

ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΡΥΠΑΝΣΗ ΘΑΛΑΣΣΩΝ, ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΕΣ ΚΑΙ
ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΑΖΑΣ ΜΙΧΑΗΛ

Α.Γ.Μ: 3303

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΛΑΜΠΟΥΡΑ ΣΤΕΦΑΝΙΑ

ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

Α.Ε.Ν ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΛΑΜΠΟΥΡΑ ΣΤΕΦΑΝΙΑ

ΘΕΜΑ: ΡΥΠΑΝΣΗ ΘΑΛΑΣΣΩΝ, ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΕΣ ΚΑΙ
ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ: ΑΖΑ ΜΙΧΑΗΛ

Α.Γ.Μ: 3303

Ημερομηνία ανάληψης της εργασίας: 23/04/2015

Ημερομηνία παράδοσης της εργασίας: 03/06/2016

	Όνοματεπώνυμο	Ειδικότης	Αξιολόγηση	Υπογραφή
	<i>ΤΣΟΥΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ</i>	<i>ΠΛΟΙΑΡΧΟΣ Α΄</i>		
	<i>ΛΑΜΠΟΥΡΑ ΣΤΕΦΑΝΙΑ</i>			
ΤΕΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ				

Ο ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ : ΤΣΟΥΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο Ρύπανση από υδρογονάνθρακες πετρελαίου	5
1.1 Σύσταση του πετρελαίου	5
1.2 Ιδιότητες του πετρελαίου	6
1.3 Πηγές πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον.....	7
1.4 Φυσικές πηγές	8
1.5 Εξόρυξη πετρελαίου	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο Η συμπεριφορά και η τύχη του πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο Οι επιπτώσεις του πετρελαίου.....	17
3.1 Τοξικές δράσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς.....	17
3.2 Τοξικότητα στα θαλασσοπούλια	18
3.3 Κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία	19
3.4 Επιδράσεις στις εμπορικές δραστηριότητες	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο Εντοπισμός πετρελαιοκηλίδων μέσω δορυφόρου.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο Μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο Ατυχήματα πετρελαιοφόρων – Μελέτες περιπτώσεων.....	34
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	44

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνήθης λειτουργία αλλά και ορισμένα ατυχήματα πλοίων όλων των κατηγοριών, συμπεριλαμβανόμενων των πετρελαιοφόρων, έχουν ως αποτέλεσμα εκροές πετρελαίου στη θάλασσα. Αυτή η εργασία εξετάζει τη ρύπανση από το πετρέλαιο στο θαλάσσιο περιβάλλον. Αρχικά αναφέρονται οι πηγές εισόδου πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον. Κατόπιν εξετάζεται η συμπεριφορά του πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον (εξάπλωση, μετακίνηση, εξάτμιση, διασπορά, γαλακτωματοποίηση, διάσπαση), καθώς και οι τοξικές επιδράσεις του στους οργανισμούς. Περιγράφονται οι τρόποι καταπολέμησης των πετρελαιοκηλίδων στην ανοιχτή θάλασσα και στις ακτές (συγκράτηση με πλωτά φράγματα και άντληση, διασκορπιστικά, επιτόπου καύση, χρήση προσροφητικών υλικών). Τέλος, παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις γνωστών ατυχημάτων πετρελαιοφόρων (Eckon Valdez, Sea Empress και Erika) και συζητούνται οι επιπτώσεις τους στο θαλάσσιο περιβάλλον και οι τρόποι αντιμετώπισης της ρύπανσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο Ρύπανση από υδρογονάνθρακες πετρελαίου

1.1 Σύσταση του πετρελαίου

Το αργό (ακατέργαστο) πετρέλαιο είναι ένα κολλώδες, σκούρο υγρό μίγμα υδρογονανθράκων μέσα στο οποίο είναι διαλυμένοι στερεοί και αέριοι υδρογονάνθρακες. Διακόσιες έως τριακόσιες διαφορετικές χημικές ενώσεις περιέχονται στο αργό πετρέλαιο. Το 75-98% αυτών είναι υδρογονάνθρακες. Οι κυριότερες κατηγορίες υδρογονανθράκων του πετρελαίου είναι (Clark, 2003):

Αλκάνια (παραφίνες): Αλκάνια ονομάζονται οι άκυκλοι υδρογονάνθρακες στο μόριο των οποίων τα άτομα άνθρακα συνδέονται με απλούς δεσμούς. Πρόκειται δηλαδή για κορεσμένους υδρογονάνθρακες. Οι ενώσεις με 1 έως 4 άτομα άνθρακα είναι αέριες, με 5 έως 16 άτομα άνθρακα υγρές και από δεκαεπτά άτομα άνθρακα και πάνω στερεές. Τα αλκάνια είναι σχετικά μη τοξικές ενώσεις. Όσο πιο μικρός είναι ο αριθμός των ατόμων άνθρακα τόσο πιο πτητικές και ευδιάλυτες στο νερό είναι οι ενώσεις.

