βαθμό που μπορεί να επηρεάσει την αντλητικότητα και γενικά τη διακίνησή του στο δίκτυο λίπανσης,

3) Σχηματισμός αδιάλυτων προϊόντων πολυμερισμού, που εμποδίζουν τη σωστή λίπανση ή προκαλούν απόφραξη των φίλτρων.

4) Μείωση του ιξώδους λόγω διαρροής καυσίμου, που με τη σειρά της μειώνει την αντοχή της λιπαντικής μεμβράνης και δημιουργεί κίνδυνο έκρηξης στον στροφαλοθάλαμο της ΜΕΚ.

5) Ρύπανση από το νερό των ψυγείων.

6) Διαρροή καυσαερίων από κακή στεγανότητα των κυλίνδρων.

Τα παραπάνω δυσμενή αποτελέσματα για το λιπαντικό και τη μηχανή την οποία λιπαίνει, μπορούν να αντιμετωπισθούν με τους παρακάτω τρόπους:

1) Με **συχνές αναλύσεις δειγμάτων** για την εξακρίβωση της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το λιπαντικό. Οι αναλύσεις αυτές είτε γίνονται στο πλοίο, με τα εργαστηριακά μέσα που διαθέτει, είτε σε ειδικά εργαστήρια. Στη δεύτερη περίπτωση την παρακολούθηση της ποιότητας των λιπαντικών αναλαμβάνουν εργαστήρια συμβεβλημένα με τους προμηθευτές των λιπαντικών ή με την ιδιοκτήτρια εταιρεία του πλοίου. Συνήθως οι αναλύσεις γίνονται κάθε ορισμένες ώρες λειτουργίας της μηχανής, τις οποίες καθορίζει ο αρχιμηχανικός της εταιρείας.

2) Με τον **καθαρισμό**, στον οποίο το λιπαντικό υποβάλλεται συνεχώς κατά τη χρήση του, στο ίδιο το δίκτυο λίπανσης, που περιλαμβάνει τους φυγοκεντρικούς καθαριστήρες και τα φίλτρα.

3) Με την **αντικατάσταση** του λιπαντικού, όταν αυτό επιβάλλεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

## 17.3 Καθαρισμός του λιπαντικού κατά τη χρήση του

Στις περισσότερες μηχανές και κυρίως στις ΜΕΚ, το λιπαντικό υποβάλλεται σε συνεχή καθαρισμό κατά τη χρήση του, ώστε να είναι δυνατόν να παρατείνεται η χρήση του για όσο το δυνατό μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

Ο καθαρισμός γίνεται με δυο τρόπους:

1) Με τους φυγοκεντρικούς καθαριστήρες ή καθαριστές και

2) Με φίλτρα.

### 17.3.1 Φυγοκεντρικοί καθαριστήρες

Οι **φυγοκεντρικοί καθαριστήρες** ή **αποχωριστές De Laval**, όπως είναι γνωστοί από τον τύπο των συσκευών που χρησιμοποιούνται, επιταχύνουν το διαχωρισμό του νερού και των ξένων υλών που περιέχει το λιπαντέλαιο. Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ των ξένων υλών και του λιπαντικού, την οποία η φυγόκεντρη δύναμη πολλαπλασιάζει. Οι καθαριστήρες αποτελούνται βασικά από ένα κοίλο κυλινδρικό δοχείο, που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Μέσα στο δοχείο έρχεται το λιπαντικό που πρόκειται να καθαρισθεί. Η φυγόκεντρη δύναμη, που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή, αναγκάζει το νερό και τις ξένες ύλες να εναποθεθούν στην εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου απ' όπου και συνεχώς απομακρύνονται.

Οι φυγοκεντρικοί καθαριστήρες περιγράφονται λεπτομερώς στην παράγραφο 8.7.5. Είναι απαραίτητοι τόσο για τα λιπαντικά των μηχανών ατμού, από τα οποία αφαιρούν το νερό, όσο και για τα λιπαντέλαια των ΜΕΚ, στα οποία το νερό έχει την τάση να σχηματίζει γαλακτώματα.

Ο καθαρισμός των λιπαντέλαιων με τους φυγοκεντρικούς αποχωριστές διευκολύνεται, όταν το λιπαντέλαιο προθερμαίνεται στους 60–80°C. Τα αποτελέσματα του καθαρισμού είναι πολύ καλύτερα, αν το λιπαντικό παραμείνει σε ηρεμία πριν τον καθαρισμό του για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να κατακαθίσουν και να αποχωρήσουν οι βαρύτερες ξένες ύλες. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι δεξαμενές καθίζησης (settling tanks), στις οποίες τα βαρύτερα συστατικά, όπως νερό, λάσπη και ρινίσματα, κατακάθονται στον πυθμένα, απ' όπου εύκολα μπορούν να

απομακρύνονται. Η καθίζηση με τον τρόπο αυτό δεν είναι αποτελεσματική όταν το πλοίο βρίσκεται σε πορεία, έχει όμως πολύ καλύτερα αποτελέσματα όταν το πλοίο βρίσκεται σε ακινησία, γι' αυτό πρέπει να γίνεται εντατική εκμετάλλευση των περιόδων κατά τις οποίες το πλοίο βρίσκεται σε ακινησία. Ο φυγοκεντρικός καθαρισμός και το φιλτράρισμα που ακολουθούν μετά την καθίζηση, έχουν πολύ καλύτερα αποτελέσματα, αν μέσα στις δεξαμενές καθίζησης η θερμοκρασία του λαδιού διατηρείται στους 75–80°C.

Η απομάκρυνση των ακαθαρσιών με φυγοκέντριση συχνά διευκολύνεται με την προσθήκη νερού σε αναλογία 5% περίπου επί του λιπαντικού που φυγοκεντρείται. Το νερό αυτό πρέπει να έχει προθερμανθεί στην ίδια θερμοκρασία με εκείνη λιπαντικού. Έτσι το ζεστό νερό ξεπλένει κατά έναν τρόπο το λιπαντικό, από το οποίο απομακρύνει τις υδατοδιαλυτές ύλες, όπως είναι τα περισσότερα άλατα, που ενδεχομένως περιέχει. Απαιτείται όμως προσοχή για τα ενισχυμένα λιπαντικά, όταν τα πρόσθετα που περιέχουν είναι υδατοδιαλυτά ή έχουν την τάση να σχηματίζουν γαλακτώματα. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να ακολουθούνται προσεκτικά οι οδηγίες των εταιρειών από τις οποίες το πλοίο προμηθεύεται τα λιπαντικά.

Τα αποτελέσματα του φυγοκεντρικού καθαρισμού εξαρτώνται επίσης από τον ρυθμό με τον οποίο εργάζονται οι συσκευές καθαρισμού. Ο ρυθμός αυτός πρέπει να είναι τέτοιος, ώστε η απόδοση των καθαριστήρων να είναι γύρω στο 50% της δυναμικότητάς τους. Για παράδειγμα αν ένας φυγοκεντρικός καθαριστήρας έχει μέγιστη απόδοση 4.000 λίτρα την ώρα, ο καλύτερος διαχωρισμός των ξένων υλών γίνεται όταν ο καθαριστήρας αυτός εργάζεται με απόδοση 2.000 λίτρα την ώρα.

### 17.3.2 Φίλτρα

Όταν το μέγεθος των σωματιδίων των ξένων προσμείξεων ενός λιπαντικού είναι μικρότερο από συγκεκριμένα όρια, η απομάκρυνσή τους με φυγοκέντριση δεν είναι αποτελεσματική. Κατάλοιπα του είδους αυτού αφθονούν στα λιπαντέλαια MEK που περιέχουν **διασκορπιστικά πρόσθετα** (detergents) και πρέπει να απομακρύνονται. Ο καθαρισμός στην περίπτωση αυτή συμπληρώνεται με **φίλτρα**. Οι πιο κοινοί τύποι των φίλτρων αυτών περιγράφονται παρακάτω:

1) **Μεταλλικά φίλτρα** (strainers). Αυτά είναι μεταλλικά πλέγματα ή αυτοκαθαριζόμενοι επάλληλοι δίσκοι (autoclean), από τους οποίους διέρχεται ολόκληρη η ποσότητα του λιπαντέλαιου που κυκλοφορεί.

Στα φίλτρα αυτά συγκρατούνται οι ξένες ουσίες, των οποίων το μέγεθος είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος των ανοιγμάτων του μεταλλικού πλέγματος των φίλτρων. Τα φίλτρα αυτού του τύπου συγκρατούν ξένες ουσίες με μέγεθος μεγαλύτερο από 0,05mm (50μm). Οι ξένες ουσίες είναι εξανθρακώματα, προϊόντα οξείδωσης και ρινίσματα μετάλλων.

2) **Διηθητικά φίλτρα** (filters). Αυτά έχουν την ικανότητα να συγκρατούν σωματίδια μεγαλύτερα από 0,0025mm (2,5μm). Τέτοια είναι:

α) Σωματίδια που προέρχονται από τα εξανθρακώματα που αιωρούνται στα λιπαντικά που περιέχουν απορρυπαντικά πρόσθετα.

β) Σκόνες που προέρχονται από τα αέρια.

γ) Ασφαλτούχα κατάλοιπα που προέρχονται από την οξείδωση του λιπαντικού και

δ) πολύ λεπτά ρινίσματα που προέρχονται απ' τη φθορά των μετάλλων.

Τα διηθητικά αυτά φίλτρα, όπως και τα απορροφητικά, αποτελούνται στην απλούστατη μορφή τους από μια φύσιγγα κυλινδρικού σχήματος. Η φύσιγγα αυτή περιέχει ως απορροφητικό υλικό χαρτί, βαμβάκι, τσόχα ή διηθητική γη.

3) **Μαγνητικά φίλτρα**. Αποτελούνται από αλληπάλληλα δικτυωτά, που είναι μόνιμα μαγνητισμένα και συγκρατούν τα μεταλλικά ρινίσματα που έχουν μαγνητικές ιδιότητες (σίδηρος).

Η γενική συνδεσμολογία του δικτύου για τον καθαρισμό των λιπαντέλαιων μπορεί να γίνει κατά πολλούς τρόπους. Σημαντικότεροι είναι οι ακόλουθοι:

α) Ο **καθαρισμός με πλήρη ροή** (full-flow).

Ολόκληρη η ποσότητα του λιπαντικού κυκλοφορεί συνεχώς μέσα από τα φίλτρα, πράγμα που έχει τα καλύτερα αποτελέσματα ως προς τον βαθμό καθαρότητας που εξασφαλίζεται με τον τρόπο αυτό (σχ. 17.1). Μειονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ότι:

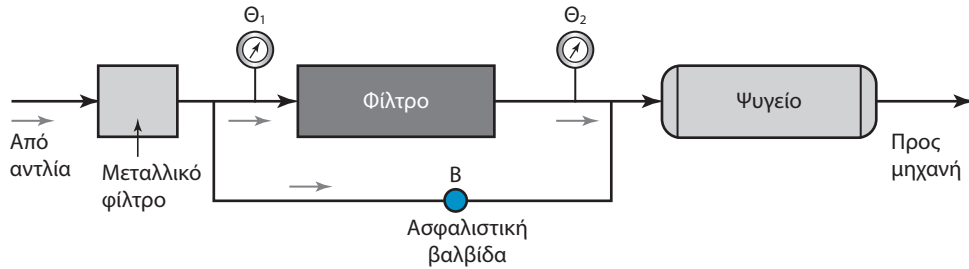
– Απαιτείται μεγάλος όγκος φίλτρων,

– η διάταξη αυτή καταναλώνει σημαντικά ποσά ισχύος και

– μπορεί να προκαλέσει καταστροφή της μηχανής σε περίπτωση απόφραξης, αν δεν λειτουργήσει η βαλβίδα εκτάκτου ανάγκης.

β) Ο **καθαρισμός μερικής ροής με ρείθρο** (shunt).

Η διάταξη αυτή εφαρμόζεται όταν κυκλοφορεί στο δίκτυο μεγάλη ποσότητα λιπαντικού, ένα μέρος της οποίας διοχετεύεται κατευθείαν στο ψυγείο, χωρίς να περάσει από τα φίλτρα (σχ. 17.2). Η κατανομή του λιπαντικού στους δύο κλάδους της διάταξης γίνεται με την ασφαλιστική βαλβίδα Β, που εξασφαλίζει την παροχή



Σχ. 17.1

Καθαρισμός πλήρους ροής (Full-flow)

λιπαντικού στη μηχανή, έστω και ακάθαρτου, στην περίπτωση απόφραξης των φίλτρων.

γ) **Ο καθαρισμός περιορισμένης ροής (by-pass).**

Με τη βοήθεια ενός ρυθμιστικού προφύσιου, μόνο ποσοστό 10–15% από το λιπαντικό που κυκλοφορεί στη μηχανή διοχετεύεται στα φίλτρα, ενώ το υπόλοιπο διά μέσου του ψυγείου οδηγείται στη μηχανή χωρίς φιλτράρισμα. Το αποτέλεσμα του καθαρισμού δεν είναι βέβαια τόσο ικανοποιητικό, όσο στις δυο προηγούμενες διατάξεις, αλλά η κυκλοφορία στο δίκτυο λίπανσης είναι πολύ πιο άνετη (σχ. 17.3).

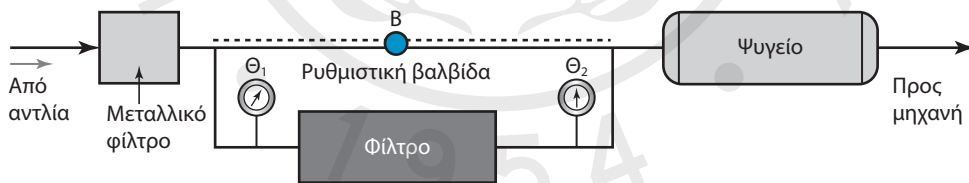
Όλες οι παραπάνω διατάξεις καθαρισμού εντάσσονται στο δίκτυο λίπανσης απ' το οποίο και εξαρτώνται άμεσα. Είναι όμως δυνατός ο καθαρισμός του λαδιού με **ανεξάρτητη κυκλοφορία**, που προβλέπει την ύπαρξη ιδιαίτερης αντλίας και δίκτυο καθαρισμού άσχετο προς το δίκτυο λίπανσης. Με τον τρόπο αυτό

επιβαρύνεται μεν η εγκατάσταση, αλλά το σύστημα λίπανσης αποκτά ανεξαρτησία από το σύστημα καθαρισμού, ώστε τυχόν βλάβη ή ανωμαλία του ενός να μην επηρεάζει το άλλο.

Η τοποθέτηση φίλτρων στο δίκτυο λίπανσης απαιτεί συνεχή επαγρύπνηση από το προσωπικό της μηχανής, λόγω του κινδύνου απόφραξης των φίλτρων, που θα μπορούσε να διακόψει ή να περιορίσει τη λίπανση, ανάλογα με τον τρόπο συνδεσμολογίας. Για το λόγο αυτό λαμβάνονται τα ακόλουθα μέτρα:

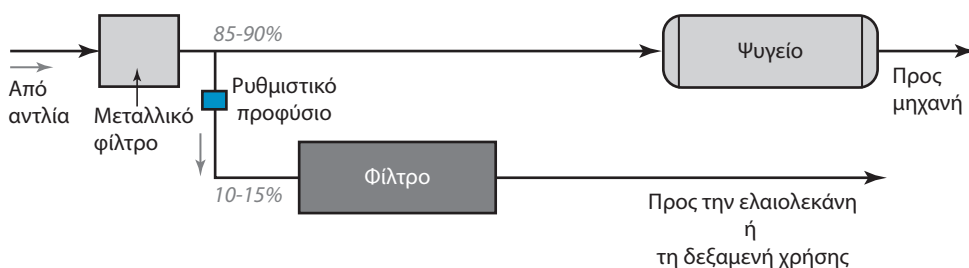
- συνεχής παρακολούθηση της διαφοράς πίεσης, που δείχνουν τα μανόμετρα  $\Theta_1$  και  $\Theta_2$ , που είναι τοποθετημένα πριν και μετά τα φίλτρα (σχ. 17.1 και 17.2) και

- τοποθέτηση ασφαλιστικής βαλβίδας, που επιτρέπει τη συνέχιση της ροής του λαδιού, έστω και ακάθαρτου, σε περίπτωση απόφραξης των φίλτρων.



Σχ. 17.2

Καθαρισμός μερικής ροής (Shunt)



Σχ. 17.3

Καθαρισμός περιορισμένης ροής (by-pass)

## 17.4 Αντικατάσταση του λιπαντικού

Όταν η αλλοίωση του λιπαντικού προχωρήσει πέρα από καθορισμένα όρια, όλα τα μέτρα που αναφέρονται στην παράγραφο 17.3 για τη διατήρηση ή την αποκατάσταση της ποιότητάς του, δεν έχουν κανένα αποτέλεσμα. Στην περίπτωση αυτή δεν απομένει παρά η αντικατάσταση του λιπαντικού με καινούργιο, καθώς η χρήση του αλλοιωμένου λιπαντικού μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες στη μηχανή.

Τα όρια ποιότητας, πέρα από τα οποία επιβάλλεται η αντικατάσταση, δεν είναι σαφώς καθορισμένα και συχνά διευρύνονται για λόγους οικονομίας. Το κόστος αντικατάστασης όλου του λιπαντέλαιου μιας μηχανής, που σε μερικές περιπτώσεις φθάνει τους 50 τόνους, είναι πολύ υψηλό, παρόλο που το κόστος αυτό αντισταθμίζεται από τις βλάβες που θα μπορούσε να προκαλέσει στη μηχανή η λίπανση με ακατάλληλο λιπαντικό. Την πολιτική των διαφόρων εταιρειών στον τομέα αυτό καθορίζει ο αρχιμηχανικός της εταιρείας στην οποία ανήκει το πλοίο, με γνώμονα το συμφέρον της εταιρείας.