Κυκλοαλκάνια. Τα κυκλοακάνια είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες (απλοί δεσμοί μεταξύ των ατόμων άνθρακα) που στα μόρια τους εμφανίζονται κυκλικές αλυσίδες. Τα κυκλοαλκάνια 5-6 ατόμων άνθρακα αποτελούν το 30-60% του πετρελαίου.

Αρωματικές ενώσεις. Είναι πτητικές ενώσεις που περιέχουν δακτυλίους βενζολίου και αποτελούν το 2-4% του πετρελαίου. Ειδικά οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (Poly-Aromatic Hydrocarbons – PAHs) είναι ενώσεις ύποπτες για πρόκληση καρκινογένεσης.

Η ποιότητα και η σύσταση του πετρελαίου διαφέρει από κοίτασμα σε κοίτασμα. Μπορεί να μεταβάλλεται ακόμη και στο ίδιο κοίτασμα, ανάλογα με τον χρόνο από την έναρξη άντλησής του. Ένα μέσο αργό πετρέλαιο περιέχει 84% άνθρακα, 14% υδρογόνο, 1-3% θείο, και περίπου 1% άζωτο, 1% οξυγόνο και 0,1% ανόργανα συστατικά και άλατα (USEPA, 2011). Το αργό πετρέλαιο περιέχει μέταλλα, κυριότερα εκ των οποίων είναι το βανάδιο και το νικέλιο, τα οποία περιέχονται σε θαλάσσιους οργανισμούς. Επίσης, συχνά περιέχει χλωριούχο νάτριο, το οποίο αφαιρείται όπως και το θείο. Τέλος, το αργό πετρέλαιο μπορεί να περιέχει ανθεκτικά στη διάσπαση υπολείμματα, όπως θραύσματα πυριτικών σκελετών οργανισμών, ξύλο, σπόρια, ρητίνες, άνθρακα κ.ά.

1.2 Ιδιότητες του πετρελαίου

Οι ιδιότητες του αργού πετρελαίου που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του στο περιβάλλον είναι:

- η πυκνότητα,
- η πτητικότητα,
- το ιξώδες,
- το σημείο ροής,
- η διαλυτότητα στο νερό.

Η πυκνότητα του αργού πετρελαίου εξαρτάται από την ακριβή του σύσταση και σε συνήθεις θερμοκρασίες κυμαίνεται από περίπου $0,7 \text{ g/cm}^3$ για ένα ελαφρύ αργό πετρέλαιο έως τιμές λίγο μεγαλύτερες του $1,0 \text{ g/cm}^3$ για βαριά πισσώδη πετρέλαια. Συγκριτικά, η πυκνότητα του (γλυκού) νερού στους 4°C είναι 1 g/cm^3 και στους 25°C είναι $0,997 \text{ g/cm}^3$. Η τυπική πυκνότητα του θαλασσινού νερού είναι $1,03 \text{ g/cm}^3$ (National Research Council, 2003). Άρα λοιπόν το αργό πετρέλαιο είναι σε γενικές γραμμές αραιότερο από το γλυκό και από το θαλασσινό νερό.

Το αργό πετρέλαιο είναι ένα μίγμα ουσιών με διαφορετική πτητικότητα. Ένα μέτρο της πτητικότητας ενός πετρελαίου αποτελούν τα χαρακτηριστικά διύλισής του. Η διύλιση είναι μια διαδικασία κλασματικής απόσταξης κατά την οποία το αργό πετρέλαιο θερμαίνεται και τα διάφορα κλάσματά του φτάνουν στο σημείο βρασμού τους, εξατμίζονται και κατόπιν ψύχονται και συμπυκνώνονται ξεχωριστά και κατ' αυτόν τον τρόπο διαχωρίζονται (πίνακας 1). Η ελαφριά βενζίνη αποτελεί τη βάση για τη βενζίνη, η νάφθα αποτελεί πρώτη ύλη για τη βιομηχανία των πετροχημικών, το μαζούτ χρησιμοποιείται ως καύσιμο για τα ποντοπόρα πλοία και τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και το ασφατικό υπόλειμμα χρησιμοποιείται στην παραγωγή πίσσας. Τα πετροχημικά προϊόντα που προέρχονται από τη νάφθα περιλαμβάνουν πλαστικά, εντομοκτόνα, παυσίπονα, αντιβιοτικά, συντηρητικά, αρώματα, απορρυπαντικά και πολλά άλλα προϊόντα πολύτιμα για την καθημερινή ζωή. Ορισμένα πετρέλαια περιέχουν μεγαλύτερα ποσοστά ασφατενίων, εξατμίζονται δύσκολα και παραμένουν ανέπαφα στο θαλάσσιο περιβάλλον για μεγαλύτερο διάστημα.

Κλάσμα πετρελαίου	Σημείο βρασμού (°C)	Αριθμός ατόμων C
Αέρια πετρελαίου	30	3-4
Ελαφριά βενζίνη	30-140	4-6
Νάφθα	120-175	7-10
Κηροζίνη	165-200	10-14
Ντήζελ	175-365	15-20
Μαζούτ, ασφαλτικό υπόλειμμα	350	□ 20

Πίνακας 1. Κλάσματα διύλισης αργού πετρελαίου. Πηγή: Clark (2003).

Το ιξώδες ενός αργού πετρελαίου αποτελεί μέτρο της αντίστασής του στη ροή. Πετρέλαια υψηλού ιξώδους ρέουν δυσκολότερα από αυτά χαμηλότερου ιξώδους. Όλα γίνονται πιο ιξώδη καθώς μειώνεται η θερμοκρασία (National Research Council, 2003). Το κινηματικό ιξώδες μετριέται σε centistokes ($1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$)

Το σημείο ροής είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία υπό την οποία εξακολουθεί να ρέει το πετρέλαιο. Εξαρτάται από το περιεχόμενό του σε ασφαλτένια και κηρούς.

Η διαλυτότητα του αργού πετρελαίου στο θαλασινό νερό είναι πολύ μικρή, της τάξης των 8-70 ppm σε συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος ($20\text{-}28^\circ\text{C}$) (Hamam et al., 1987). Εξαρτάται δε από τη σύσταση του πετρελαίου (τα βαριά πετρέλαια είναι πιο δυσδιάλυτα), από τη θερμοκρασία, την αλατότητα και τις λοιπές ιδιότητες του νερού.

1.3 Πηγές πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον

Η ρύπανση της θάλασσας από πετρέλαιο ευαισθητοποιεί το κοινό διότι γίνεται αισθητή είτε απευθείας, όταν ρυπαίνει τις ακτές κολύμβησης, είτε από εικόνες στα μέσα μαζικής ενημέρωσης, όταν μετά από ατύχημα ενός πετρελαιοφόρου δημιουργείται πετρελαιοκηλίδα. Παρ' όλα αυτά, το πετρέλαιο εισέρχεται στη θάλασσα με πολλούς τρόπους και όχι μόνο από τα ατυχήματα των πετρελαιοφόρων. Πετρέλαιο μπορεί να εκρέει στο θαλάσσιο περιβάλλον σε μεγάλες ποσότητες από φυσικές πηγές, κατά την εξόρυξή του, κατά τη μεταφορά και κατά τη χρήση/κατανάλωσή του.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι δύσκολο να εκτιμηθεί με ακρίβεια η συνολική ποσότητα πετρελαϊκών υδρογονανθράκων που εισέρχεται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η

ποσότητα αυτή μειώνεται σταδιακά, ενώ η σχετική συνεισφορά των επιμέρους πηγών μεταβάλλεται με τον χρόνο λόγω της εφαρμογής των νέων κανονισμών (MARPOL και εθνικοί ή περιφερειακοί κανονισμοί), τεχνολογικών εξελίξεων και οικονομικών αλλαγών.

1.4 Φυσικές πηγές

Κοιτάσματα πετρελαίου κοντά στην επιφάνεια της γης διαρρέουν αργά στην επιφάνεια επί χιλιετίες. Κάποια από αυτά είναι υποθαλάσσια (π.χ. Κόλπος Μεξικού, ακτή Καλιφόρνιας, Αλάσκα). Σύμφωνα με την εκτίμηση του National Research Council (2003), οι φυσικές πηγές αποτελούν τη μεγαλύτερη πηγή πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον, με συνεισφορά που φτάνει περίπου το 46% επί του συνόλου. Ένα ενδιαφέρον στοιχείο είναι ότι παρόλο που οι διαρροές αυτές είναι τεράστιες, επειδή συμβαίνουν με αργό ρυθμό επιτρέπουν στους οργανισμούς να εγκλιματιστούν και οι συνέπειές τους στη βιοκοινότητα των περιοχών είναι μικρότερες από τις αναμενόμενες.

1.5 Εξόρυξη πετρελαίου

Ιστορικά, η εξόρυξη πετρελαίου αποτελούσε σημαντική πηγή πετρελαιοειδών στο θαλάσσιο περιβάλλον. Σταδιακά όμως η βελτίωση της τεχνολογίας και η εκπαίδευση του προσωπικού έχουν μειώσει σημαντικά τις διαρροές, είτε ατυχηματικές είτε λόγω της καθημερινής λειτουργίας.

Κατά την εξόρυξη πετρελαίου οι μεγαλύτερες εκπομπές πετρελαίου στη θάλασσα προέρχονται από το παραγόμενο νερό (produced water). Πρόκειται για νερό παγιδευμένο σε υπόγειους σχηματισμούς, που έρχεται στην επιφάνεια κατά την εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου. Επίσης, μπορεί να είναι νερό που έχει εγχυθεί ώστε να υποβοηθήσει την εξόρυξη του πετρελαίου. Επειδή το νερό αυτό έχει έρθει σε επαφή με το πετρέλαιο, περιέχει ίχνη πετρελαίου, άλατα, χημικά εξόρυξης, βαρέα μέταλλα και ραδιενέργεια. Θεωρείται βιομηχανικό απόβλητο που χρήζει κατάλληλης επεξεργασίας και διάθεσης. Εκτός του παραγόμενου νερού, η λάσπη από τις γεωτρήσεις είναι ρυπασμένη με πετρέλαιο.

Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις εξόρυξης πετρελαίου διαρρέει με έκρηξη και τότε μεγάλες ποσότητες εκλύονται στο θαλάσσιο περιβάλλον πριν η διαρροή τεθεί υπό έλεγχο. Για παράδειγμα, τον Απρίλιο του 1977, στη νορβηγική πλευρά της Βόρειας Θάλασσας, μια τέτοια έκρηξη είχε ως αποτέλεσμα τη διαρροή 20.000-30.000

τόνων πετρελαίου στη θάλασσα. Η διαρροή αυτή είναι ελάχιστη μπροστά σε εκείνη που συνέβη το 1991, στο τέλος του πολέμου του Κόλπου, μετά από δολιοφθορά στους τερματικούς σταθμούς, οπότε απελευθερώθηκαν 1 εκατομμύριο τόνοι πετρελαίου στον Περσικό Κόλπο. Τέλος, το 2010, μετά από ατύχημα σε εξέδρα εξόρυξης πετρελαίου στον κόλπο του Μεξικού, τεράστιος όγκος πετρελαίου, που εκτιμάται στα 780.000 m³, διέρρευε επί τρεις μήνες στη θάλασσα έως ότου σφραγιστεί το σημείο διαρροής.

Συνολικά, η εξόρυξη πετρελαίου συνεισφέρει κατά 5,7% στο σύνολο του πετρελαίου που εισέρχεται παγκοσμίως στο θαλάσσιο περιβάλλον από ανθρωπογενείς πηγές (National Research Council, 2003).



Εικόνα 1. Εικόνα που δείχνει τον τρόπο με τον οποίο εξορύσσεται το πετρέλαιο από την θάλασσα. (Πηγή: Έρευνα μεταλλειολόγου μηχανικού ΕΜΠ. , <http://www.oryktosploutos.net/2015/09/vs.html>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο Η συμπεριφορά και η τύχη του πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον

Αμέσως μετά τη διαρροή του αργού πετρελαίου ή προϊόντων του στο θαλάσσιο περιβάλλον ξεκινούν διεργασίες μετασχηματισμού του, που καταλήγουν σε ουσίες με διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες από τις αρχικές ή στην απομάκρυνση του πετρελαίου από το νερό.

Εξάπλωση

Το πετρέλαιο είναι ένα υγρό μίγμα υδρογονανθράκων που έχει μικρότερη πυκνότητα από το νερό και είναι δυσδιάλυτο στο νερό. Έτσι, αμέσως μόλις εκχυθεί στη θάλασσα *εξαπλώνεται* (spreading) στην επιφάνεια του νερού και δημιουργεί ένα λεπτό υμένιο, δηλαδή μια πετρελαιοκηλίδα. Ο ρυθμός εξάπλωσης και το πάχος της πετρελαιοκηλίδας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία της θάλασσας και τη φύση του πετρελαίου. Ένα ελαφρύ πετρέλαιο θα εξαπλωθεί γρηγορότερα και θα σχηματίσει λεπτότερο στρώμα σε σύγκριση με ένα βαρύ πετρέλαιο. Η αύξηση της θερμοκρασίας της θάλασσας έχει ως αποτέλεσμα τη γρηγορότερη εξάπλωση και τον σχηματισμό λεπτότερου υμενίου. Υπολογίζεται ότι 1 tn περσικού αργού πετρελαίου σχηματίζει μέσα σε 10 min κηλίδα πάχους 0,1 mm και διαμέτρου 48 m. Αναφέρονται παραδείγματα πετρελαίων που εξαπλώνονται σε αρκετά τετραγωνικά χιλιόμετρα μέσα σε λίγες ώρες.

Στην αρχή το πετρέλαιο εξαπλώνεται ως μια συνεκτική κηλίδα, η οποία γρήγορα αρχίζει να σπάει σε κομμάτια. Στην ανοιχτή θάλασσα ο αέρας δημιουργεί στενές ζώνες παράλληλες με την κατεύθυνση του ανέμου. Επίσης, καθώς το πετρέλαιο εξαπλώνεται και το πάχος της πετρελαιοκηλίδας μειώνεται, αλλάζει και το χρώμα της: από μαύρο ή σκούρο καφέ γίνεται ιριδίζον και ασημί. Γενικά, το πάχος μιας πετρελαιοκηλίδας μπορεί να είναι μικρότερο από ένα μικρόμετρο ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) και να φτάνει έως και μερικά χιλιοστά (Clark, 2003).

Μετακίνηση

Μια πετρελαιοκηλίδα δεν παραμένει σε ένα σημείο, αλλά *μετακινείται* (μεταφέρεται), με ταχύτητα ίση με το 60% της ταχύτητας των ρευμάτων και το 2-4% της ταχύτητας του ανέμου. Σε κλειστές θάλασσες και εκβολές, οι παλίρροιες και τα θαλάσσια ρεύματα έχουν μεγαλύτερη επίδραση στη μετακίνηση της

πετρελαιοκηλίδας σε σχέση με τον άνεμο. Επίσης, όταν το πετρέλαιο διασπαρεί στη στήλη του νερού (γαλακτωματοποίηση), η μετακίνησή του επηρεάζεται κυρίως από τα ρεύματα και όχι από τον άνεμο (Clark, 2003).