Ενδεικτικά, τα όρια τιμών για μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά των λιπαντέλαιων, πέρα από τα οποία συνιστάται αντικατάσταση, είναι τα παρακάτω:

### 1) Λιπαντέλαια MEK.

|  |     |
|--|-----|
| Αριθμός κατακρήμνισης (μέγιστος)       | 0,1 |
| Περιεκτικότητα σε νερό, % (μέγιστη)    | 0,5 |
| Περιεκτικότητα σε καύσιμο, % (μέγιστη) | 5,0 |

### 2) Τουρμπινέλαια.

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| Αριθμός εξουδετέρωσης (μέγιστος) | 0,5  |
| Δοκιμή διάβρωσης                 | pass |

Η **δοκιμή διάβρωσης** (rust prevention test) γίνεται με παρατεταμένη επίδραση, για 20 h, δείγματος του λιπαντικού σε πρότυπα δοκίμια από χάλυβα σε θερμοκρασία 60°C. Σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D665-19 στο λιπαντικό προστίθεται νερό και το χαλύβδινο δοκίμιο περιστρέφεται στο μείγμα νερού-λιπαντικού επί 20 h. Η δοκιμή χαρακτηρίζεται **επιτυχής** (pass), αν στην επιφάνεια των χαλύβδινων δοκιμίων δεν εμφανισθούν οξειδώσεις, πέρα από ορισμένα όρια, που καθορίζονται με πρότυπα δοκίμια, με τα οποία γίνεται η σύγκριση.

Οι παραπάνω δοκιμές των λιπαντέλαιων πρέπει να γίνονται κάθε φορά που συμπληρώνονται ορισμένες ώρες λειτουργίας του λιπαντικού. Οι ώρες αυτές καθορίζονται επίσης από τον αρχιμηχανικό της εταιρείας του πλοίου, λαμβάνονται όμως υπόψη και οι υποδείξεις του προμηθευτή των λιπαντικών. Ο περιοδικός αυτός έλεγχος γίνεται κατά κανόνα από 500 – 1.000 h

για μερικές μηχανές diesel, ενώ ο αριθμός των ωρών είναι πολύ μεγαλύτερος για τους ατμοστροβίλους. Σε ειδικές περιπτώσεις απαιτείται έκτακτος έλεγχος, όπως μετά από μια επισκευή ή μια αντικατάσταση φίλτρων, ή όταν παρατηρηθεί μια ασυνήθιστη συχνότητα αλλοιώσεων του λιπαντικού, οπότε επιβάλλεται ο εντοπισμός της αιτίας και η αποκατάσταση της.

Συμπεράσματα για τη σχέση μηχανής-λιπαντέλαιου, μπορούν να εξαχθούν και από άλλα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του λιπαντικού, όπως τέφρα, ιξώδες, σημείο ροής και εξανθρακώματα. Στον πίνακα 17.1 αναγράφονται μερικές από τις πιο συνηθισμένες περιπτώσεις διαμόρφωσης των τιμών στα χαρακτηριστικά των λιπαντικών:

1) Όταν είναι καινούργια και

2) κατά τη διάρκεια της χρήσης τους και αφορούν κυρίως σε MEK.

Στη δεύτερη περίπτωση οι τιμές των χαρακτηριστικών του λιπαντικού μπορούν να οδηγήσουν στον εντοπισμό των αιτιών της ανωμαλίας και τελικά στην εξουδετέρωσή τους.

Πριν από την αντικατάσταση του λιπαντικού από καινούργιο, πρέπει να προηγηθεί πλύση της μηχανής με λεπτόρρευστο λιπαντέλαιο, όπως SAE 10. Με το λιπαντέλαιο αυτό η μηχανή μπαίνει σε λειτουργία αφόρτιστη επί 10 λεπτά περίπου. Με τον τρόπο αυτό παρασύρονται ακαθαρσίες που έχουν συγκεντρωθεί στο δίκτυο λίπανσης, ώστε το καινούργιο λιπαντικό να μην μολυνθεί μ' αυτές. Αν το καινούργιο λιπαντικό είναι έντονα απορρυπαντικό, είναι πιθανό να παρασύρει κατάλοιπα από τη μηχανή με κίνδυνο απόφραξης των φίλτρων, πράγμα που απαιτεί σχολαστική παρακολούθηση των ενδείξεων των μανόμετρων πριν και μετά τα φίλτρα. Αν η διαφορά πιέσεων είναι σημαντική, απαιτείται καθαρισμός ή ακόμα και αντικατάσταση των φίλτρων. Είναι επίσης πιθανό, μετά την αντικατάσταση κοινού λιπαντελαίου σε μια MEK με λιπαντέλαιο έντονα απορρυπαντικό (HD), να παρουσιασθεί μείωση της συμπίεσης στους κυλίνδρους και δυσχέρεια εκκίνησης, που μπορεί να οφείλεται σε ξέπλυμα των ελατηρίων και των αυλακίων των εμβόλων από τα κατάλοιπα που είχαν συσσωρευθεί. Η ανωμαλία αυτή δεν οφείλεται βέβαια στο καλύτερης ποιότητας απορρυπαντικό λάδι, που απλώς επιταχύνει την εκδήλωση μιας φθοράς που προϋπήρχε.

## 17.5 Αναζωογόνηση των λιπαντέλαιων (re-refining)

Τα λιπαντέλαια που πρέπει να αντικατασταθούν



**Πίνακας 17.1**  
**Συνηθισμένα αίτια διαμόρφωσης χαρακτηριστικών λιπαντέλαιων**

| Κύρια φυσικοχημικά χαρακτηριστικά                         | Παράγοντες διαμόρφωσης του  |  |
|---|---|--|
|   | καινούργιο λιπαντικά  | μεταχειρισμένο λιπαντικά   |
| 1) Ιξώδες   | α) Είδος υδρογονανθράκων<br>β) Χημικά πρόσθετα  | α) Διαρροή καυσίμου<br>β) Προϊόντα οξείδωσης   |
| 2) Σημείο ροής  | α) Βελτιωτικά σημείου ροής<br>β) Παραφινικά συστατικά   | α) Διαρροή καυσίμου<br>β) Οξείδωση<br>γ) Ρύπανση με ξένες ουσίες   |
| 3) Πυκνότητα  | Δομή των υδρογονανθράκων που αποτελούν το λιπαντικά   | α) Διαρροή καυσίμου<br>β) Μόλυνση με ξένες ουσίες  |
| 4) Χρώμα  | Είδος κατεργασίας   | α) Καθαριστική ικανότητα του λιπαντέλαιου (απορρυπαντικά πρόσθετα)<br>β) Οξείδωση<br>γ) Καθαρότητα του συστήματος λίπανσης της μηχανής                 |
| 5) Σημείο ανάφλεξης                                       |   | Διαρροή καυσίμου   |
| 6) Αριθμός εξουδετέρωσης                                  | α) Κατεργασία του λιπαντικού: Διαδικασία παραγωγής ή αναζωογόνησης<br>β) Οργανομεταλλικά πρόσθετα | α) Οξείδωση<br>β) Ρύπανση από εξωτερικούς παράγοντες   |
| 7) Τέφρα  | Οργανομεταλλικά πρόσθετα  | α) Μόλυνση (από αντιεκτονωτικά πρόσθετα)<br>β) Φθορά της μηχανής<br>γ) Μόλυνση από εξωτερικούς παράγοντες (σκόνης)                                     |
| 8) Εξανθράκωμα  | Είδος υδρογονανθράκων   | α) Οξείδωση<br>β) Υπερθέρμανση<br>γ) Μόλυνση από εξωτερικές πηγές  |
| 9) Αριθμός κατακρήμνισης                                  | Ξένες ύλες, με τις οποίες το λιπαντικό μολύνεται κατά την παραγωγή ή την αναζωογόνηση             | α) Οξείδωση<br>β) Υπερθέρμανση<br>γ) Μόλυνση από εξωτερικές πηγές<br>δ) Παρουσία νερού από διαρροή στο σύστημα ψύξης του λιπαντικού ή από άλλες αιτίες |
| 10) Δοκιμή διάβρωσης (κυρίως για λιπαντικά μηχανών ατμού) | Κατεργασία  | α) Οξείδωση<br>β) Μόλυνση από εξωτερικές πηγές   |
| 11) Απογαλάκτωση (μόνο για τουρμπινέλαια)                 | Κατεργασία  | Μόλυνση από εξωτερικές πηγές   |

επειδή έχουν αλλοιωθεί, μπορεί να ανακτήσουν τα αρχικά τους χαρακτηριστικά και να ξαναχρησιμοποιηθούν, ύστερα από μια σειρά επεξεργασιών στις οποίες υποβάλλονται. Οι επεξεργασίες αυτές απαιτούν ειδικές εγκαταστάσεις, στις οποίες το κάθε πλοίο ή η εταιρεία στέλνουν τα μεταχειρισμένα λιπαντικά

που έχουν συγκεντρωθεί, εφόσον βέβαια η διαδικασία αυτή συμφέρει οικονομικά. Διαφορετικά, εκποιούνται ή καίγονται ή απορρίπτονται ως άχρηστα.

Το σύνολο των επεξεργασιών για τον καθαρισμό και γενικότερα για την αποκατάσταση της ποιότητας των λιπαντικών, αποτελεί τη λεγόμενη **αναζωογόνη-**

ση και περιλαμβάνει τα εξής κύρια στάδια:

1) **Επεξεργασία με πυκνό θειικό οξύ.** Γίνεται σε κυλινδρικούς λέβητες, που εσωτερικά έχουν επένδυση με φύλλα μολύβδου, τα οποία, δεν προσβάλλει το θειικό οξύ. Οι λέβητες αυτοί έχουν κωνική απόληξη, ώστε να διευκολύνεται η συγκέντρωση και η απομάκρυνση των προϊόντων επεξεργασίας. Μέσα στους λέβητες το λιπαντικό αναδεύεται επί αρκετό χρόνο σε θερμοκρασία 45-50°C με 5% πυκνό θειικό οξύ, πράγμα που προκαλεί τη συσσωμάτωση και καθίζηση των εξανθρακωμάτων και λοιπών ασφαλτούχων συστατικών, που βρίσκονται σε κολλοειδή διασπορά μέσα στο λιπαντέλαιο. Το θειικό οξύ μαζί με τις ακαθαρσίες, που έχουν συσσωματωθεί, αποχωρίζεται λόγω πυκνότητας από το κάτω μέρος του κωνικού δοχείου. Για την πλήρη καθίζηση και τον καλύτερο διαχωρισμό απαιτείται 12ωρη περίπου παραμονή.

2) **Διήθηση.** Γίνεται με φίλτρα που περιέχουν απορροφητικές γαίες. Το λιπαντικό, κατά τη δίοδό του από τα φίλτρα αυτά, απαλλάσσεται από:

α) Ασφαλτικά υπολείμματα που έχουν διαφύγει από την καθίζηση.

β) Οξίνα συστατικά που προέρχονται από το θειικό οξύ, τα οποία συγκρατούνται από τις απορροφητικές γαίες και από

γ) υγρασία.

3) **Απόσταση σε κενό.** Το λιπαντικό μετά τη διήθησή του υποβάλλεται σε απόσταση σε κενό, με την

οποία απαλλάσσεται από το καύσιμο που περιέχει και από το υπόλοιπο του νερού που είχε συγκρατήσει.

Η επεξεργασία αυτή γίνεται σε ειδικές μονάδες, που αποτελούν μικρογραφίες διυλιστηρίων. Ο καθαρισμός συμπληρώνεται με την προσθήκη απορροφητικών υλικών σε μορφή σκόνης, που συγκρατούν και τα τελευταία κατάλοιπα των προσμείξεων.

Το νερό και αρκετό από το λεπτόρρευστο καύσιμο αποστάζουν βέβαια σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από τις αντίστοιχες θερμοκρασίες του λιπαντέλαιου, αλλά παρόλα αυτά ο αποχωρισμός τους σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι πλήρης, και ως εκ τούτου οι συσκευές αυτές δεν είναι ικανοποιητικές.

4) **Ανάμειξη με χημικά πρόσθετα.** Τα πρόσθετα που περιέχονται στο αναζωογονημένο λιπαντικό καταστρέφονται κατά τις διάφορες φάσεις κατεργασίας, ιδίως από το θειικό οξύ. Έτσι είναι αναγκαίο στο τέλος της αναζωογόνησης, να προστίθενται ανάλογα με τον τύπο του λιπαντικού τα καθορισμένα πρόσθετα με τα οποία αυτό ανακτά πλήρως τις αρχικές του ιδιότητες.

Ο βαθμός απόδοσης της αναζωογόνησης εξαρτάται κυρίως από την αρχική κατάσταση του επεξεργαζόμενου λιπαντικού και κυμαίνεται από 50-75%.

Είναι αμφίβολο όμως αν η ποιότητα των αναζωογονημένων λιπαντικών είναι συγκρίσιμη με την ποιότητα των αντίστοιχων καινούργιων λιπαντικών, πράγμα που πρέπει να επιβεβαιώνεται από πλήρη εργαστηριακή ανάλυση (χημική και μηχανική).



### 18.1 Γενικά

Τα **λιπαντικά λίπη** ή **γράσα** αποτελούν πήγματα λαδιών με ειδικές ζελατινοποιημένες ουσίες. Το λάδι είναι συνήθως ορυκτέλαιο, ενώ σπανιότερα χρησιμοποιούνται συνθετικά λιπαντικά, όταν πρόκειται να παραχθούν γράσα με ειδικές απαιτήσεις. Για τη ζελατινοποίηση χρησιμοποιούνται σαπούνια, και σπανιότερα άλλες ουσίες, όπως το silica gel (κολλώδες πυριτικό οξύ). Η αναλογία του σαπουνιού που προστίθεται είναι γύρω στο 15%. Από την αναλογία αυτή εξαρτάται και η μορφή του παραγόμενου λίπους. Με αναλογία σαπουνιού 20–30% το γράσο αποκτά στερεή μορφή, ενώ με αναλογία κάτω από 10% είναι ημίρρευστο, και με αναλογία 5% έχει τα χαρακτηριστικά πολύ παχύρρευστου ορυκτέλαιου. Η ιδιότητα αυτή αποδίδεται με τον όρο **συνεκτικότητα** (consistency), για την οποία γίνεται λόγος στην παράγραφο 18.3. Τα γράσα χρησιμοποιούνται όταν οι συνθήκες λίπανσης δεν επιτρέπουν την εφαρμογή υγρών λιπαντικών, πράγμα που ισχύει όταν:

- 1) Έχουμε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής σε τριβείς,
  - 2) αναπτύσσονται πολύ υψηλά φορτία τριβών, συχνά με κραδασμούς,
  - 3) επικρατούν ακραίες θερμοκρασίες,
  - 4) δεν είναι δυνατή η συνεχής επίβλεψη,
  - 5) υπάρχουν καταστάσεις με μεγάλες ελευθερίες τριβών,
  - 6) απαιτείται στεγανότητα από εξωτερικές πηγές ρύπανσης,
  - 7) απαιτείται καθαρότητα ή αποφυγή διαρροών,
  - 8) το σημείο λίπανσης δεν είναι εύκολα προσβάσιμο ή προσιτό και όταν
  - 9) οι επιφάνειες είναι κατακόρυφες επιφάνειες.
- Τα παραπάνω εξασφαλίζονται με ορισμένες βασικές ιδιότητες των γράσων, από τις οποίες σημαντικότερες είναι:

- 1) **Λιπαρότητα**, που οφείλεται στην παρουσία των λιπαρών οξέων των σαπουνιών με τους οποίους παρασκευάζεται το γράσο. Η ιδιότητα αυτή εξηγεί και την αυξημένη ικανότητα πρόσφυσης στα μέταλλα.
- 2) **Διατήρηση της συνεκτικότητας**, άρα και της λι-

παντικής τους ενέργειας, σε διευρυμένα όρια θερμοκρασιών, που κυμαίνονται από  $-70^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $150^{\circ}\text{C}$  και

3) **Ικανότητα πρόσφυσης σε μεταλλικές επιφάνειες**, που έχει ιδιαίτερη σημασία στις εξής περιπτώσεις:

α) Σε λίπανση κατακόρυφων επιφανειών, όπου η εφαρμογή υγρών λιπαντικών είναι αδύνατη και

β) σε μηχανήματα βιομηχανιών τροφίμων ή υφασμάτων, των οποίων τα προϊόντα παραμένουν καθαρά.

4) Η **συμπεριφορά ως στερεά**, ώσπου να υποβληθούν σε διατμητικές τάσεις και να αρχίσουν μετά να συμπεριφέρονται ως ρευστά, οπότε το ιξώδες τους αποκτά τιμές κοντά στις τιμές ιξώδους του λιπαντικού που περιέχουν.

Τα γράσα έχουν ακόμα το πλεονέκτημα σε πολλές περιπτώσεις να μην χρειάζονται ιδιαίτερο δίκτυο λίπανσης, επομένως δεν απαιτείται ιδιαίτερη επίβλεψη κατά τη χρήση τους. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία σε περιπτώσεις, στις οποίες η συχνή αντικατάσταση λιπαντικού θα ήταν δύσκολη και αντιοικονομική. Παράδειγμα αποτελούν οι τριβείς των τροχών των αυτοκινήτων που λιπαίνονται με γράσα ή τα σημεία στήριξης του αμαξώματος, στα οποία η λίπανση με γράσο γίνεται με ειδικές διατάξεις γνωστές ως **γρασαδόροι**.