Εξάτμιση

Η σύσταση της πετρελαιοκηλίδας αλλάζει συνεχώς από τη στιγμή της διαρροής. Τα ελαφρά (μικρού μοριακού βάρους) κλάσματα εξατμίζονται γρήγορα. Συγκεκριμένα, οι υδρογονάνθρακες με λιγότερα από 15 άτομα άνθρακα εξατμίζονται τις πρώτες ώρες ή μέρες ενός ατυχήματος. Οι ρυθμοί εξάτμισης εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία, το πάχος της κηλίδας και τη φύση του πετρελαίου. Έτσι, οι υψηλές θερμοκρασίες και ο δυνατός άνεμος ευνοούν την εξάτμιση. Επίσης, όσο μικρότερο είναι το πάχος της πετρελαιοκηλίδας τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο λόγος επιφάνειας προς όγκο και τόσο μεγαλύτερη η εξάτμιση, καθώς είναι επιφανειακό φαινόμενο (Clark, 2003).

Τα υπολείμματα που παραμένουν μετά την εξάτμιση έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα και ιξώδες και αυτό επηρεάζει τόσο τη συμπεριφορά τους στο θαλάσσιο περιβάλλον όσο και τις μεθόδους με τις οποίες μπορεί να αντιμετωπιστεί η πετρελαιοκηλίδα (Clark, 2003).

Εκτιμάται ότι ανάλογα με τη σύσταση του πετρελαίου και τις μετεωρολογικές συνθήκες ποσοστό ίσο με το 20-50% του όγκου του αργού πετρελαίου απομακρύνεται λόγω εξάτμισης. Το 1/3 του πετρελαίου που εκλύθηκε λόγω του ατυχήματος του δεξαμενόπλοιου Torrey Canyon τον Μάρτιο του 1967 στα ανοιχτά των ακτών της Μ. Βρετανίας απομακρύνθηκε από τη θάλασσα λόγω εξάτμισης (Clark, 2003). Πετρελαιοκηλίδες προϊόντων πετρελαίου όπως η κηροζίνη και η βενζίνη μπορεί να εξατμιστούν τελείως μέσα σε λίγες ώρες (ITOPF, 2011a). Όμως, όταν τόσο πτητικά πετρέλαια διαρρεύσουν σε περιορισμένες περιοχές υπάρχει κίνδυνος φωτιάς και έκρηξης.

Διάλυση

Η διαλυτότητα των συστατικών του πετρελαίου στο νερό είναι πολύ μικρή και μειώνεται απότομα με την αύξηση του μοριακού τους βάρους. Έτσι, ένα μικρό μόνο ποσοστό του πετρελαίου, κυρίως των συστατικών με μικρό μοριακό βάρος, διαλύεται στο θαλασσινό νερό. Επειδή τα κλάσματα του πετρελαίου με μικρό μοριακό βάρος είναι παράλληλα πτητικές ενώσεις (πίνακας 1), η εξάτμιση και η διάλυση είναι ανταγωνιστικές διαδικασίες. Οι σχετικοί ρυθμοί τους εξαρτώνται από την τάση

ατμών και την υδατοδιαλυτότητα κάθε υδρογονάνθρακα. Στις περισσότερες περιπτώσεις η εξάτμιση είναι πολύ σημαντικότερη της διάλυσης. Η διάλυση γίνεται σημαντική σε περιπτώσεις χαμηλών θερμοκρασιών και ανατάραξης των νερών με δημιουργία τύρβης (Clark, 2003).

Διασπορά

Τα κύματα και η τύρβη στην επιφάνεια της θάλασσας παρέχουν την απαιτούμενη μηχανική ενέργεια ώστε να σπάσει η πετρελαιοκηλίδα σε μικρά σταγονίδια πετρελαίου. Όταν τα σταγονίδια έχουν διάμετρο μικρότερη από 70 μm περίπου, παραμένουν ευκολότερα σε αιώρηση στη στήλη του νερού, διότι η φυσική τους τάση να ανέβουν και πάλι στην επιφάνεια ως αραιότερα του νερού αντισταθμίζεται από τις τυρβώδεις δυνάμεις. Σχηματίζεται έτσι ένα γαλάκτωμα πετρελαίου-σε-νερό. Τα μεγαλύτερα σταγονίδια επανέρχονται στην επιφάνεια της θάλασσας όπου συσσωματώνονται με άλλα και ξαναδημιουργούν κηλίδα (ITOPF, 2011a).