### 18.2 Παραγωγή λιπαντικών λιπών (γράσων)

#### 18.2.1 Πρώτες ύλες

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των γράσων είναι:

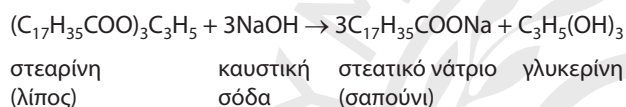
##### 1) Ορυκτέλαια

Είναι το βασικότερο συστατικό των γράσων, αφού οι ιδιότητες του ορυκτέλαιου μεταβιβάζονται στο παραγόμενο γράσο. Για παράδειγμα την παραγωγή γράσων που προορίζονται για πολύστροφα μηχανήματα με μικρό φορτίο, απαιτείται λιπαντικό με μικρό ιξώδες, άρα και το ορυκτέλαιο, που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του, πρέπει να έχει ανάλογη τιμή ιξώδους. Αντίθετα, τριβείς με υψηλά φορτία και μικρές ταχύτητες, θα πρέπει να λιπαίνονται με γράσα παρασκευασμένα από λιπαντικά με υψηλό ιξώδες.

Όταν αντιμετωπίζονται υψηλές σχετικά θερμοκρασίες πρέπει να χρησιμοποιούνται λιπαντικά με μικρή πτητικότητα στη θερμοκρασία αυτή και μεγάλη αντοχή στην οξειδωση. Τα συνθετικά λάδια, όπως σιλικόνες, χρησιμοποιούνται σε περιορισμένη κλίμακα για την παραγωγή γράσων για ειδικές περιπτώσεις λίπανσης και έχουν υψηλό κόστος παραγωγής.

## 2) Σαπούνια

Προστίθενται στα ορυκτέλαια σε αναλογία 5–30%, για τη ζελατινοποίηση, με την οποία το τελικό προϊόν αποκτά τη γνωστή ημιστερεή κατάσταση, που χαρακτηρίζει τα γράσα. Τα σαπούνια είναι άλατα διαφόρων μετάλλων με λιπαρά οξέα, δηλαδή οξέα που υπάρχουν στα διάφορα λίπη. Αυτά παράγονται με την επίδραση βάσεων, όπως η καυστική σόδα, σε λίπη, που είναι εστέρες των λιπαρών οξέων με γλυκερίνη. Η πράξη αυτή ονομάζεται **σαπωνοποίηση**, ακριβώς γιατί οδηγεί στο σχηματισμό σαπουνιού, όπως:



Για την παραγωγή συνήθως χρησιμοποιούνται τα ζωικά λίπη, γιατί έχουν λιγότερα **ακόρεστα** και επομένως μεγαλύτερη χημική σταθερότητα. Το είδος του μετάλλου της βάσης, με την οποία γίνεται η σαπωνοποίηση καθορίζει και το είδος του παραγόμενου σαπουνιού και αποτελεί ιδιαίτερο χαρακτηριστικό για την κατάταξη και την αξιολόγηση του γράσου που θα παραχθεί. Έτσι διακρίνουμε γράσα με σαπούνια νατρίου, καλίου, ασβεστίου, λιθίου κ.λπ., των οποίων οι βασικές ιδιότητες φαίνονται στον πίνακα 18.1.

Για την ζελατινοποίηση των ορυκτελαίων, αντί για σαπούνια χρησιμοποιούνται μερικές φορές και άλλες ουσίες, όπως το ένυδρο οξείδιο του πυριτίου (silica gel).

## 3) Λοιπά συστατικά

Εκτός από τα ορυκτέλαια και τα σαπούνια, που είναι τα κύρια συστατικά των γράσων, για την παραγωγή τους χρησιμοποιούνται ακόμα τα παρακάτω υλικά:

α) **Αντιοξειδωτικά πρόσθετα**, που αυξάνουν την αντοχή στην οξειδωση, άρα μπορούν να παρατείνουν τη χρήση τους για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα.

β) **Πρόσθετα εξαιρετικά υψηλών πιέσεων** (extreme pressure), που αυξάνουν την ικανότητα του γράσου να αντεπεξέρχεται στις πολύ μεγάλες πιέσεις που αναπτύσσονται από μεγάλα φορτία σε σημεία που το γράσο λιπαίνει. Το σημαντικότερο από τα πρόσθετα αυτά περιέχει θειούχες ενώσεις, όπως είναι το θειούχο μολυβδαίνιο.

γ) **Πληρωτικές ύλες** (fillers), που προστίθενται για να διευκολύνουν τη συγκράτηση του γράσου στους τριβείς κατά τις απότομες αυξομειώσεις του φορτίου. Τέτοια πρόσθετα είναι ο τάλκης (talc), ο γραφίτης, η μίκα σε λεπτό διαμερισμό και τελευταία χρησιμοποιούνται νανοϋλικά (νανοσωλήνες ή γραφένιο).

### 18.2.2 Διαδικασία παραγωγής

Η ανάμιξη των παραπάνω συστατικών ακολουθεί τα εξής στάδια:

**Σαπωνοποίηση.** Λίπη ή λιπαρά οξέα θερμαίνονται σε κατάλληλο δοχείο, αφού προηγουμένως αναμιχθούν με την κατάλληλη βάση.

**Κατεργασία σαπουνιού.** Στο σαπούνι που σχηματίζεται προστίθενται τα ορυκτέλαια και κατεργάζονται με παραπέρα θέρμανση με συνεχή ανάδευση.

**Μορφοποίηση του γράσου.** Αφού προστεθούν οι διάφορες βελτιωτικές ουσίες (additives) ή πληρωτικές ύλες (fillers), το παραγόμενο γράσο αναδεύεται ώσπου να αποκτήσει τέλεια ομοιογένεια. Ορυκτέλαια προστίθενται, αν απαιτείται, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή συνεκτικότητα.

## 18.3 Κατάταξη των γράσων

Ο συνηθέστερος τρόπος για την κατάταξη των γράσων έχει ως βάση το είδος του σαπουνιού που περιέχουν. Έτσι διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες:

### 18.3.1 Γράσα με σαπούνια ασβεστίου

Τα γράσα που παράγονται με σαπούνια ασβεστίου έχουν μία πολύ μαλακή βουτυρώδη υφή. Για την παραγωγή τους προστίθεται μικρή ποσότητα νερού, που καταναλώνεται για την ενυδάτωση του σαπουνιού. Ο υδρίτης που σχηματίζεται συμβάλλει στη σταθερότητα του παραγόμενου γράσου, που διατηρείται μέχρι τους 70°C. Πάνω από τη θερμοκρασία αυτή ο υδρίτης διασπάται και το νερό που αποβάλλεται μειώνει τη σταθερότητα του γράσου. Για τον λόγο αυτό γράσα με βάση σαπούνια ασβεστίου δεν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που αναπτύσσονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 70°C. Αυτά τα γράσα έχουν σημείο σταγόνας κάτω από τους 100°C.

Στα γράσα της κατηγορίας αυτής μπορεί να προστίθεται γραφίτης σε αναλογία 5–20%, οπότε είναι κατάλληλα για λίπανση εδράνων και οδοντωτών τροχών.

### 18.3.2 Γράσα με σαπούνια νατρίου

Τα γράσα της κατηγορίας αυτής έχουν ινώδη μορφή και πολύ υψηλότερο σημείο τήξης, γύρω στους 140°C, σε σύγκριση με τα γράσα με σαπούνια ασβεστίου. Χαρακτηρίζονται από τις εξής βασικές ιδιότητες:

**Πίνακας 18.1**  
**Είδη γράσων. Χαρακτηριστικές ιδιότητάς και εφαρμογές τους**

| Είδος γράσου         | Κύριες ιδιότητες |                      |                                      |                |                          | Παρατηρήσεις  | Εφαρμογές  |
|----------------------|------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------|--------------------------|---|--|
|                      | Υφή              | Σημείο σταγόνας (°C) | Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (°C) | Αντοχή σε νερό | Αντοχή λειτουργίας       |   |  |
| Με σαπούνι νατρίου   | ινώδης           | 160                  | 110                                  | κακή           | πολύ καλή                | Εξαιρετική συμπεριφορά σε θερμοκρασίες μέτρια υψηλές  | Για τη λίπανση ρουλεμάν και απλών εδράνων  |
| Με σαπούνι ασβεστίου | βουτυρώδης       | 90                   | 70                                   | καλή           | ικανοποιητική            | Αποσυντίθεται σε θερμοκρασία πάνω από 90°C  | Λιπαντικό γενικής χρήσης σε λιπαντήρια λίπους (γρασαδόροι)   |
| Με σαπούνι λιθίου    | βουτυρώδης       | 170                  | 135                                  | καλή           | άριστη                   | Πολύ καλή συμπεριφορά και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Άριστη σταθερότητα σε θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις | Λιπαντικό λίπος κατάλληλο για περιπτώσεις βαριάς καταπόνησης τριβέων και ρουλεμάν  |
| Με σαπούνι αργιλίου  | κολλώδης         | 85                   | 80                                   | καλή           | μέτρια έως ικανοποιητική | Διακρίνονται για την άριστη ικανότητα πρόσφυσης σε μεταλλικές επιφάνειες  | Για πλαίσια αυτοκινήτων (αμαξώματα)<br>Γενικότερα όπου απαιτείται ισχυρή πρόσφυση σε μεταλλικές επιφάνειες την οποία τα γράσα της κατηγορίας αυτής έχουν σε μεγάλο βαθμό (εκκεντροφόροι, αλυσίδες) |
| Με σαπούνι βαρίου    | απαλή ινώδης     | 175                  | 135                                  | καλή           | πολύ καλή                | Σκλήρυνση σε χαμηλές θερμοκρασίες και με μεγάλες ταχύτητες  | Γενικής χρήσης, με τους περιορισμούς της στήλης των παρατηρήσεων   |

1) Έχουν πολύ ευρύτερα όρια θερμοκρασιών χρησιμοποίησης (110°C) και

2) δεν είναι σταθερά στο νερό, από το οποίο προσβάλλονται σχηματίζοντας γαλάκτωμα, άρα δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν προβλέπεται παρουσία νερού στο σημείο που λιπαίνουν.

### 18.3.3 Γράσα με σαπούνια αργιλίου

Τα γράσα αυτής της κατηγορίας έχουν απαλή, λιπαρή υφή και παρουσιάζουν πολύ καλή αντοχή στο νερό. Μεταξύ των άλλων ιδιοτήτων, αναφέρονται οι εξής:

1) Ρευστοποιούνται γρήγορα όταν υποβάλλονται σε έντονη μηχανική καταπόνηση.

2) Έχουν χαμηλό σημείο σταγόνας και

3) Παρουσιάζουν πολύ καλή πρόσφυση στις μεταλλικές επιφάνειες.

### 18.3.4 Γράσα με σαπούνια λιθίου

Τα γράσα αυτής της κατηγορίας έχουν την καλύτε-

ρη αντοχή απ' όλα τα γράσα σε υψηλές θερμοκρασίες (ακόμη και μέχρι 150°C) και άριστη συμπεριφορά στο νερό, από το οποίο δεν προσβάλλονται.

Εξίσου καλή είναι και η συμπεριφορά τους σε χαμηλές θερμοκρασίες (ως τους -70°C). Συνεπώς τα γράσα της κατηγορίας αυτής έχουν τα ευρύτερα όρια θερμοκρασιών, στα οποία μπορούν να χρησιμοποιούνται.

### 18.3.5 Γράσα με σαπούνια βαρίου

Τα γράσα αυτής της κατηγορίας περιέχουν σε υψηλή αναλογία σαπούνια (μέχρι 25%) πράγμα που δυσχεραίνει τη διανομή του γράσου στα λιπαντέλαια σε χαμηλές θερμοκρασίες ή με πολύ υψηλές ταχύτητες.

### 18.3.6 Γράσα με σαπούνια μολύβδου

Τα γράσα αυτής της κατηγορίας είναι κατάλληλα για λίπανση σε περιπτώσεις που αναπτύσσονται πολύ υψηλές πιέσεις, στις οποίες παρουσιάζουν εξαιρετική

αντοχή. Όμως, η χρήση τους όλο και περιορίζεται λόγω της επικινδυνότητας των ενώσεων μολύβδου στο περιβάλλον και στην υγεία.

Εκτός από τις παραπάνω κατηγορίες, παράγονται και γράσα μεικτής βάσης, που περιέχουν δύο ή περισσότερα είδη σαπουνιών. Με τον τρόπο αυτό καλύπτονται περισσότερες απαιτήσεις, που καθένα από τα είδη των προστιθέμενων σαπουνιών εξασφαλίζει.

Στον πίνακα 18.1 παρέχονται συνοπτικά οι κυριότερες ιδιότητες και εφαρμογές των πιο συνηθισμένων κατηγοριών λιπαντικών λιπών. Τις ιδιότητές τους πάντως καλύπτουν οι προδιαγραφές που ισχύουν για κάθε κατηγορία, όπως η αμερικανική προδιαγραφή VV-G-632B (βλ. § 18.5).

## 18.4 Ιδιότητες των γράσων. Ποιοτικός έλεγχος

### 18.4.1 Σταθερότητα

Τα λιπαντικά λίπη δεν πρέπει να αλλοιώνονται ούτε κατά την αποθήκευση ούτε κατά τη χρήση τους. Η έλλειψη **σταθερότητας** (stability) εκδηλώνεται κυρίως με διαχωρισμό του ορυκτέλαιου που περιέχει το λίπος, ένα μέρος του οποίου αποβάλλεται με μορφή εξιδρώματος. Εμφανίζονται δηλαδή σταγόνες λαδιού πάνω στη μάζα του γράσου ή ακόμα ολόκληρο στρώμα λιπαντέλαιου που επιπλέει στην επιφάνεια.

Ο έλεγχος της σταθερότητας των γράσων γίνεται διατηρώντας ορισμένη ποσότητα δείγματος κάτω από καθορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία) για ορισμένο χρονικό διάστημα, στο τέλος του οποίου δεν πρέπει να εμφανίζεται η παραπάνω εξίδρωση.

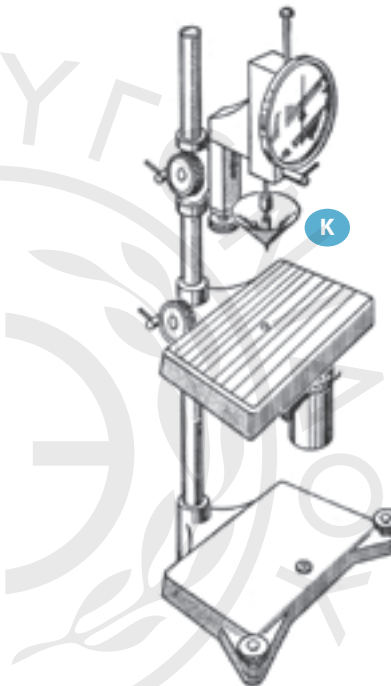
Ο παραπάνω έλεγχος σταθερότητας αποτελεί ένα στατικό τρόπο αξιολόγησης του γράσου και προσδιορίζει κυρίως την τάση αποχωρισμού λιπαντικού από τη μάζα του. Πολύ μεγαλύτερη σημασία έχει η **σταθερότητα σε μηχανικές καταπονήσεις**, που σχετίζεται με τη συμπεριφορά στην πράξη. Η ιδιότητα αυτή εξαρτάται τόσο από τη σύσταση του γράσου όσο και από την επεξεργασία της παραγωγής του. Ελέγχεται υποβάλλοντας δείγμα του γράσου σε μεγάλο αριθμό εμβολισμών (περίπου 100.000) σε ειδική παλινδρομική διάταξη και συγκρίνοντας τη συνεκτικότητά του πριν και μετά τη δοκιμή. Όσο μικρότερη είναι η διαφορά τιμών συνεκτικότητας (βλ. § 18.4.2) τόσο καλύτερη είναι η σταθερότητα του γράσου σε μηχανικές καταπονήσεις.

### 18.4.2 Συνεκτικότητα

Η **συνεκτικότητα** (consistency) είναι όρος που ανα-

φέρεται στη συνοχή μεταξύ των συστατικών του γράσου, μας δίνει δηλαδή την έννοια του πόσο μαλακό ή σκληρό είναι ένα γράσο. Μέτρο της συνεκτικότητας αποτελεί η **διδυσδυτικότητα** (penetration), δηλαδή το βάθος, σε δέκατα του χιλιοστού, στο οποίο εισδύει μεταλλικός κώνος, όταν πέφτει υπό ορισμένες συνθήκες στην επιφάνεια ενός δείγματος από το εξεταζόμενο γράσο.

Για τον σκοπό αυτό ακολουθείται η μέθοδος στην προδιαγραφή ASTM D217-21, η οποία προδιαγράφει την εικονιζόμενη στο σχήμα 18.1 εργαστηριακή συσκευή.



Σχ. 18.1

Το δείγμα τοποθετείται σε κατάλληλο δοχείο, αφού προηγουμένως ομογενοποιηθεί εντελώς με προσεκτική κατεργασία, όπως καθορίζει η προδιαγραφή.

Από ορισμένο ύψος αφήνεται να πέσει πάνω στο δείγμα ο μεταλλικός κώνος K και μετρείται το βάθος στο οποίο εισδύει στη μάζα του δείγματος. Το βάθος αυτό σε δέκατα του χιλιοστομέτρου αποτελεί το λεγόμενο **αριθμό διδυσδυτικότητας** (penetration number), προς το οποίο η συνεκτικότητα συνδέεται με ειδική κλίμακα, γνωστή ως **κλίμακα NLGI** (National Lubricating Grease Institute). Η αντιστοιχία μεταξύ αριθμού διδυσδυτικότητας και συνεκτικότητας κατά NLGI φαίνεται στον πίνακα 18.2.