Η διασπορά του πετρελαίου το απομακρύνει από την επιφάνεια, οπότε τα πουλιά που βουτάνε στην επιφάνεια του νερού για να βρουν τροφή δεν εκτίθενται στο πετρέλαιο. Η αιώρηση των μικρών σταγονιδίων πετρελαίου στη στήλη του νερού έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή ανάμιξή τους με μεγαλύτερες ποσότητες νερού και συνεπώς τη μείωση των συγκεντρώσεων του πετρελαίου στο νερό, μειώνοντας έτσι την έκθεση των οργανισμών που βρίσκονται στη στήλη του νερού. Επιπλέον, ο σχηματισμός μικρών σταγονιδίων με αυξημένο λόγο επιφάνειας προς όγκο σε σχέση με αυτόν της πετρελαιοκηλίδας επιταχύνει τη βιοδιάσπαση του πετρελαίου, διότι τα βακτήρια βρίσκουν μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια για να δράσουν.

Από την άλλη πλευρά, η διασπορά δεν εξαφανίζει το πετρέλαιο από τη θάλασσα (όπως γίνεται με την εξάτμιση ή τη μικροβιακή διάσπαση), απλά το μεταφέρει από την επιφάνεια σε όλη τη στήλη του νερού, όπου μπορεί να προσροφηθεί σε αιωρούμενα σωματίδια, να εναποτεθεί στο ίζημα ή εμφανίσει τοξική δράση σε οργανισμούς στη στήλη του νερού.

Η διασπορά εξαρτάται κυρίως από τη φύση του πετρελαίου και την κατάσταση της θάλασσας και ευνοείται από το σχετικά μικρό ιξώδες του πετρελαίου και από τη θραύση κυμάτων. Υπό κατάλληλες συνθήκες, μια πετρελαιοκηλίδα μπορεί να διασπαρεί τελείως μέσα σε λίγες μέρες. Η τάση αυτή του πετρελαίου ενισχύεται από χημικές ουσίες που ονομάζονται διασκορπιστικά. Αντιστρόφως, ιξώδη πετρέλαια τείνουν να σχηματίζουν κομμάτια μεγάλου πάχους στην επιφάνεια και δεν

διασπείρονται ακόμα και με τη δράση διασκορπιστικών (ITOPF, 2011a).

Γαλακτωματοποίηση

Πολλά πετρέλαια απορροφούν νερό και σχηματίζουν γαλακτώματα νερού σε πετρέλαιο (εικόνα 1). Αυτό μπορεί να αυξήσει τον όγκο του πετρελαίου έως πέντε φορές. Τα γαλακτώματα σχηματίζονται ευκολότερα όταν η συγκέντρωση νικελίου/βαναδίου στο πετρέλαιο ξεπερνά συνδυαστικά τα 15 ppm ή όταν το πετρέλαιο περιέχει ασφαλένια σε ποσοστό μεγαλύτερο του 0,5%. Η παρουσία των συστατικών αυτών και παράλληλα άνεμοι πάνω από 3 μποφόρ καθορίζουν τον ρυθμό δημιουργίας του γαλακτώματος. Πετρέλαια με μεγαλύτερο ιξώδες, όπως το HFO, γαλακτωματοποιούνται δυσκολότερα σε σχέση με πιο ρευστά πετρέλαια (ITOPF, 2011a).

Καθώς το γαλάκτωμα εξελίσσεται, η κίνηση του πετρελαίου λόγω των κυμάτων βοηθάει στη μείωση της διαμέτρου των σταγονιδίων του νερού, αυξάνοντας σταδιακά το ιξώδες του γαλακτώματος. Παράλληλα, τα ασφαλένια επικαλύπτουν τα σταγονίδια του νερού και αυτό αυξάνει τη σταθερότητα του γαλακτώματος. Καθώς η ποσότητα του νερού που ενσωματώνεται στο πετρέλαιο αυξάνεται, αυξάνεται και η πυκνότητα του γαλακτώματος και τείνει προς αυτή του νερού, χωρίς όμως να την ξεπερνά. Σταθερά γαλακτώματα μπορεί να περιέχουν 70-80% νερό, είναι ημιστερεά και το χρώμα τους είναι καφέ/κόκκινο, πορτοκαλί ή κιτρινωπό. Τα λιγότερο σταθερά διαχωρίζονται σε πετρέλαιο και νερό, αν θερμανθούν από τον ήλιο σε ήρεμες καιρικές συνθήκες.

Ο σχηματισμός γαλακτωμάτων νερού σε πετρέλαιο επιβραδύνει άλλες διεργασίες μετασχηματισμού του πετρελαίου και αποτελεί τον κύριο λόγο για την παραμονή των ελαφριών και μεσαίων πετρελαίων ανέπαφων στη θάλασσα και στις ακτές (ITOPF, 2011a).

Φωτοοξειδωση

Οι υδρογονάνθρακες αντιδρούν με το οξυγόνο παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας. Η φωτοοξειδωση λαμβάνει χώρα σε όλη τη διάρκεια ζωής της πετρελαιοκηλίδας, παρ' όλα αυτά συνολικά παίζει δευτερεύοντα ρόλο στον μετασχηματισμό του πετρελαίου. Ακόμη και υπό έντονη ηλιακή ακτινοβολία, λεπτού πάχους κηλίδες φωτοδιασπώνται αργά και όχι πάνω από 0,1% ανά ημέρα.