Από τον πίνακα 18.2 συμπεραίνεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός διδυσδυτικότητας ενός γράσου τόσο μικρότερη είναι η συνεκτικότητά του. Γράσα με συνεκτικότητα πάνω από 6 (διδύση μικρότερη

**Πίνακας 18.2**  
**Αντιστοιχία συνεκτικότητας -**  
**αριθμού διεισδυτικότητας γράσων**

| Δεισδυτικότητα σε 25°C (δέκατα του mm) | Αριθμός συνεκτικότητας κατά NLGI |
|--|----------------------------------|
| 445-475                                | 000                              |
| 400-430                                | 00                               |
| 355-385                                | 0                                |
| 310-340                                | 1                                |
| 265-295                                | 2                                |
| 220-250                                | 3                                |
| 175-205                                | 4                                |
| 130-160                                | 5                                |
| 85-115                                 | 6                                |

από 8,5 mm) έχουν στερεή μορφή και ονομάζονται **γράσα σε πλάκες** (block greases).

#### 18.4.3 Φαινόμενο ιξώδες (apparent viscosity)

Στα λιπαντέλαια το ιξώδες καθορίζεται, όπως μάθαμε, από τη σχέση:

$$\eta = \frac{F/A}{u/H} \quad (\text{βλ. § 12.4})$$

που αποτελεί τη μαθηματική διατύπωση του Νόμου του Νεύτωνα. Σύμφωνα με το Νόμο αυτό, η παραμόρφωση του ρευστού, που εκφράζεται με το πηλίκο  $u/H$  (της μεταβολής της ταχύτητας ροής  $u$  διά της απόστασης  $H$ ), είναι ανάλογη με την διατμητική τάση  $F/A$ , με συντελεστή αναλογίας την τιμή του απόλυτου ιξώδους  $\eta$ .

$$u/H = \eta \cdot F/A$$

Τα λιπαντέλαια, καθώς και κάθε υγρό που υπακούει στον παραπάνω Νόμο του Νεύτωνα, ονομάζονται **Νευτώνεια υγρά**. Στο διάγραμμα του σχήματος 18.2 βλέπουμε ότι η σχέση διατμητικής τάσης και παραμόρφωσης για Νευτώνεια υγρά είναι γραμμική συνάρτηση με κλίση ίση με το απόλυτο ιξώδες. Αντίθετα, στα **μη Νευτώνεια υγρά**, όπως είναι τα γράσα, η συνάρτηση διάτμησης-παραμόρφωσης δεν είναι γραμμική (σχ. 18.2). Η παραμόρφωση με την ίδια τάση είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη που αντιστοιχεί στα Νευτώνεια υγρά.

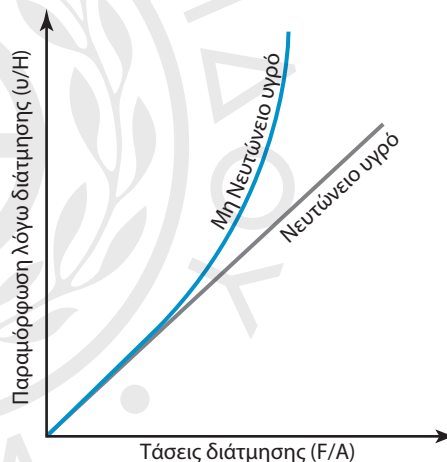
Το πηλίκο  $\frac{u/H}{F/A}$  στα μη Νευτώνεια υγρά, ονομάζεται **φαινόμενο ιξώδες** (apparent viscosity) και διατυ-

πώνεται με τη γενικότερη μορφή του:

$$\eta = \frac{F/A}{u/H}$$

όπου:  $\eta$  το φαινόμενο ιξώδες που έχει τις ίδιες μονάδες (και ίδιο σύμβολο) με το απόλυτο ιξώδες,  $F/A$  η διατμητική τάση και  $u/H$  η παραμόρφωση λόγω διάτμησης.

Επειδή η παραμόρφωση διάτμησης  $u/H$  δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί πρακτικά με τον λόγο της ταχύτητας προς την απόσταση, μετριέται με διάφορες συμβατικές μεθόδους. Κατά τη μέθοδο της προδιαγραφής ASTM D1092-12, το δείγμα του γράσου τοποθετείται σε μεταλλικό κύλινδρο, όπου και συμπιέζεται με κατάλληλο έμβολο και αναγκάζεται να ρέει από πλάγιους τριχοειδείς σωλήνες. Η ταχύτητα εκροής απ' αυτούς τους μικρούς σωλήνες είναι το μέτρο της παραμόρφωσης  $u/H$ , ενώ η δύναμη  $F$  προσδιορίζεται από την πίεση που εφαρμόζεται στο έμβολο της συσκευής. Πριν από τη δοκιμή το δείγμα θα πρέπει να βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία 25°C.



Σχ. 18.2

#### 18.4.4 Σημείο σταγόνας

Τα λιπαντικά λίπη, εξαιτίας της σύστασής τους, δεν έχουν ένα καθορισμένο σημείο τήξης. Ως μέτρο της θερμοκρασίας τήξης χρησιμοποιείται το λεγόμενο **σημείο σταγόνας** (drop point).

Αυτό συνήθως ορίζεται με τη μέθοδο της προδιαγραφής ASTM D566 (σχ. 18.3) ως η θερμοκρασία εκείνη στην οποία το γράσο διαχωρίζεται στο σαπούνι και στο λιπαντικό, ώστε να πέσει σταγόνα από ένα καψίδιο, στον πυθμένα του οποίου υπάρχει τρύπα με διάμετρο 7/64". Με την τιμή του σημείου σταγόνας έχουμε μία ένδειξη για τα όρια θερμοκρασίας, στα οποία ένα γράσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, δηλαδή μερικούς







### 19.1 Γενικά

Με τον όρο «ρύπανση» εννοούμε την παρουσία στο περιβάλλον ουσιών, που είναι επιβλαβείς τόσο για τα έμβια όντα (άνθρωποι, ζώα, φυτά) όσο και για τα άψυχα αντικείμενα.

Οι ουσίες αυτές προέρχονται:

- 1) Από την καύση, γενικά.
- 2) Από τη λειτουργία διαφόρων βιομηχανιών.
- 3) Από απορρίμματα και λοιπά απόβλητα.

Με την αύξηση του πληθυσμού της γης και με την τεχνολογική πρόοδο και εξέλιξη, οι πηγές ρύπανσης αυξάνονται συνεχώς, σε βαθμό τέτοιο ώστε η προστασία του περιβάλλοντος να αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που η ανθρωπότητα αντιμετωπίζει σήμερα.

Το μεγαλύτερο μέρος της ρύπανσης δέχεται ο ατμοσφαιρικός αέρας, στον οποίο μεταφέρονται τα προϊόντα της καύσης, τα προϊόντα της λειτουργίας των βιομηχανιών και τα αέρια απόβλητα. Οι περισσότεροι από τους ρυπαντές της ατμόσφαιρας δρουν άμεσα ως ατμοσφαιρικός αέρας, ενώ οι υπόλοιποι μεταφέρονται με το νερό, στο οποίο διαλύονται ή αιωρούνται. Σύμφωνα με την ισχύουσα υπ' αριθ. 2008/1/ΕΚ Οδηγία του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων της 15<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2008, η **ατμοσφαιρική ρύπανση** ορίζεται ως «η άμεση ή έμμεση εισαγωγή στον ατμοσφαιρικό αέρα από τον άνθρωπο ουσιών, που μπορούν να βλάψουν την υγεία του ανθρώπου, τους βιολογικούς πόρους και τα οικοσυστήματα, να φθείρουν τα υλικά αγαθά και να θίξουν ή να παραβιάσουν την ψυχαγωγική λειτουργία, καθώς και τις άλλες νόμιμες χρήσεις του περιβάλλοντος».

Το κεφάλαιο αυτό περιορίζεται στην εξέταση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που προέρχεται από τη χρήση των καυσίμων, που μελετήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η ρύπανση αυτή παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σπουδαιότητα, αφού οι καύσεις των διαφόρων καυσίμων αυξάνονται αλματωδώς, για να ικανοποιήσουν τις τεράστιες ανάγκες σε ενέργεια που η ανθρωπότητα καθημερινά αντιμετωπίζει για τις δι-

άφορες λειτουργίες, και κυρίως κίνηση, μεταφορές, θέρμανση και βιομηχανία.

Για τη Ναυτιλία το πρόβλημα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Είναι αντικείμενο ιδιαίτερης προσοχής και μελετάται τόσο από τις διάφορες βιομηχανίες που σχετίζονται με τη Ναυτιλία (ναυπηγεία, διυλιστήρια, κατασκευαστές μηχανών), όσο και από διάφορους οργανισμούς, όπως είναι ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας IMO (International Marine Organisation).

### 19.2 Ρυπαντές προερχόμενοι από τη χρήση καυσίμων

Όλα τα λεγόμενα **συμβατικά** καύσιμα δηλαδή:

- 1) Τα **στερεά καύσιμα** (γαιάνθρακες).
- 2) Τα **υγρά καύσιμα** (πετρέλαιο, προϊόντα πετρελαίου) και
- 3) τα **αέρια καύσιμα** (υγραέρια, φυσικά αέρια) με τα οποία κινούνται οι θερμικές μηχανές, άρα και οι ναυτικές μηχανές, κατά την καύση τους ή και την απλή διακίνησή τους, μεταφέρουν στην ατμόσφαιρα προϊόντα, τους λεγόμενους «ρυπαντές», των οποίων η δράση είναι επιβλαβής τόσο για τα έμβια όντα, όσο και για το περιβάλλον ευρύτερα.

Οι σπουδαιότεροι από τους ρυπαντές είναι:

- 1) Τα **οξείδια του αζώτου**, που συμβολίζονται ως  $\text{NO}_x$  και προέρχονται από τον αέρα που χρησιμοποιείται για την καύση και ως γνωστόν περιέχει περίπου 78% άζωτο.
- 2) Τα **οξείδια του θείου** ( $\text{SO}_x$ ), που προέρχονται από την καύση του θείου, το οποίο υπάρχει σε μικρή ή σε μεγαλύτερη αναλογία σε όλα τα καύσιμα. Αυτά έχουν ιδιαίτερη σημασία, ως πρόβλημα, για τις ναυτικές μηχανές, των οποίων τα καύσιμα περιέχουν μεγάλες ποσότητες θείου, καθώς η περιεκτικότητα σε θείο του μαζούτ, όπως εξάγεται από το διυλιστήριο, μπορεί να φθάσει το 5%.
- 3) Οι **υδρογονάνθρακες** (HC), που είναι τα κύρια συστατικά των υγρών και αέριων καυσίμων και η παρουσία τους στην ατμόσφαιρα οφείλεται κυρίως στη διακίνησή τους. Ως ρυπαντές έχουν ιδιαίτερη σημα-

σία στις βενζίνες, των οποίων οι υδρογονάνθρακες είναι πτητικοί και εύκολα μπορούν να μεταφερθούν στην ατμόσφαιρα. Μερικοί απ' αυτούς, όπως το βενζόλιο, είναι καρκινογόνοι και έχουν ληφθεί μέτρα περιορισμού της αναλογίας τους στις βενζίνες.

4) Το **μονοξειδίο του άνθρακα** (CO), που είναι προϊόν ατελούς καύσης του άνθρακα και των χημικών ενώσεων με τις οποίες ο άνθρακας βρίσκεται στα προϊόντα του φυσικού πετρελαίου (υδρογονάνθρακες). Αυτό είναι εξαιρετικά τοξικό για τον ανθρώπινο οργανισμό και η εισπνοή του μπορεί να προκαλέσει τον θάνατο.

5) Το **διοξείδιο του άνθρακα** (CO<sub>2</sub>), που είναι το κύριο προϊόν καύσης όλων των συμβατικών καυσίμων, αφού ο άνθρακας είναι το κύριο συστατικό τους. Συνεπώς η παρουσία του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα είναι αναπόφευκτη. Στο διοξείδιο του άνθρακα οφείλεται κατά κύριο λόγο το γνωστό **φαινόμενο του θερμοκηπίου**, δηλαδή η παγίδευση μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, που προκαλούν συνεχή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη μας και γενικά μεταβολή των κλιματολογικών συνθηκών της γης.

6) Η **αιθάλη** (καπνός), που είναι προϊόν ατελούς καύσης των συμβατικών καυσίμων και αποτελείται από κόκκους άνθρακα πολύ μικρού μεγέθους, της τάξης του 1 μm. Η παρουσία αιθάλης στην ατμόσφαιρα προδίδεται από το χρώμα των καυσαερίων και μετρείται με τα αιθαλόμετρα (βλ. § 2.8).

7) Ο **μόλυβδος**, που προερχόταν από τη βενζίνη, καθότι ήταν το κύριο πρόσθετο στην βενζίνη (το κατ'εξοχήν καύσιμο στις μηχανές αυτοκινήτων) για την αύξηση της αντικροτικής της ικανότητας (βλ. § 5.4.1). Λόγω των σημαντικών επιπτώσεων των ενώσεων του μολύβδου στον ανθρώπινο οργανισμό, τα πρόσθετα μολύβδου αντικαταστάθηκαν από άλλα και σήμερα υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές για την εξάλειψη της περιεκτικότητας μολύβδου στη βενζίνη.

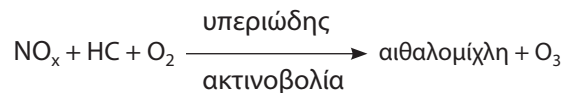
### 19.3 Συνέπειες της ρύπανσης

Η παρουσία των παραπάνω ρυπαντών στο περιβάλλον και ιδιαίτερα στον ατμοσφαιρικό αέρα έχει τις παρακάτω συνέπειες τις οποίες κατά ρυπαντή παρουσιάζουμε:

#### 19.3.1 Οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>)

Τα οξείδια του αζώτου όταν εισπνέονται με τον αέρα προκαλούν αναπνευστικά προβλήματα. Με την παρουσία υδρατμών αυτά σχηματίζουν όξινα προϊό-

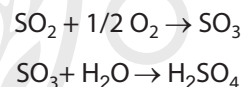
να, τη λεγόμενη **όξινη βροχή**, που προσβάλλει τους φυσικούς οργανισμούς (καταστροφή δασών), αλλά και ανόργανα υλικά (μαρμάρια μνημεία). Με τους υδρογονάνθρακες, που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα, τα οξείδια του αζώτου αντιδρούν και σχηματίζουν την αιθαλομίχλη δηλαδή το φωτοχημικό νέφος, σύμφωνα με την παρακάτω φωτοχημική αντίδραση:



Όπως δείχνει η παραπάνω αντίδραση ταυτόχρονα με την αιθαλομίχλη παράγεται όζον (O<sub>3</sub>), που σε συγκεντρώσεις άνω του 1 ppm στον αέρα προκαλεί σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα στον άνθρωπο.

#### 19.3.2 Οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>)

Εκτός από την **όξινη βροχή** και τον ερεθισμό του αναπνευστικού συστήματος, τα οξείδια του θείου έχουν έντονη διαβρωτική επίδραση στις μεταλλικές επιφάνειες, με τις οποίες έρχονται σε επαφή. Τούτο οφείλεται στη μετατροπή τους σε θειικό οξύ, αφού πρώτα οξειδωθούν από SO<sub>2</sub> σε SO<sub>3</sub> και κατόπιν ενωθούν με το νερό, που είναι βασικό συστατικό των καυσαερίων:



#### 19.3.3 Υδρογονάνθρακες

Οι υδρογονάνθρακες προέρχονται, κυρίως από την εξάτμιση των πτητικών συστατικών των υγρών καυσίμων κατά την αποθήκευση ή τη μεταφορά τους, και σε μικρότερο βαθμό από ατελή καύση των συμβατικών καυσίμων. Στην παρουσία τους, μαζί με τα οξείδια του αζώτου, οφείλεται ο σχηματισμός του φωτοχημικού νέφους.

#### 19.3.4 Μονοξειδίο του άνθρακα (CO)

Το μονοξειδίο του άνθρακα είναι πολύ τοξικό αέριο. Όταν εισπνέεται μεταφέρεται στο αίμα, όπου δεσμεύει την αιμοσφαιρίνη και σχηματίζει την ανθρακυλαιμοσφαιρίνη, εμποδίζοντας έτσι τον ρόλο της αιμοσφαιρίνης, δηλαδή την κυκλοφορία του οξυγόνου μέσα στο αίμα και τη μεταφορά του προς τα ζωτικά όργανα.

Σε μικρή αναλογία στον αέρα προκαλείται ελαφρά ζάλη, δύσπνοια και καρδιακή αρρυθμία, ενώ σε μεγαλύτερη αναλογία ποσά επέρχεται κώμα και τελικά θάνατος.

### 19.3.5 Διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>)

Το διοξείδιο του άνθρακα ευθύνεται για το **φαινόμενο του θερμοκηπίου**, δηλαδή για τη σταδιακή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης (βλ. § 19.2), γιατί το στρώμα του CO<sub>2</sub> στον ατμοσφαιρικό αέρα εμποδίζει την απαγωγή της θερμότητας από την επιφάνεια της γης προς το διάστημα. Με τον εγκλωβισμό της θερμότητας αυξάνεται σταδιακά η θερμοκρασία σε όλες τις εποχές, όπου η μέση τιμή της αύξησης της θερμοκρασίας έχει ήδη γίνει αισθητή και προβλέπεται ότι ως το τέλος του αιώνα η αύξηση αυτή θα υπερβεί τους 5°C. Αυτό, μεταξύ άλλων θα προκαλέσει το λιώσιμο των πάγων στους πόλους, που θα επιφέρει ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, προκαλώντας πλημμύρες στις παράκτιες ζώνες του πλανήτη.