Η φωτοδιάσπαση συστατικών με μεγάλο ιξώδες δημιουργεί σταθερότερα προϊόντα. Αυτό είναι εμφανές σε κομμάτια πίσσας στις παραλίες, τα οποία σταδιακά

επικαλύπτονται από μια σταθερή κρούστα οξειδωμένου πετρελαίου μαζί με σωματίδια ιζήματος, ενώ εσωτερικά περιέχουν πιο φρέσκο, μαλακό πετρέλαιο (ITOPF, 2011a).

Βύθιση και ιζηματοποίηση

Τα περισσότερα πετρέλαια έχουν χαμηλή πυκνότητα και επιπλέουν στο θαλασσινό νερό, εκτός και αν αλληλεπιδράσουν με πυκνότερα υλικά. Για παράδειγμα, τα σταγονίδια του πετρελαίου σε διασπορά μπορεί να προσροφηθούν σε αιωρούμενα σωματίδια ιζήματος ή οργανικής ύλης και σιγά σιγά να βυθιστούν. Ρηχές παράκτιες θαλάσσιες περιοχές ή οι εκβολές ποταμών έχουν μεγάλες ποσότητες αιωρούμενης ύλης στη στήλη του νερού.

Ειδικά το βαρύ καύσιμο πετρέλαιο και τα γαλακτώματα νερού σε πετρέλαιο έχουν πυκνότητες παραπλήσιες του νερού και καθιζάνουν ευκολότερα. Ελάχιστα πετρέλαια έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη αυτής του θαλασσινού νερού ($1,025 \text{ g/cm}^3$) και καθιζάνουν αμέσως μετά την εκροή στη θάλασσα (ITOPF, 2011a).

Μικροβιακή διάσπαση

Το αργό πετρέλαιο προέρχεται από υπολείμματα πλαγκτόν και άλλων οργανισμών, έχει δηλαδή φυσική προέλευση. Επίσης υπάρχουν περιοχές στον πλανήτη που εκρέει φυσικά σε υποθαλάσσια κοιτάσματα. Γι' αυτό υπάρχουν θαλάσσιοι μικροοργανισμοί (βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα που χρησιμοποιούν τους υδρογονάνθρακες του πετρελαίου ως πηγή άνθρακα και ενέργειας) που έχουν αναπτύξει την ικανότητα να το διασπούν. Οι οργανισμοί αυτοί βρίσκονται παντού στις θάλασσες, αλλά είναι τυπικά περισσότεροι σε περιοχές με φυσικές εκροές πετρελαίου και σε χρόνια ρυπασμένες, κυρίως παράκτιες περιοχές που δέχονται ανεπεξέργαστα αστικά και βιομηχανικά απόβλητα (ITOPF, 2011a).

Στον ρυθμό και την έκταση της βιοδιάσπασης επιδρούν τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου, η διαθεσιμότητα οξυγόνου και θρεπτικών συστατικών και η θερμοκρασία. Όλα τα συστατικά του αργού πετρελαίου διασπώνται από βακτήρια και μύκητες με διαφορετικούς ρυθμούς, ανάλογα με τη χημική τους δομή. Οι ενώσεις με μικρό αριθμό ατόμων άνθρακα και ευθεία ή διακλαδισμένη αλυσίδα διασπώνται γρηγορότερα από όλες. Οι κυκλικές ενώσεις διασπώνται με πιο αργούς ρυθμούς. Ενώσεις με μεγάλο αριθμό ατόμων άνθρακα, όπως το ασφαλτικό υπόλειμμα, διασπώνται εξαιρετικά αργά.

Εκτός από τον άνθρακα, οι μικροοργανισμοί χρειάζονται διάφορα άλλα θρεπτικά συστατικά για να αναπτυχθούν. Η συγκέντρωση των συστατικών αυτών –

και κυρίως των νιτρικών (NO_3^-), των φωσφορικών (PO_4^{3-}) και του σιδήρου— μπορεί να αποβεί περιοριστικός παράγοντας στον ρυθμό βιοδιάσπασης του πετρελαίου, όταν εκρέουν τεράστιες ποσότητες υδρογονανθράκων πετρελαίου στη θάλασσα.

Κάθε τύπος μικροοργανισμού τείνει να διασπά συγκεκριμένες κατηγορίες υδρογονανθράκων και έτσι απαιτείται μεγάλο εύρος οργανισμών να δράσουν ταυτόχρονα ή διαδοχικά για να προχωρήσει η βιοδιάσπαση. Καθώς εξελίσσεται η διαδικασία, αναπτύσσεται μια σύνθετη βιοκοινότητα στην περιοχή. Η βιοδιάσπαση περιορίζεται από έλλειψη θρεπτικών συστατικών ή του αναγκαίου οξυγόνου. Και πάντα ορισμένα μεγάλα και σύνθετα μόρια συστατικών του πετρελαίου είναι ανθεκτικά στη βιοδιάσπαση και παραμένουν ως υπολείμματα (ITOPF, 2011a).

Διάφορες ουσίες παράγονται καθώς οι μικροοργανισμοί βιοδιασπούν τους υδρογονάνθρακες πετρελαίου. Τα τελικά προϊόντα είναι κυρίως CO_2 και H_2O .