Τον Οκτώβριο του 2014, το Συμβούλιο υιοθέτησε πλαίσιο για τις πολιτικές της ΕΕ, που αφορούν στο κλίμα και στην ενέργεια κατά την περίοδο 2020-2030 με δεσμευτικό στόχο την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ΕΕ κατά τουλάχιστον 30% κάτω των επιπέδων του 2005 σε τομείς όπως οι μεταφορές, η γεωργία, οι υποδομές και η διαχείριση αποβλήτων. Περίπου το 60% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα της ΕΕ προέρχεται από αυτούς τους τομείς. Οι παραπάνω δεσμευτικοί στόχοι τέθηκαν και στο πλαίσιο της Συμφωνίας του Παρισιού. Τον Απρίλιο του 2018 η Ευρωβουλή υιοθέτησε έναν νέο κανονισμό, που καθορίζει τις ελάχιστες συνεισφορές των χωρών της ΕΕ στις μειώσεις των εκπομπών την περίοδο 2021-2030, όπου για την Ελλάδα ο στόχος είναι 16% μείωση εκπομπών. Το θέμα αυτό είναι πολύ σοβαρό και διεξάγονται συναντήσεις αρχηγών κρατών για το κλίμα με απώτερο στόχο την αντικατάσταση της χρήσης όλων των συμβατικών καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές.

### 19.3.6 Αιθάλη (καπνός)

Η αιθάλη αποτελείται από κόκκους άνθρακα, που είναι προϊόν ατελούς καύσης και είναι γνωστή ως **καπνός**. Μαζί με τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια, που προέρχονται από την τέφρα των καυσίμων, προκαλούν δυσμενείς συνέπειες στην υγεία του ανθρώπου.

### 19.3.7 Μόλυβδος

Οι ενώσεις του μολύβδου έχουν ισχυρή τοξική δράση στον οργανισμό του ανθρώπου και η παρουσία τους στον αέρα πρέπει να διατηρείται σε χαμηλότερα επίπεδα (της τάξης των 2pg/m<sup>3</sup>). Η παρουσία μολύβδου στον αέρα προερχόταν από ενώσεις, όπως

ο τετρα-αιθυλικός μόλυβδος, που έμπαιναν στη βενζίνη για την αύξηση του αριθμού οκτανίου της. Όπως προαναφέρθηκε (βλ. § 5.4.1), τα πρόσθετα αυτά αντικαταστάθηκαν από άλλα και παράγονται σήμερα αμόλυβδες βενζίνες για όλες τις εφαρμογές τους, ενώ ταυτόχρονα αναπτύχθηκαν τεχνολογίες απομάκρυνσης όλων των βλαβερών συστατικών στα καυσαέρια (NO<sub>x</sub>, HC, CO) με χρήση καταλυτών ή μεμβρανών. Με αυτόν τον τρόπο το περιβάλλον απαλλάχθηκε αφενός από το μόλυβδο και αφετέρου από τα ανεπιθύμητα συστατικά των καυσαερίων.

### 19.4 Όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας

Για τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των επιβλαβών επιδράσεων της στον άνθρωπο, και τα υπόλοιπα έμβια όντα (ζώα, φυτά), και το περιβάλλον γενικότερα έχουν θεσπισθεί όρια τιμών για καθέναν από τους ρύπους. Οι τιμές αυτές εκφράζονται σε μικρογραμμάρια (μg) ανά m<sup>3</sup> αέρα, εκτός από το CO που μετρείται σε χιλιοστογραμμάρια (mg) ανά m<sup>3</sup> αέρα, σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας (25°C) και πίεσης (1 ατμόσφαιρα ή 101,3 kPa).

#### 19.4.1 Διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>)

Τα όρια τιμών SO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα καθορίζονται πάντοτε σε σχέση με την παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων (καπνός) και έχουν ως εξής (πίν. 19.1):

**Πίνακας 19.1**  
**Ανώτατα όρια τιμών SO<sub>2</sub> και καπνού σε μg/m<sup>3</sup>**

| Περίοδος αναφοράς | Τρόπος υπολογισμού  | SO <sub>2</sub> | Αιωρούμενα σωματίδια (καπνός) |
|-------------------|---|-----------------|-------------------------------|
| Έτος              | Οριακή τιμή   | 20              | 80                            |
| Ημέρα             | Οριακή τιμή, όπου δεν επιτρέπεται υπέρβαση πάνω από 3 φορές ανά έτος  | 125             | 60                            |
| Ώρα               | Οριακή τιμή, όπου δεν επιτρέπεται υπέρβαση πάνω από 24 φορές ανά έτος | 350             | 150                           |

Τα παραπάνω όρια τιμών για SO<sub>2</sub> μαζί με αυτά για τον καπνό ορίζονται με την υπ' αριθμόν 2008/50/EC οδηγία της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, από 21 Μαΐου 2008 και είναι υποχρεωτική για όλα τα κράτη-μέλη της ΕΕ. Για την περιοχή της Αττικής, όπου

το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι οξύτερο, το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ, 2020) προβλέπει τη λήψη έκτακτων μέτρων, όταν η περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε SO<sub>2</sub> υπερβαίνει τα 500 µg/m<sup>3</sup>, για 3 συνεχόμενες ώρες.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (Π.Ο.Υ.) (World Health Organisation, 2004) συνιστά τα παρακάτω όρια τιμών SO<sub>2</sub>, ανάλογα με τη χρονική περίοδο, στην οποία αναφέρονται:

- 1) για περίοδο 10 λεπτών 500 µg/m<sup>3</sup>
- 2) για περίοδο 1 ώρας 350 µg/m<sup>3</sup>
- 3) για περίοδο 24 ωρών 100-150 µg/m<sup>3</sup>

Η Διεύθυνση Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας Ατμόσφαιρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας αναφέρει στην ετήσια έκθεσή του (Ιούνιος 2020) ότι για το 2019 δεν παρατηρήθηκε υπέρβαση του ανώτατου ορίου ως προς SO<sub>2</sub> που αφορά στη μέση ωριαία τιμή ή στη μέση ημερήσια τιμή σε κανένα σταθμό μέτρησης ρύπανσης της ατμόσφαιρας στην Αττική.

#### 19.4.2 Οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>)

Σύμφωνα με την υπ' αριθμόν 2008/50/EC οδηγία της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, από 21 Μαΐου 2008 που είναι υποχρεωτική για όλα τα κράτη-μέλη της ΕΕ, η περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε NO<sub>x</sub> δεν πρέπει να υπερβαίνει τα **200 µg/m<sup>3</sup>** ως μέσος όρος των τιμών ανά ώρα σε ετήσια βάση. Για την περιοχή της Αττικής, όπου το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι οξύτερο, το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ, 2020) προβλέπει τη λήψη έκτακτων μέτρων, όταν η περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε NO<sub>x</sub> υπερβαίνει τα 400 µg/m<sup>3</sup>, για 3 συνεχόμενες ώρες.

Ο Π.Ο.Υ. (2020) για τα NO<sub>x</sub> συνιστά τα παρακάτω όρια για να προστατέψει τον πληθυσμό από τις επιβλαβείς επιπτώσεις των αερίων οξειδίων του αζώτου:

- 1) Σε ετήσια βάση 10 µg/m<sup>3</sup>.
- 2) Σε ημερήσια βάση 25 µg/m<sup>3</sup>.

Η Διεύθυνση Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας Ατμόσφαιρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας αναφέρει στην ετήσια έκθεσή της (Ιούνιος 2020) ότι για το 2019 δεν παρατηρήθηκε υπέρβαση της οριακής τιμής ανά ώρα ως προς NO<sub>x</sub> (200 µg/m<sup>3</sup>) σε κανένα σταθμό μέτρησης ρύπανσης της ατμόσφαιρας στην Αττική.

#### 19.4.3 Αιωρούμενα σωματίδια (καπνός)

Αυτά αφορούν τα αιωρούμενα σωματίδια με ισο-

δύναμη αεροδυναμική διάμετρο έως 10 µm και αναφέρονται ως ΑΣ<sub>10</sub>. Επειδή η Ευρωπαϊκή κοινοτική νομοθεσία δεν έχει προσδιορίσει συγκεκριμένα όρια ενημέρωσης πληθυσμού και συναγερμού για τα ΑΣ<sub>10</sub> και για να αντιμετωπιστεί η ατμοσφαιρική ρύπανση από τα αιωρούμενα σωματίδια, το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας εξέδωσε την ΚΥΑ 70601 από 23 Δεκεμβρίου 2013 που θεσμοθετεί επίπεδα συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>10</sub>. Με βάση αυτά καθορίζονται μέτρα ενημέρωσης και προστασίας του πληθυσμού και μέτρα μείωσης των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων κυρίως από εστίες καύσης, τη βιομηχανία και την κυκλοφορία οχημάτων ανάλογα με τα επίπεδα αυτών των συγκεντρώσεων. Τα όρια τιμών σε µg/m<sup>3</sup> παρατίθενται στον πίνακα 19.2, ανάλογα με την περίοδο στην οποία αναφέρονται οι μετρήσεις.

**Πίνακας 19.2**

| Περίοδος αναφοράς | Σύσταση  | Όρια (µg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|--|---------------------------|
| 24 ώρες           | Για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού και το γενικό πληθυσμό   | 76 - 100                  |
| 24 ώρες           | Για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού και τον γενικό πληθυσμό, μέτρα μείωσης των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων από εστίες καύσης, βιομηχανικές-βιοτεχνικές δραστηριότητες και την κυκλοφορία | 101 - 150                 |
| 24 ώρες           | Για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού και τον γενικό πληθυσμό, μέτρα μείωσης των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων από εστίες καύσης, βιομηχανικές-βιοτεχνικές δραστηριότητες και την κυκλοφορία | >150                      |

Η Διεύθυνση Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας Ατμόσφαιρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας αναφέρει στην ετήσια έκθεσή του (Ιούνιος 2020) ότι για το 2019 δεν παρατηρήθηκαν υπερβάσεις της μέσης ετήσιας οριακής τιμής (40 µg/m<sup>3</sup>) σε καμία θέση μέτρησης στην Αττική μετά την αφαίρεση της συνεισφοράς της μεταφοράς σκόνης από απομακρυσμένες ξηρές περιοχές.

#### 19.4.4 Όζον (O<sub>3</sub>)

Το όζον σχηματίζεται (βλ. § 19.3.1) κατά τη φωτοχημική αντίδραση των υδρογονανθράκων με τα οξείδια του αζώτου. Σύμφωνα με την υπ' αριθμόν

2008/50/EC οδηγία της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, από 21 Μαΐου 2008 που είναι υποχρεωτική για όλα τα κράτη-μέλη της ΕΕ, η περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε όζον δεν πρέπει να υπερβαίνει τα  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  για περισσότερο από 25 ημέρες στη διάρκεια 1 έτους.

Τα όρια συγκέντρωσης του όζοντος στον αέρα, όπως ορίζονται από τη Διεύθυνση Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας Ατμόσφαιρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Ιούνιος 2020), έχουν ως εξής:

1) Τα  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  για ωριαία μέση τιμή αποτελούν το «*όριο ενημέρωσης του πληθυσμού*».

2) Τα  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  για ωριαία μέση τιμή, επιβάλλουν συναγερμό για τη λήψη έκτακτων μέτρων («*όριο συναγερμού*»).

Η Διεύθυνση Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας Ατμόσφαιρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας αναφέρει στην ετήσια έκθεσή του (Ιούνιος 2020) ότι για το 2019 δεν παρατηρήθηκαν υπερβάσεις του «*ορίου συναγερμού*» σε καμία θέση μέτρησης στην Αττική, όμως το «*όριο ενημέρωσης*» ξεπεράστηκε για 8 – 25 ημέρες σε κάποιους σταθμούς μέτρησης.

#### 19.4.5 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Σύμφωνα με την υπ' αριθμόν 2008/50/EC οδηγία της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, από 21 Μαΐου 2008 που είναι υποχρεωτική για όλα τα κράτη-μέλη της ΕΕ, η περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε CO δεν πρέπει να υπερβαίνει τα  $10 \text{mg}/\text{m}^3$  ως μέγιστη τιμή για περίοδο 8 ωρών σε ημερήσια βάση.

Ο Π.Ο.Υ. (2020) συνιστά τις ακόλουθες μέγιστες εκθέσεις του ανθρώπου σε ατμοσφαιρικό αέρα με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες σε CO:

1) Για 15 λεπτά σε  $100 \text{mg}/\text{m}^3$

2) Για 30 λεπτά σε  $60 \text{mg}/\text{m}^3$

3) Για 1 ώρα σε  $30 \text{mg}/\text{m}^3$

4) Για 8 ώρες σε  $10 \text{mg}/\text{m}^3$

Τα παραπάνω ισχύουν με την παρατήρηση ότι η έκθεση σε αυτές τις συγκεντρώσεις δεν πρέπει να παρατείνεται για χρονικά διαστήματα μεγαλύτερα από τα αναφερόμενα, και η έκθεση δεν πρέπει να επαναλαμβάνεται πριν περάσουν 8 ώρες.

Η Διεύθυνση Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας Ατμόσφαιρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας αναφέρει στην ετήσια έκθεσή του (Ιούνιος 2020) ότι για το 2019 δεν παρατηρήθηκε υπέρβαση του ανώτατου ορίου ( $10 \text{mg}/\text{m}^3$  σε 8ωρη βάση) ως

προς CO σε κανένα σταθμό μέτρησης ρύπανσης της ατμόσφαιρας στην Αττική. Αυτό υποδηλώνει την εξάπλωση της χρήσης των καταλυτών στα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα.

#### 19.5 Ρύπανση από ναυτικές μηχανές

Το ποσοστό συμμετοχής στη ρύπανση του περιβάλλοντος από τη λειτουργία των ναυτικών μηχανών ποικίλλει σε ευρέα όρια. Γενικά η επίδραση της ναυτικής μηχανής στη ρύπανση εξαρτάται από:

1) Το είδος των μηχανών.

2) Το είδος και την ποιότητα των καυσίμων.

3) Τις συνθήκες και τον τρόπο λειτουργίας της μηχανής.

4) Τις κλιματολογικές συνθήκες.

5) Το είδος του ρυπαντή.

Μέχρι πριν λίγα χρόνια η ρύπανση της ατμόσφαιρας από τα πλοία δεν αποτελούσε πρόβλημα, διότι επικρατούσε η άποψη ότι η ρύπανση ήταν ασήμαντη, αφού τα πλοία κινούνται, ως επί το πλείστον, μακριά από κατοικημένες περιοχές. Πιο ενδελεχείς μελέτες έδειξαν ότι η συμμετοχή των πλοίων στη ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα είναι ολοένα και πιο σημαντική.

Σύμφωνα με εκτίμηση του IMO το 2014 η συνεισφορά της διεθνούς ναυτιλίας στις συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> από όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες ήταν της τάξης του 3,3%. Παράλληλα, στην ίδια μελέτη εκτιμήθηκε ότι το 7% των εκπομπών NO<sub>x</sub> και το 4% των εκπομπών SO<sub>x</sub> που παράγονται στη γη προέρχεται από τη λειτουργία των ναυτικών μηχανών.

Για να εκτιμηθεί η συμβολή της ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα από τη λειτουργία των ναυτικών μηχανών, πρέπει πρώτα να καθορισθούν τα όρια τιμών κάθε ρύπου στα καυσαέρια, που οι ναυτικές μηχανές εκπέμπουν κατά τη λειτουργία τους.

Οι τιμές των ρύπων στα καυσαέρια δίνονται σε γραμμάρια ανά κιλοβατώρα παραγόμενης ενέργειας (g/kWh) ή σε kg ανά τόνο καταναλισκόμενου πετρελαίου (kg/ton καυσίμου) και είναι φυσικό να έχουν μεγάλη διακύμανση, αφού εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως:

1) Η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής (rpm),

2) ο βαθμός απόδοσης της μηχανής (θερμική απόδοση),

3) το φορτίο, υπό το οποίο η μηχανή εργάζεται,

4) η αναλογία καυσίμου/αέρα (AFR) και

5) το είδος καυσίμου.

Από δεδομένα πολλών μετρήσεων προκύπτουν

οι παρακάτω τιμές για τους σημαντικότερους ρύπους (πίν. 19.3)

**Πίνακας 19.3**

| Είδος ρύπου  | Όρια τιμών |                 |
|--|------------|-----------------|
|  | g/kWh      | kg/ton καυσίμου |
| 1. Οξείδια του αζώτου (NO <sub>x</sub> )                                     | 10-20      | 60-80           |
| 2. Υδρογονάνθρακες (HC)  | 0,2-0,6    | 2,5-3           |
| 3. Στερεά σωματίδια  | 0,1-1      | —               |
| 4. Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)   | 0,1-0,8    | 8-10            |
| 5. Οξείδια θείου (SO <sub>x</sub> )<br>(για πετρέλαιο που περιέχει 3% θείο). | 10-18      | 20-30           |

Καθώς το πρόβλημα της ρύπανσης του περιβάλλοντος από τη Ναυτιλία αποσχολεί σοβαρά τόσο τις κυβερνήσεις των διαφόρων κρατών, όσο και διάφορους διεθνείς οργανισμούς, έχουν εκπονηθεί προγράμματα για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Μεταξύ αυτών, ο IMO έχει θέσει όρια για δύο βασικούς ρυπαντές: τα NO<sub>x</sub> και τα SO<sub>x</sub>.

1) Θέσπιση αυστηρών ανώτατων ορίων εκπομπών NO<sub>x</sub> (NO<sub>x</sub> Technical Code 2008) ξεχωριστά για ναυτικές μηχανές κατασκευής προ του 2000, μετά το 2016 και ενδιάμεσως, με βάση την ταχύτητα (rpm) της μηχανής. Ο έλεγχος των εκπομπών NO<sub>x</sub> επιτυγχάνεται μέσω της επισκόπησης και της απαίτησης πιστοποίησης που οδηγούν στην έκδοση ενός πιστοποιητικού EIAPP (Engine International Air Pollution Prevention) και τη συνακόλουθη επίδειξη της εν λειτουργία συμμόρφωσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στις νέες μηχανές οι εκπομπές NO<sub>x</sub> περιορίζονται στα 2,0 έως 3,4 g/kWh σε μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας της μηχανής.

2) Σύμφωνα με το επικαιροποιημένο Παράρτημα VI της MARPOL, το παγκόσμιο όριο περιεκτικότητας θείου στα καύσιμα περιορίστηκε από το 3,5% στο 0,5% αρχής γενομένης από 1 Ιανουαρίου 2020. Αφού εξετάστηκε η διαθεσιμότητα του νέου καυσίμου αποφασίστηκε να ξεκινήσει η εφαρμογή του μέτρου την 1 Ιανουαρίου 2020. Τα όρια θείου στις περιοχές ελέγχου ρύπων ECA παραμένουν στο 0,1% από την 1 Ιανουαρίου 2015. Αυτά γίνονται με βάση το στόχο μείωσης κατά 30% των εκπομπών SO<sub>x</sub> ως προς το έτος 2000.

Η αποδοχή των παραπάνω ορίων από τους ενδιαφερομένους (κυρίως την πλοιοκτησία), δεν είναι εύκολη, διότι συνεπάγεται σοβαρές οικονομικές επιβα-

ρύνσεις, όπως προκύπτει από τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να ελεγχθεί και να μειωθεί η ρύπανση που προέρχεται από τα πλοία (βλ. § 8.5.5).

## 19.6 Τρόποι περιορισμού ρύπανσης από τις ναυτικές πετρελαιομηχανές

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο ρόλος της Ναυτιλίας στην αντιμετώπιση του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε παγκόσμια κλίμακα είναι σοβαρός. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για τη μείωση των ρύπων, που εκπέμπονται στον αέρα με τα καυσαέρια, οι περισσότεροι απ' τους οποίους, συνεπάγονται οικονομική επιβάρυνση, πράγμα που οδήγησε στην καθυστέρηση λήψης μέτρων για την εφαρμογή τους. Για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των κανονισμών που προαναφέρθηκαν (βλ. § 19.5) χρειάστηκε η συνεισφορά όλων των ενδιαφερομένων, δηλαδή:

- 1) Των κατασκευαστών μηχανών,
- 2) των διυλιστηρίων και των εταιρειών πετρελαιοειδών και
- 3) των πλοιοκτητών.

Αυτοί όλοι προχώρησαν στη λήψη των μέτρων, που επέβαλλε η ανάγκη συμμόρφωσης με τους νόμους και κανονισμούς, ακόμα και με διεθνείς συμφωνίες.

Η έρευνα και οι προσπάθειες στράφηκαν κυρίως στον περιορισμό των NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub>, ώστε να καταστεί δυνατή η μείωση σήμερα ως προς το έτος 2000 των μεν NO<sub>x</sub> σε 50%, των δε SO<sub>x</sub> σε 30%. Οι σπουδαιότεροι τρόποι για τη μείωση των παραπάνω ρύπων περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

### 19.6.1 Μείωση των NO<sub>x</sub>

Με στόχο τη συμμόρφωση προς την απαιτούμενη πιστοποίηση που προαναφέρθηκε (βλ. § 19.5), οι σπουδαιότεροι τρόποι μείωσης των NO<sub>x</sub> στα καυσαέρια είναι:

1) Η **καθυστέρηση έγχυσης του καυσίμου**, που μπορεί να προκαλέσει μείωση της περιεκτικότητας σε NO<sub>x</sub> στα καυσαέρια μέχρι 15%, λόγω μείωσης της θερμοκρασίας, που δεν ευνοεί τον σχηματισμό των NO<sub>x</sub>. Τούτο, φυσικά, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης της μηχανής.

2) Η **έγχυση νερού** στον θάλαμο καύσης ή η χρησιμοποίηση γαλακτωμάτων νερού/καυσίμου, που επίσης μειώνει την εκπομπή NO<sub>x</sub>. Έχει αποδειχθεί ότι προσθήκη νερού σε αναλογία 10% του καυσίμου, προκαλεί μείωση των NO<sub>x</sub> κατά 6-12%.

3) Η **ανακύκλωση των καυσαερίων**, που γίνεται σε ιδιαίτερο χώρο, όπου τα καυσαέρια ψύχονται, οπότε

το συμπυκνωμένο νερό διαλύει τα οξείδια του αζώτου και του θείου, από τα οποία τα καυσαέρια τελικά απαλλάσσονται. Έχει βρεθεί πειραματικά ότι ανακυκλώνοντας περίπου 20% των καυσαερίων, επιτυγχάνεται μείωση των  $\text{NO}_x$  κατά 50% περίπου.

4) **Χρήση καταλυτών**, που είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την απομάκρυνση των οξειδίων του αζώτου από τα καυσαέρια, ιδίως όταν πρόκειται για καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, όπως είναι το ελαφρό πετρέλαιο diesel (gas oil ή diesel oil). Οι καταλύτες είναι διατάξεις, που περιέχουν ουσίες ικανές να ανάγουν τα οξείδια του αζώτου, μέχρι καθαρό άζωτο ( $\text{N}_2$ ). Συνήθως δρουν παρουσία αναγωγικών ουσιών, που χύνονται στο καύσιμο, όπως είναι η αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) και η ουρία.

### 19.6.2 Μείωση $\text{SO}_x$

Η περιεκτικότητα των καυσαερίων σε οξείδια του θείου εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Επειδή τα βαριά πετρελαιο που χρησιμοποιούν ως καύσιμα οι ναυτικές πετρελαιομηχανές περιέχουν θείο με υψηλή περιεκτικότητα (έως 5%) επόμενο είναι τα καυσαέρια να περιέχουν σημαντικές ποσότητες  $\text{SO}_x$ , που είναι ένας από τους χειρότερους ρύπους. Ο σπουδαιότερος, λοιπόν, τρόπος μείωσης  $\text{SO}_x$  στα καυσαέρια είναι η χρήση πετρελαίου καλύτερης ποιότητας, δηλαδή με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (μέχρι 1%) παρ' όλο που αυτό συνεπάγεται υψηλότερο κόστος λειτουργίας.

Με βάση τους νέους κανονισμούς MARPOL (βλ. § 19.5 και § 8.5.5) ήδη έχει επέλθει μείωση στην περιεκτικότητα των καυσίμων σε θείο, αλλά και δράσεις

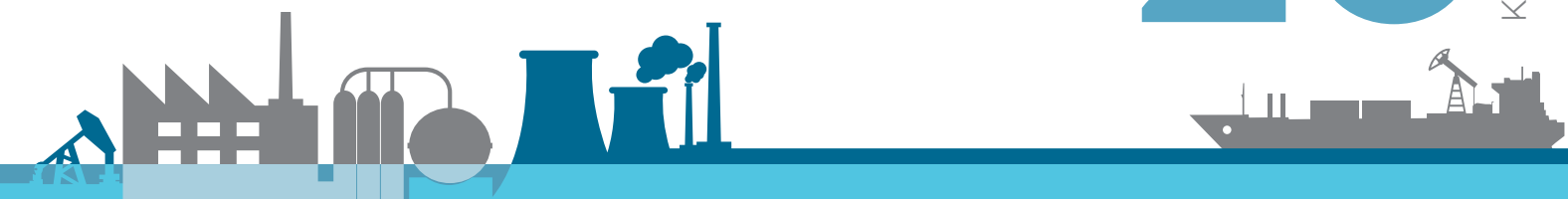
πάνω στο πλοίο, όπως scrubbers/σύστημα πλυντρίδων (βλ. § 8.5.5) για την απομάκρυνση των  $\text{SO}_x$  από τα καυσαέρια. Οποσδήποτε η εναρμόνιση με τους νέους κανονισμούς απαιτεί μεγάλες επενδύσεις απ' όλους τους ενδιαφερόμενους, που αναφέρονται στην αρχή της παραγράφου 19.6, καθώς και μια επερχόμενη αύξηση του κόστους του καυσίμου. Τα παραπάνω είναι αναγκαία για την εναρμόνιση της ναυτιλίας στις νέες συνθήκες που φέρνουν οι πολιτικές για προστασία του περιβάλλοντος.

### 19.6.3 Αιωρούμενα σωματίδια (αιθάλη/καπνός)

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται από κόκκους άνθρακα που προέρχονται από την ατελή καύση των προϊόντων του φυσικού πετρελαίου. Αυξημένη περίσσεια αέρα θα μπορούσε να οδηγήσει σε τέλεια καύση, χωρίς αιθάλη, αλλά πέραν ενός ορισμένου ορίου, αυτό θα μείωνε τον βαθμό απόδοσης της μηχανής, αφού ο αέρας αυτός θα μετέφερε άσκοπα σημαντικά ποσά θερμότητας.

Εκτός από τη ρύθμιση του βαθμού περίσσειας αέρα για τον οποίο έγινε λόγος στην παράγραφο 2.4, η αιθάλη μπορεί επίσης να ελαττωθεί με τη χρήση γαλακτωμάτων πετρελαίου και νερού, με αναλογία νερού έως 20%.

Για τη συγκράτηση της αιθάλης τοποθετούνται κατάλληλα φίλτρα με πορώδεις μεμβράνες στις εξαγωγές των καυσαερίων. Τέτοια φίλτρα μπορούν να αναγεννηθούν για επαναχρησιμοποίηση, κάτι που καθιστά την εφαρμογή τους περισσότερο αποδεκτή από τους παράγοντες της ναυτιλίας.



## 20.1 Γενικά

Έχει παρατηρηθεί ότι αν ένα στοιχειώδες σωματίδιο όπως είναι το νετρόνιο ή και ο πυρήνας ατόμου κάποιων στοιχείων έλθει σε **αλληλεπίδραση** υπό ορισμένες συνθήκες με τον πυρήνα ατόμου κάποιων άλλων στοιχείων, μπορεί να προκύψουν διαφορετικά προϊόντα, όπως είναι ένας νέος πυρήνας και ένα στοιχειώδες σωματίδιο ή δύο νέοι πυρήνες και στοιχειώδη σωματίδια. Αλληλεπιδράσεις αυτού του είδους χαρακτηρίζονται ως **πυρηνικές αντιδράσεις**.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πλευράς παραγωγής ενέργειας παρουσιάζουν ορισμένες πυρηνικές αντιδράσεις στις οποίες παρατηρείται ότι η συνολική μάζα  $M_1$  πριν από την αντίδραση είναι **μικρότερη** κατά ένα ποσό  $\Delta m$  από τη συνολική μάζα  $M_2$  των προϊόντων της πυρηνικής αντίδρασης. Δηλαδή είναι:

$$M_1 = M_2 + \Delta m \Rightarrow M_1 - M_2 = \Delta m \quad (1)$$

Μια τέτοια πυρηνική αντίδραση λέμε ότι εμφανίζει ένα **έλλειμμα μάζας  $\Delta m$** . Αυτό το έλλειμμα μάζας μετατρέπεται σε ισοδύναμο ποσό ενέργειας  $E$ , σύμφωνα με τη γνωστή από τη Φυσική σχέση του Einstein:

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

όπου:  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Η ενέργεια αυτή  $E$  ελευθερώνεται κατά την πυρηνική αντίδραση, η οποία γι' αυτό τον λόγο ονομάζεται **εξώθερμη**.



### Παράδειγμα

Για  $\Delta m = 1 \text{ g}$ , δηλαδή από έλλειμμα μάζας ενός γραμμαρίου, σύμφωνα με τη σχέση (2), η ισοδύναμη ενέργεια που θα ελευθερωθεί είναι:

$$E = 0,001 \text{ kg} \cdot (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 9 \times 10^{13} \text{ J} = 2,5 \times 10^7 \text{ kWh} \quad (2)$$

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, υπάρχουν ορισμένες πυρηνικές αντιδράσεις, που όταν πραγματο-

ποιηθούν συνοδεύονται από την ελευθέρωση σημαντικής ποσότητας ενέργειας. Η ενέργεια αυτή, λόγω της προέλευσής της, χαρακτηρίζεται ως **πυρηνική ενέργεια**, που δεν πρέπει να συσχετίζεται με την ατομική ενέργεια. Αυτές οι πυρηνικές αντιδράσεις, όπως είναι φανερό, παρουσιάζουν ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον. Αρκεί, βεβαίως, να είναι εφικτή η πραγματοποίησή τους υπό συνθήκες που επιτρέπουν την αξιοποίηση της εκλυόμενης ενέργειας σε πρακτικές εφαρμογές, όπως είναι η ηλεκτροπαραγωγή. Αυτό γίνεται με τα Πυρηνικά Εργοστάσια Ηλεκτροπαραγωγής, που λειτουργούν σε πολλές χώρες.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί το ιδιαίτερης πρακτικής σημασίας γεγονός, ότι η εκλυόμενη λόγω ελλείμματος μάζας ενέργεια, είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη που ελευθερώνεται από μια χημική αντίδραση, όπως είναι η καύση του άνθρακα.

## 20.2 Εξώθερμες πυρηνικές αντιδράσεις πρακτικού ενδιαφέροντος

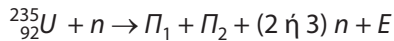
Υπάρχουν δύο κατηγορίες εξώθερμων πυρηνικών αντιδράσεων οι οποίες μπορεί να αξιοποιηθούν στην πράξη.

### 1) Πυρηνικές αντιδράσεις σχάσης (nuclear fission)

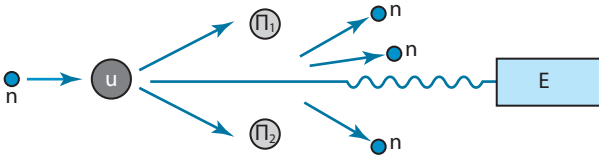
Έχει παρατηρηθεί, ότι όταν ένα νετρόνιο οποιοσδήποτε ταχύτητας εισχωρήσει στον πυρήνα του φυσικού ισότοπου  $^{235}_{92}\text{U}$  ή U-235, μπορεί να προκαλέσει τον τεμαχισμό του σε δύο πυρήνες  $P_1$  και  $P_2$  με την ίδια περίπου μάζα, ενώ ταυτόχρονα εμφανίζονται και δύο ή σπανιότερα τρία νέα νετρόνια. Αυτό το φαινόμενο του τεμαχισμού του αρχικού πυρήνα U-235 ονομάζεται **πυρηνική σχάση** ή και απλώς **σχάση**. Η αντίδραση αυτή είναι **εξώθερμη**, δηλαδή συνοδεύεται από την ελευθέρωση ενέργειας, αφού η μάζα των προϊόντων της αντίδρασης (πυρήνες  $P_1$  και  $P_2$  και τα νετρόνια) είναι μικρότερη από τη συνολική μάζα του πυρήνα U-235 και του νετρονίου που συμμετέχουν στην αντίδραση αυτή.



Η πυρηνική αντίδραση που αναφέραμε πριν συμβολίζεται ως εξής:



Σχηματικά η αντίδραση αυτή μπορεί να παρασταθεί ως εξής:



Η πυρηνική σχάση του ισότοπου U-235, που είναι εξώθερμη, μπορεί να αξιοποιηθεί για πρακτικούς σκοπούς, γιατί παρουσιάζει συνοπτικά τις ακόλουθες ιδιότητες:

α) Πραγματοποιείται με νετρόνια ακόμη και πολύ μικρής ταχύτητας.

β) Η ίδια η σχάση **παράγει** τους φορείς που την προκαλούν, δηλαδή τα νετρόνια. Μάλιστα δε, ενώ για μια σχάση απαιτείται ένα νετρόνιο, απ' αυτήν παράγονται 2 ή 3, τα οποία έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόκληση νέων σχάσεων (αλυσιδωτή αντίδραση).

γ) Οι πυρήνες U-235 υπάρχουν στη φύση, γιατί το ισότοπο αυτό περιέχεται στο φυσικό ουράνιο σε αναλογία περίπου 0,7%.

Υπάρχουν δύο ακόμη πυρήνες, οι οποίοι υφίστανται σχάση με νετρόνια και εμφανίζουν τις δύο πρώτες από τις ιδιότητες που προαναφέραμε. Πρόκειται για το ισότοπο 233 του ουρανίου  ${}_{92}^{233}\text{U}$  ή U-233 και το ισότοπο 239 του πλουτωνίου Pu ή Pu-239.

Οι πυρήνες αυτοί, αν και δεν υπάρχουν ελεύθεροι στη φύση, μπορούν να παρασκευαστούν τεχνητά σε επαρκείς ποσότητες.

Οι πυρήνες U-235, U-233 και Pu-239 ονομάζονται σχάσιμοι πυρήνες και όπως αναφέρθηκε, προσφέρονται για πρακτική αξιοποίηση της εκλυόμενης ενέργειας κατά τη σχάση τους με νετρόνια.

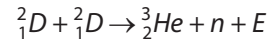
## 2) Πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης (nuclear fusion)

Έχει παρατηρηθεί ότι η συνένωση δύο ελαφρών πυρήνων –συνήθως ισωτόπων του υδρογόνου– που οδηγεί στον σχηματισμό ενός βαρύτερου πυρήνα, συνοδεύεται και αυτή, όπως και η σχάση, με ελευθέρωση ενός πολύ σημαντικού ποσού ενέργειας. Μια τέτοια πυρηνική αντίδραση ονομάζεται **σύντηξη**.

Η εκλυόμενη κατά τη σύντηξη ενέργεια οφείλεται επίσης στο γεγονός ότι και αυτή η πυρηνική αντίδραση

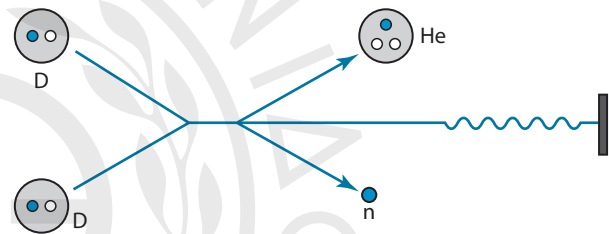
ση εμφανίζει έλλειμμα μάζας. Δηλαδή, η συνολική μάζα των προϊόντων της αντίδρασης είναι μικρότερη από τη συνολική μάζα των πυρήνων που συμμετέχουν σ' αυτήν. Το έλλειμμα μάζας που προέρχεται από αντιδράσεις σύντηξης συνήθως είναι πολύ μεγαλύτερο από το έλλειμμα μάζας στις αντιδράσεις σχάσης. Κατά συνέπεια η ενέργεια που παράγεται από τις αντιδράσεις σύντηξης είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που ελευθερώνεται από αντιδράσεις σχάσης.

Μια τυπική αντίδραση σύντηξης είναι η ακόλουθη:



όπου: με  ${}^2_1\text{D}$  συμβολίζεται ο πυρήνας του δευτέρου, δηλαδή του ισότοπου του υδρογόνου, που έχει στον πυρήνα του, εκτός από ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο.

Η παραπάνω πυρηνική αντίδραση σύντηξης μπορεί να παρασταθεί σχηματικά ως εξής:



δευτέριο → ήλιο + νετρόνιο + θερμική ενέργεια (3,2 MeV)

Από μία τέτοια πυρηνική αντίδραση προέρχεται η ηλιακή ενέργεια, ενώ σε μια τέτοια πυρηνική αντίδραση βασίζεται η βόμβα υδρογόνου, γνωστή ως **βόμβα Η**.

Το δευτέριο υπάρχει στη φύση ως ένα από τα δύο ισότοπα του υδρογόνου και η χημική του ένωση  $\text{D}_2\text{O}$ , γνωστή ως **βαρύ νερό**, περιέχεται σε μικρή αναλογία στο φυσικό νερό. Υπολογίζεται ότι ένας τόνος θαλασσινού νερού περιέχει περίπου 34 γραμμάρια δευτέρου, που σημαίνει ότι η θάλασσα περιέχει συνολικά  $3 \times 10^{13}$  τόνους δευτέρου. Αν ολόκληρο αυτό το απόθεμα δευτέρου στη φύση ήταν δυνατόν να αξιοποιηθεί σε σύντηξη για την παραγωγή ενέργειας, τότε θα απολαμβάναμε ενέργεια 1 τρισεκατομμύριο φορές περισσότερη από την ενέργεια που εξασφαλίζουν σήμερα τα γνωστά αποθέματα συμβατικών καυσίμων. Αυτό δείχνει το πόσο σημαντικό είναι το να αξιοποιηθεί κάποτε πρακτικά, έστω και ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτού του τεράστιου ενεργειακού πόρου.

Από τις δύο πιο πάνω πυρηνικές αντιδράσεις μόνο η σχάση, και μάλιστα του U-235, έχει μέχρι σήμερα αξιοποιηθεί για πρακτικούς σκοπούς παραγωγής ενέργειας

ας, ενώ η πυρηνική σύντηξη βρίσκεται ακόμη σε πρόωρο στάδιο, παρά την εντατική έρευνα που εδώ και πολλά χρόνια διεξάγεται.

Έτσι λοιπόν, όσα ακολουθούν περιορίζονται μόνο στην αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας που προέρχεται από τη σχάση του U-235.

### 20.3 Πυρηνικοί αντιδραστήρες, πυρηνικά καύσιμα

Οι εγκαταστάσεις που χρησιμεύουν για την αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας, είτε αυτή προέρχεται από σχάση είτε από σύντηξη, ονομάζονται **πυρηνικοί αντιδραστήρες**. Όπως ήδη αναφέρθηκε, μέχρι σήμερα έχει επιτευχθεί η κατασκευή πυρηνικών αντιδραστήρων των οποίων η λειτουργία βασίζεται στο φαινόμενο της σχάσης του ισότοπου U-235 με νετρόνια. Στο φαινόμενο αυτό περιορίζονται όσα αναφέρονται παρακάτω.

Είναι φανερό ότι βασικό υλικό συγκρότησης ενός πυρηνικού αντιδραστήρα είναι το ουράνιο. Το ουράνιο αυτό περιέχεται υπό κατάλληλη μορφή, συνήθως ως  $\text{UO}_2$ , στο υλικό ράβδων, που τοποθετούνται στον αντιδραστήρα. Το υλικό αυτών των ράβδων, το οποίο περιέχει τους πυρήνες του U-235, ονομάζεται **πυρηνικό καύσιμο**. Βέβαια ο όρος αυτός δεν ανταποκρίνεται προς την έννοια των καυσίμων, σύμφωνα με την οποία η παραγόμενη ενέργεια οφείλεται στη χημική τους ένωση με το οξυγόνο. Κατατάσσονται όμως διεθνώς και αυτά τα υλικά στα **καύσιμα**, με διεύρυνση του όρου, ώστε να περιλαμβάνει υλικά κατάλληλα για την παραγωγή ενέργειας, ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο απελευθερώνεται η ενέργεια.

Η λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων βασίζεται κατ' αρχή στο γεγονός ότι, η σχάση με ένα νετρόνιο ενός πυρήνα U-235 δίνει 2 ή 3 νετρόνια που μπορούν και αυτά να προκαλέσουν νέες σχάσεις άλλων πυρήνων U-235 κ.ο.κ. Πρόκειται δηλαδή για αποκατάσταση, όπως λέμε, **αλυσιδωτής αντίδρασης σχάσης**, όπου μια γενιά νετρονίων με τις προκαλούμενες σχάσεις οδηγεί σε νέες γενιές νετρονίων, που με τη σειρά τους δημιουργούν μία επόμενη γενιά κ.ο.κ. Αυτή ακριβώς η αλληλουχία γενιών νετρονίων ελέγχεται με κατάλληλες **ράβδους ελέγχου**, έτσι ώστε το πλήθος των σχάσεων από γενιά σε γενιά μόνο κατά βούληση να μπορεί να μεταβληθεί.

Για να είναι δυνατή η λειτουργία ενός αντιδραστήρα είναι αναγκαίο η ποσότητα του περιεχομένου πυρηνικού καυσίμου να μην είναι μικρότερη μιας ελάχιστης τιμής που χαρακτηρίζεται ως **κρίσιμη μάζα**.

Η ενέργεια που εκλύεται κατά τη σχάση του U-235 εμφανίζεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της ως θερμότητα μέσα στον αντιδραστήρα και κυρίως στις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου. Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να αξιοποιηθεί για πρακτικούς σκοπούς, αν μεταφερθεί εκτός του αντιδραστήρα. Η μεταφορά αυτή πραγματοποιείται σήμερα κυρίως με νερό και κατά δύο διαφορετικούς τρόπους που περιγράφονται με συντομία στη συνέχεια.

Ο απλούστερος τρόπος απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας είναι με την κυκλοφορία νερού μέσα από τον αντιδραστήρα, κατά την οποία με βρασμό παράγεται ατμός. Ο ατμός αυτός, που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα, μπορεί πλέον να διοχετευθεί σε ένα ατμοστρόβιλο και έτσι τελικά επιτυγχάνεται η μετατροπή της πυρηνικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια που παραλαμβάνεται στον άξονα του ατμοστρόβιλου.

Ο δεύτερος τρόπος, που επίσης χρησιμοποιείται για την απαγωγή της θερμότητας, είναι με την κυκλοφορία νερού μέσα στον αντιδραστήρα υπό αρκετά υψηλή πίεση, ώστε το νερό να θερμαίνεται χωρίς όμως να γίνεται βρασμός. Το θερμό νερό μετά την έξοδό του μπορεί να οδηγηθεί σε εναλλάκτη θερμότητας, όπου αποδίδει τη θερμότητά του προκαλώντας την παραγωγή ατμού στο δευτερεύον κύκλωμα του εναλλάκτη. Τέλος, αν ο ατμός αυτός οδηγηθεί σε ατμοστρόβιλο, τότε επιτυγχάνεται και πάλι η μετατροπή της πυρηνικής ενέργειας σε μηχανική, που παραλαμβάνεται στον άξονα του ατμοστρόβιλου.

Ο ατμοστρόβιλος που αναφέρθηκε στις παραπάνω περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την πρόωση, οπότε μιλάμε για **πυρηνική πρόωση**, είτε για την κίνηση ηλεκτρογεννήτριας, οπότε μιλάμε για **πυρηνοληκτρική παραγωγή**.

Η πυρηνική ενέργεια καλύπτει περίπου το 10% του συνόλου των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας (2019), έχοντας φτάσει το 1998 το 17,5% και συμβάλλοντας έτσι στην άμβλυση του ενεργειακού προβλήματος που η ανθρωπότητα αντιμετωπίζει από την εξάντληση των αποθεμάτων πετρελαίου, απ' τις συνεχείς ανατιμήσεις του, αλλά και απ' την ανάγκη εξάλειψης των αερίων του θερμοκηπίου ( $\text{CO}_2$ ).

**Ανασταλτικοί παράγοντες** στην εντατικότερη εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας είναι:

1) Στο παρελθόν το κόστος της πυρηνικής ενέργειας ήταν υψηλότερο σε σχέση με την ενέργεια που παράγονταν από συμβατικές πηγές. Τη διαφορά αυτή πάντως, τείνουν να εκμηδενίσουν οι συνεχείς ανατι-

μήσεις του πετρελαίου, παρά το πολύ υψηλό κόστος επένδυσης για την εγκατάσταση μονάδας παραγωγής ενέργειας από πυρηνικά καύσιμα.

Σήμερα το κόστος της πυρηνικής ενέργειας μπορεί να ανταγωνισθεί το κόστος ενέργειας των συμβατικών καυσίμων.

2) Ο κίνδυνος ατυχημάτων από τη ραδιενέργεια, που δημιουργείται κυρίως από τα κατάλοιπα των πυρηνικών καυσίμων.

Σήμερα υπάρχουν σ' όλη τη γη 413 εγκαταστημένοι πυρηνικοί αντιδραστήρες, οι περισσότεροι από τους οποίους λειτουργούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, Απ' αυτούς οι περισσότεροι βρίσκονται στις ΗΠΑ (93), Γαλλία (56), Κίνα (52), Ρωσία (38), Νότια Κορέα (23), Ινδία (21), Καναδά (19), Ουκρανία (15), Ηνωμένο Βασίλειο (13) και Ιαπωνία (9).

Πυρηνικοί αντιδραστήρες κινούν πολλές μονάδες του στόλου των μεγάλων δυνάμεων (κυρίως ΗΠΑ και Ρωσίας, δευτερευόντως Γαλλίας και Μεγάλης Βρετανίας). Σήμερα παγκοσμίως υπάρχουν 120 πυρηνοκίνητα υποβρύχια, ενώ οι ΗΠΑ κινούν 9 αεροπλανοφόρα και η Ρωσία 4 καταδρομικά με πυρηνική ενέργεια. Η εφαρμογή της πυρηνικής ενέργειας σε εμπορικά πλοία είναι ακόμα πολύ περιορισμένη.

Σε όλους τους πυρηνικούς αντιδραστήρες η θερμότητα που παράγεται από την πυρηνική αντίδραση μεταφέρεται εκτός του αντιδραστήρα με νερό ή αέριο, όπου σε εναλλάκτες η μεταφερόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για ατμοπαραγωγή (ατμολέβητες). Ο παραγόμενος ατμός τροφοδοτεί πλέον ατμοστρόβιλο, η ενέργεια του οποίου μεταβιβάζεται σε άξονα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για πρόωση πλοίων. Σε ορισμένο τύπο αντιδραστήρων η ατμοπαραγωγή πραγματοποιείται μέσα στον ίδιο τον αντιδραστήρα, οπότε αυτός ο ατμός οδηγείται πλέον κατευθείαν στον ατμοστρόβιλο της εγκατάστασης.

#### 20.4 Πρόωση πλοίων με πυρηνική ενέργεια

Η εφαρμογή πυρηνικής ενέργειας για την πρόωση πλοίων **περιορίζεται επί του παρόντος μόνο σε πολεμικά σκάφη**, όπου γίνεται εκμετάλλευση δυο σημαντικών πλεονεκτημάτων της πυρηνικής πρόωσης.

1) Η πολύ μεγάλη ακτίνα δράσης των πλοίων, χάρη στο γεγονός ότι η **κατανάλωση** καυσίμου είναι πολύ μικρή.

2) Δεν απαιτείται αέρας για την καύση, πράγμα με ιδιαίτερη σημασία για την πρόωση υποβρυχίων σε κατάδυση.

Η ιστορία των εμπορικών πλοίων που χρησιμοποιούν πυρηνική πρόωση δεν είναι τόσο γνωστή. Το 1959 έγινε η αρχή με το Σοβιετικό παγοθραυστικό «Λένιν», που είναι το πρώτο σκάφος επιφανείας που κατάφερε να φτάσει στο Βόρειο Πόλο. Αυτό παροπλίστηκε το 1989. Σήμερα στη Ρωσία υπάρχουν 7 παγοθραυστικά για τη διευκόλυνση της ναυσιπλοΐας στις βόρειες ακτές της χώρας με πυρηνική πρόωση. Από το 1992 αυτά τα πλοία χρησιμοποιούνται και ως κρουαζιερόπλοια κάνοντας ταξίδια στο Βόρειο Πόλο. Σήμερα στη Ρωσία βρίσκουμε επίσης και ένα πυρηνοκίνητο εμπορικό πλοίο που μεταφέρει μεταλλεύματα.

Πέρα των παραπάνω, 3 εμπορικά πλοία σε όλο τον κόσμο χρησιμοποίησαν πυρηνική ενέργεια για την πρόωσή τους. Το 1952 σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε το Αμερικανικό «*Savannah*», το οποίο ταξίδεψε για 18 χρόνια πριν παροπλιστεί. Όμοια και το Γερμανικό «*NS Otto Hahn*» χρησιμοποίησε πυρηνική ενέργεια για λίγα χρόνια πριν μετατραπεί σε ντιζελοκίνητο. Το ιαπωνικό «*NS Mutsu*» κατελήκυστηκε το 1969 και το 1972 τοποθετήθηκε πυρηνικός αντιδραστήρας, όπου μετά από αρκετά προβλήματα λειτουργίας, σήμερα εξυπηρετεί ερευνητικούς σκοπούς.

Σε ένα τυπικό πυρηνικό αντιδραστήρα για πρόωση πλοίων, η θερμική ενέργεια που παράγεται από τη σχάση του ουρανίου έχει ισχύ 36.000 kW, που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια μέσω εγκατάστασης ατμοστρόβιλου, με τελική ισχύ περίπου 10.000 HP. Η ποσότητα του οξειδίου του ουρανίου που περιέχει η καρδιά του αντιδραστήρα είναι 2.775 kg και είναι αρκετή για να καλύψει με αυτήν το πλοίο απόσταση 145.000 μίλια με ταχύτητα 16,5 κόμβων.

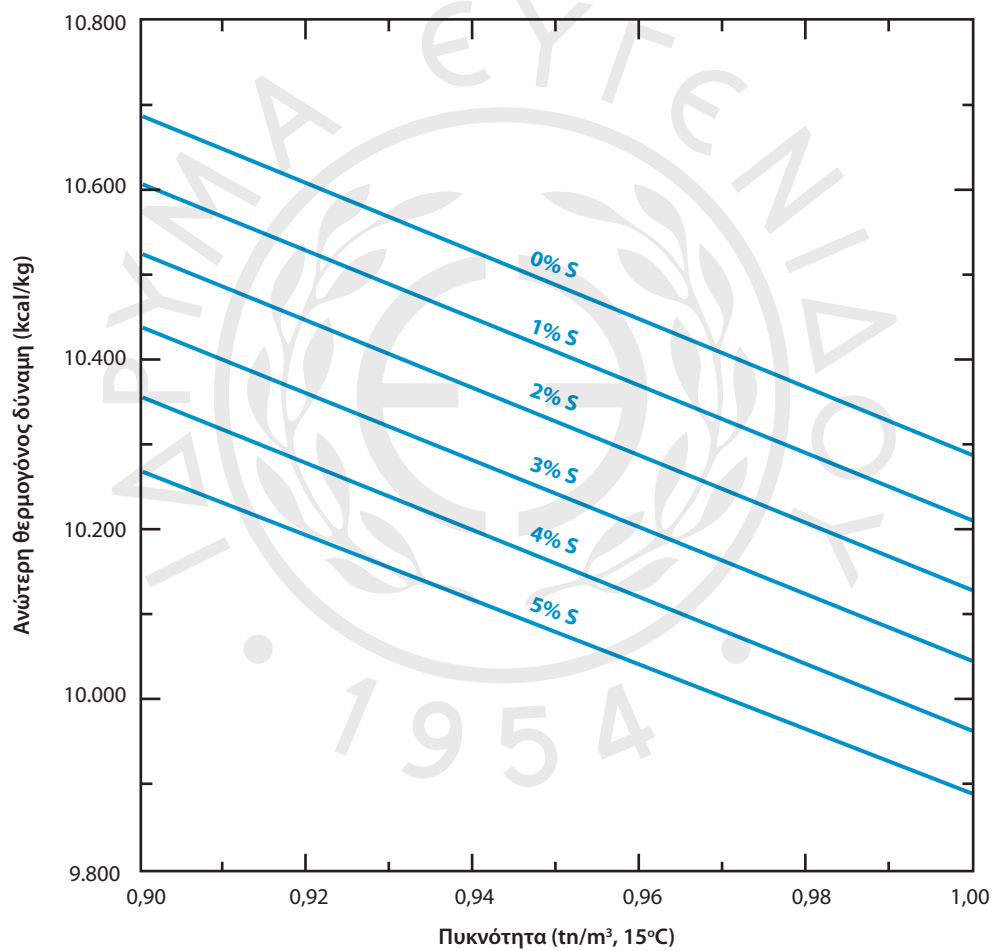
Πρέπει να αναφερθεί ότι στα εμπορικά πλοία που αναφέρθηκαν παραπάνω ο κύριος ανασταλτικός παράγοντας αφορούσε στο υψηλό κόστος λειτουργίας τους κι έτσι κατέστησε τη χρησιμοποίηση της πυρηνικής ενέργειας οικονομικά ασύμφορη. Πέρα από το καθαρό οικονομικό σκέλος, υπάρχει και ένας πραγματικός κίνδυνος που έρχεται από άλλη κατεύθυνση. Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται από τον ανεφοδιασμό του αντιδραστήρα, τον παροπλισμό των σκαφών και την αποσυναρμολόγηση των διαμερισμάτων των αντιδραστήρων δημιουργεί τεράστιο πρόβλημα για τα πυρηνοκίνητα σκάφη. Η αντιμετώπιση του κινδύνου αυτού θα καθορίσει το μέλλον της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας στα εμπορικά πλοία.

# Παράρτημα



## Παράρτημα Α

Πίνακας εύρεσης θερμαντικής ικανότητας από την πυκνότητα και την περιεκτικότητα σε θείο

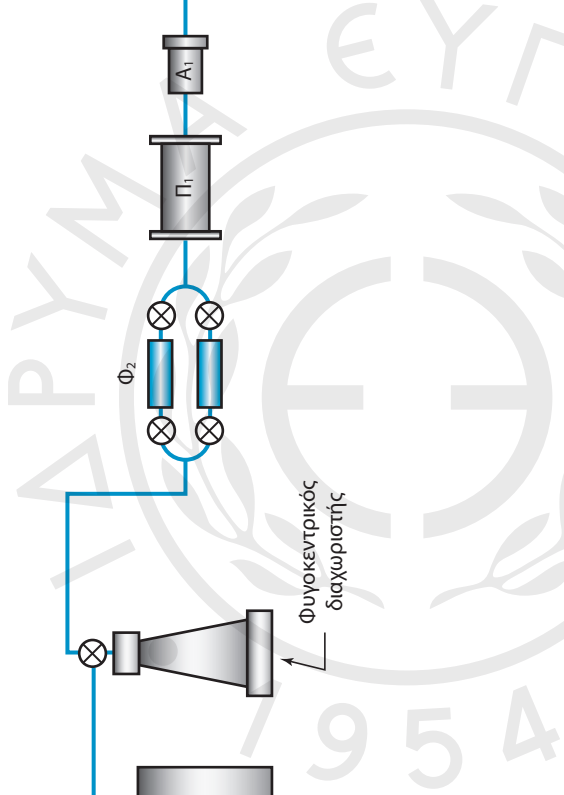
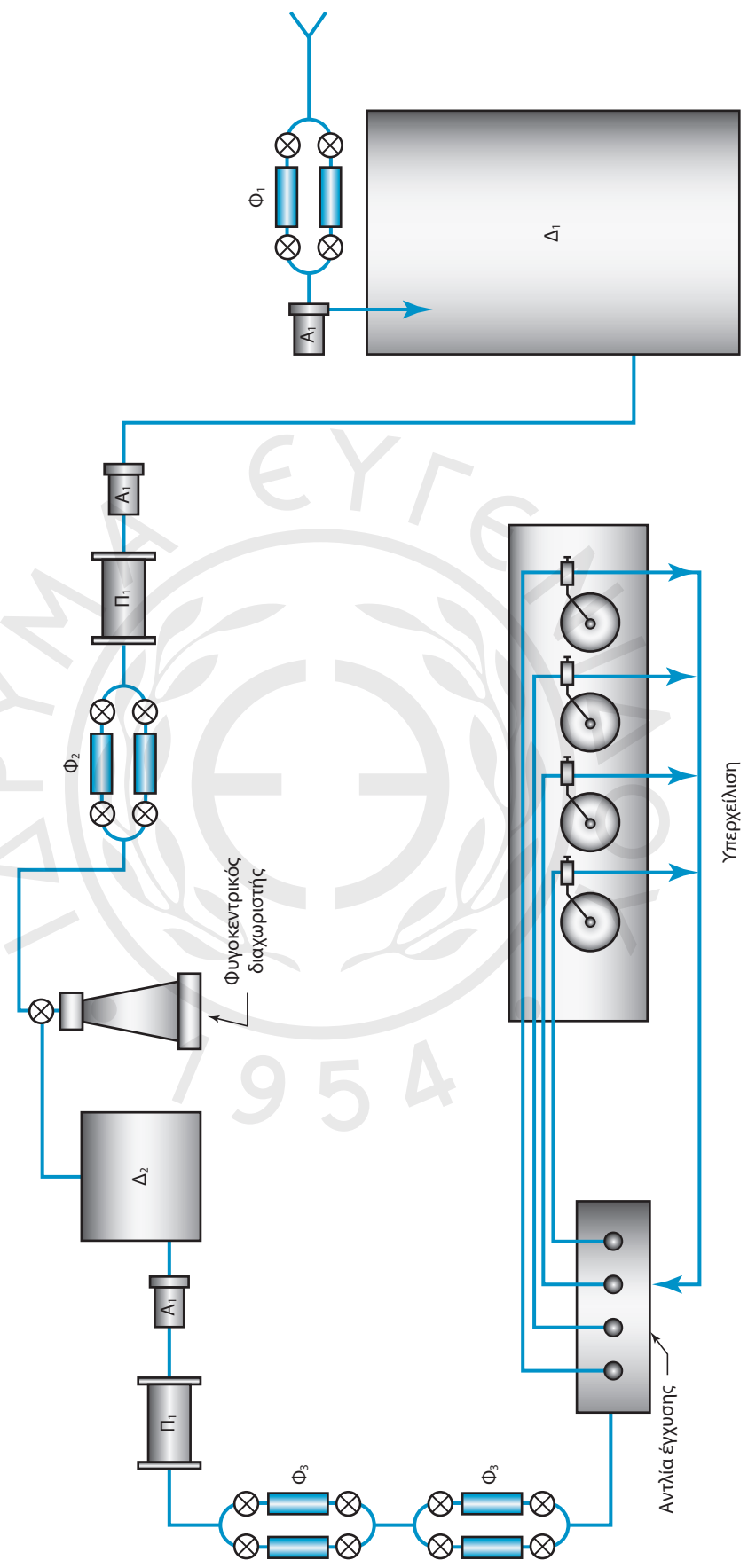


## Παράρτημα Β

### Τύποι λιπαντικών διαφόρων εταιρειών (εμπορικές ονομασίες)

| α/α                             | Προορισμός  | B.P.                             | MOBIL  | Κύρια χαρακτηριστικά  |
|---------------------------------|---|----------------------------------|--|---|
| <b>A) Λάδια MEK</b>             |   |                                  |  |   |
| 1.                              | Λίπανση κυλίνδρων μηχανών DIESEL (Diesel Cylinder Oils)                     | BP ENERGOL DL-MP30 / MP40 / MP50 | Mobilgard 312 / 412 / 512                        | Λιπαντικά απορρυπαντικού τύπου, βαρέων απαιτήσεων (HD) ενισχυμένα με αλκαλικά πρόσθετα αλκαλικής αντίδρασης.  |
| 2.                              | Λίπανση εδράνων και εμβόλων (Λάδια στροφαλοθαλάμων) (Diesel crankcase oils) | BP ENERGOL OE-HT 30              | Mobilgard 300                                    | Είναι επίσης λιπαντικά βαρέων απαιτήσεων με ιξώδες SAE 30 έως SAE 50 και υψηλό V.I. κατάλληλα ως λιπαντικά στροφαλοθαλάμων μηχανής diesel. Δεν περιέχουν αλκαλικά πρόσθετα (TBN = 0).   |
| 3.                              | Λίπανση μηχανών diesel με ενιαίο σύστημα λίπανσης κυλίνδρων και εδράνων     | BP ENERGOL IC-HF 253 / 254       | Mobilgard M330 / M430                            | Λιπαντικά MEK ισχυρά ενισχυμένα, μη αλκαλικά αντιρρυπαντικά και αντιοξειδωτικά πρόσθετα.  |
| <b>B) Λίπανση μηχανών ατμού</b> |   |                                  |  |   |
| 4.                              | Λίπανση ατμοκυλίνδρων (κυλινδρέλαια)  | BP ENERGOL AC ή DC               | Mobil extra Hecla                                | Συνήθως περιέχουν μικρή αναλογία ζωικών λιπών, και πρόσθετα που υποβοηθούν τον σχηματισμό σταθερού γαλακτώματος, που να αντέχει στο ξέπλυμα από τον υγροποιούμενο ατμό.   |
| 5.                              | Λίπανση ατμοστροβίλων (τουρμπινέλαια)                                       | BP ENERGOILTHB                   | Super Cylinder Oil<br>Mobil DTE Oil<br>DTE Heavy | Ενισχυμένα με πρόσθετα υψηλής πίεσης (EP), απαραίτητων για την αντιμετώπιση των δυσμενών συνθηκών που αντιμετωπίζονται στους μειωτήρες των στροβίλων από τις υψηλές πιέσεις και τα κρουστικά φορτία.  |
| <b>Γ) Άλλα λιπαντικά</b>        |   |                                  |  |   |
| 6.                              | Υδραυλικά λάδια   | BP BARTRAN series HV             | Mobil DTE Oil Series 10M                         | Σε υδραυλικά συστήματα και μηχανισμούς πλοίων.  |
| 7.                              | Ψυκτικά λάδια   | BP ENERGOL LPT 68                | Gargoyle Arctic Oil 300                          | Λίπανση ψυκτικών μηχανών.   |
| 8.                              | Λιπαντικά οδοντωτών τροχών  | BP ENERGOL GR-XP                 | Mobilgear  | Ορυκτέλαια με καλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και αντοχή σε μεγάλες πιέσεις.  |
| 9.                              | Λιπαντικά λίπη (γράσα) γενικής χρήσης.                                      | BP ENERGREASE LS-EP              | Mobilux No 2                                     | Γράσσα με πολλαπλές χρήσεις, που περιέχουν αντιδιαβρωτικά και αντιοξειδωτικά πρόσθετα. Συνήθως περιέχουν σαπούνια λιθίου.   |
| 10.                             | Γράσο γραφίτωμένο   | BP ENERGREASE GP-G               | Mobilgrease Special                              |   |
| 11.                             | Λιπαντικά ανοικτών οδοντωτών τροχών (Open Gear Lubricant)                   | BP ENERGOL OG                    | Mobiltac D                                       | Λιπαντικό που προσκολλάται στις λιπανόμενες επιφάνειες, ώστε να τις προστατεύει από τη διάβρωση. Στην αρχή έχει ημίρρευστη μορφή, αλλά μετά την εξάτμιση του διαλύτη παραμένει μια λιπαντική μεμβράνη, ισχυρά προσκολλημένη στις μεταλλικές επιφάνειες. |
| 12.                             | Αντισκωριακό σαπωνέλαιο   | BP ENERGEAR SHX                  | Mobilcut 100                                     | Ελαιώδης ουσία, διαλυτή στο νερό, που προστίθεται στο δίκτυο ψύξης των πετρελαιομηχανών, ώστε να το προστατεύει από τη διάβρωση.  |

**Παράρτημα Γ**  
**Δίκτυο πετρελαίου καύσης**



# Ευρετήριο όρων

## A

αναγωγή όγκου 96  
αναγωγή πυκνότητας 95  
αναλογία αέρα προς καύσιμο, AFR 10  
ανάμιξη μαζούτ με πετρέλαιο Diesel 55  
ανάφλεξη 12  
αντίδραση σύντηξης 9,170  
αντίδραση σχάσης 8,169  
ανώτερη θερμαντική ικανότητα 103  
απογαλάκτωση 133  
αποπαραφίνωση 117  
απορρυπαντικά πρόσθετα 119,148  
αποστάγματα (distillates) 55  
αργίλιο 63  
αριθμός κατακρήμνισης 94, 132, 149  
αριθμός κετανίου 44  
αριθμός οκτανίου 37  
ατελής καύση 9  
ατμόφραξη 35  
αυτανάφλεξη 16

## B

βαθμός διασκορπισμού 78  
βαθμός περίσσειας αέρα λ 9,76  
βαθμός συμπίεσης 77  
βαλβολίνες 140  
βαναδικό νάτριο 62  
βελτιωτικά δείκτη ιξώδους 115,126

## Γ

γαιάνθρακας 81

## Δ

δείκτης Diesel 46  
δείκτης αρωματικότητας (CCAI) 59  
δείκτης ιξώδους (V.I.) 112,125  
δείκτης κετανίου από υπολογισμό (CCI) 46  
Δελτίο Ανάλυσης λιπαντικών 122, 135  
δεξαμενή καθίζησης (settling tank) 69  
διεισδυτικότητα 159  
διυλιστήρια 26

## E

ειδική επιφάνεια καυσίμου 78

εκρηκτική καύση 36  
ενέργεια σχηματισμού 104  
εξανθράκωμα (carbon residue) 59,105,131

## Θ

θερμαντική ικανότητα / θερμογόνος δύναμη 82,102  
θερμαντική ικανότητα επί ξηρού 84  
θερμιδομετρική οβίδα 101  
θερμική πυρόλυση 31  
θερμοκρασία αυτανάφλεξης 17

## I

ικανότητα διείσδυσης 79  
ιξώδες 97  
ιξωδόλυση (visbreaking) 55  
ισομέρεια 22

## K

καθυστέρηση ανάφλεξης 42  
καμπύλη απόσταξης 34, 99  
καταλυτική πυρόλυση 31  
κατώτερη θερμαντική ικανότητα 103  
καύση 8  
καύσιμο χαμηλού θείου (LSFO) 66  
καύσιμο 8  
κινηματικό ιξώδες 97, 124  
κλάσματα φυσικού πετρελαίου 26, 29  
κλασματική απόσταξη 20, 27  
κλίμακα ISO 116  
κλίμακα SAE 116  
κτύπημα βενζινομηχανής 36  
κτύπημα πετρελαιομηχανής 42

## Λ

λάσπη (sludge) 67  
λίπανση 108  
λιπαντικό 108

## M

μέθοδος Fischer-Tropsch 87  
μεταλλουργικό κωκ 81  
μηχανές διπλού καυσίμου 89

## Ξ

ξηρή απόσταξη 87

**Ο**

ολεφίνες / αλκένια 21  
 ολικό ίζημα (total sediment) 59  
 ολικός αριθμός αλκαλικότητας (TBN) 130  
 όξινη βροχή 163  
 οριακή λίπανση 108, 111

**Π**

παραφίνες / αλκάνια 20  
 πλούσιο μίγμα 12  
 πολικό διάγραμμα πιέσεων 111  
 προανάφλεξη 36  
 προπορεία έγχυσης 40,47,79  
 πυκνόμετρο 95  
 πυκνότητα 94  
 πύργος απόσταξης 26  
 πυρηνική πρόωση 171  
 πυρηνικοί αντιδραστήρες 171  
 πυρίτιο 63

**Σ**

σημείο ακινησίας 128  
 σημείο ανάφλεξης 50,99,131  
 σημείο ανιλίνης 46,107  
 σημείο απόφραξης ψυχρού φίλτρου (CFPP) 105  
 σημείο δρόσου 64  
 σημείο καύσης 99  
 σημείο νέφωσης/θόλωσης 128  
 σημείο ροής 105,129  
 σημείο σταγόνας 160  
 συνεκτικότητα 156,159  
 συντελεστής τριβής 109

συσκευή αποθείωσης καυσίμων (scrubbers) 65

**Τ**

ταπεινωτές σημείου ροής 119,129  
 τάση ατμών Reid (RVP) 34  
 τέλεια καύση 9  
 τέφρα (ash) 59  
 τριβή κύλισης 108  
 τριβή ολίσθησης 108  
 τύρφη 81

**Υ**

υγραέριο (LPG) 91  
 υδροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) 90  
 υδρογόνωση 88  
 υδροδυναμική λίπανση 108, 111  
 υδρόμετρο 94  
 υπερτροφοδότηση (supercharge) 40,47  
 υπολείμματα απόσταξης (residual oils) 55

**Φ**

φαινόμενο θερμοκηπίου 164  
 φτωχό μίγμα 12  
 φυγοκεντρικοί αποχωριστές 70  
 φυγοκεντρικοί διαυγαστές (clarifiers) 73  
 φυσικό αέριο 89

**Χ**

χαλινωτές διάβρωσης 119  
 χημικά αντικροτικά πρόσθετα 38

Fuel Oil Treatment (F.O.T.) 67



Ποτέ στην ιστορία της ναυτιλίας δεν υπήρξαν περισσότεροι διαθέσιμοι τύποι καυσίμων από όσους στις μέρες μας. Κάποτε τα πλοία κινούνταν αποκλειστικά με άνθρακα, όμως σήμερα χρησιμοποιούν μείγμα καυσίμων που περιλαμβάνει όλες τις τυποποιημένες μορφές ορυκτών καυσίμων, φυτικά και ζωικά βιοκαύσιμα, LNG, αιθάνιο, μεθανόλη, αμμωνία και σε μικρότερο βαθμό πυρηνική ενέργεια, υδρογόνο και ηλεκτρικές μπαταρίες. Στο άμεσο μέλλον η ποικιλία των διαθέσιμων καυσίμων προβλέπεται να είναι ακόμα μεγαλύτερη, καθώς από το 2020 το παγκόσμιο ανώτατο όριο θείου στα ορυκτά καύσιμα, στο πλαίσιο της προστασίας του περιβάλλοντος, έχει μειωθεί δραστικά.