Εικόνα 2. Πετρελαιοκηλίδα κοντά στο Πας α Λουτρ της Λουιζιάνας, ατύχημα Deepwater Horizon. Εικόνα που δείχνει σκούρο καφέ και πορτοκαλί γαλάκτωμα σε ζώνη σύγκλισης με ιριδίζουσες, ασημί ανταύγειες. (Πηγή: NOAA, <http://oceanservice.noaa.gov/deepwaterhorizon/image>)

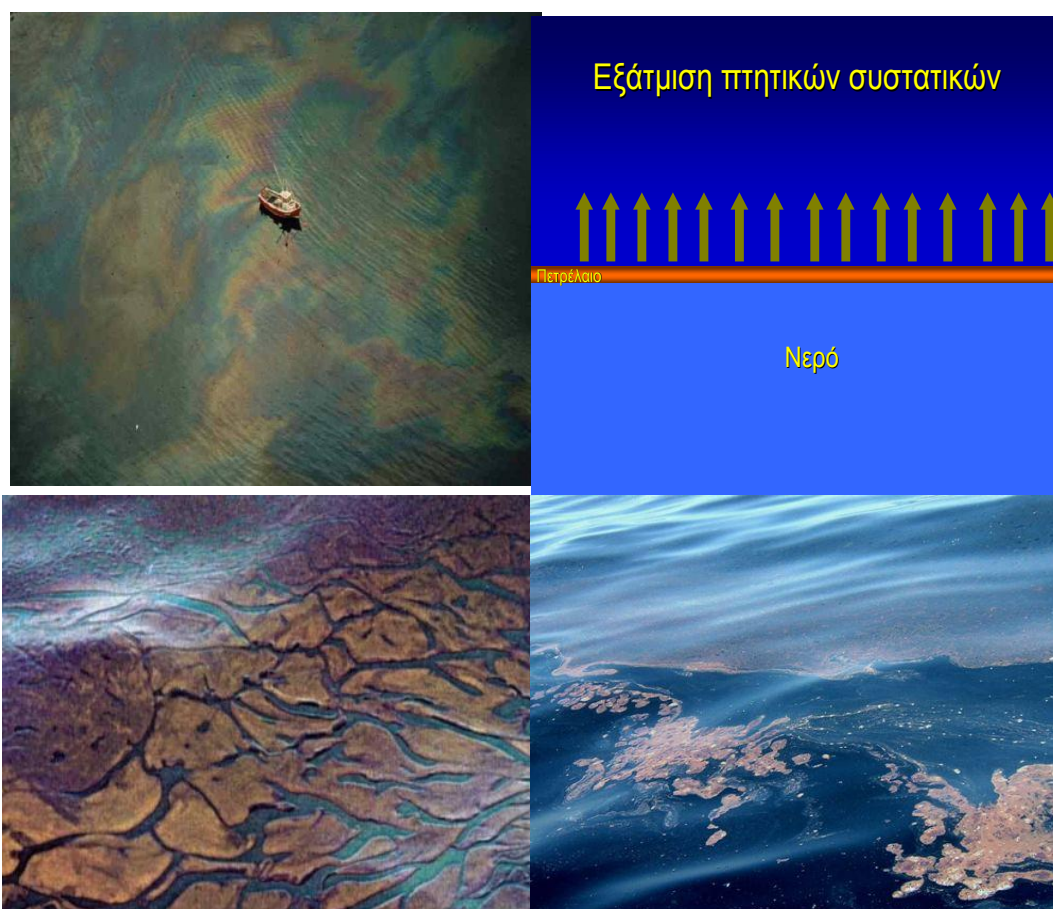
Οι μικροοργανισμοί διαβιούν στο νερό, από το οποίο παίρνουν το απαραίτητο οξυγόνο και θρεπτικά συστατικά. Η βιοδιάσπαση συμβαίνει στη διεπιφάνεια πετρελαίου - νερού. Η φυσική ή η υποβοηθούμενη με χημικά διασπορά του πετρελαίου σε όλη τη στήλη του νερού οδηγεί σε αύξηση της διαθέσιμης διεπιφάνειας πετρελαίου - νερού, ενισχύοντας τη βιοδιάσπαση. Αντίθετα, πετρέλαιο που επιπλέει στην επιφάνεια (ως πετρελαιοκηλίδα ή γαλάκτωμα νερού σε πετρέλαιο) έχει μικρότερη διεπαφή με το νερό και άρα διασπάται αργά. Ομοίως, πετρέλαιο που

εκβράζεται στις ακτές σε παχιά στρώματα μπορεί να παραμείνει ανέπαφο για χρόνια. Τέλος, στα βαθιά νερά και τα ιζήματα οι ταχύτητες βιολογικής οξείδωσης είναι μικρές, λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών και της έλλειψης οξυγόνου.

Η βιοδιάσπαση είναι μια αργή διαδικασία με περιορισμούς. Παρ' όλα αυτά μακροπρόθεσμα είναι ο βασικός μηχανισμός φυσικής απομάκρυνσης του παραμένουτος πετρελαίου από τις ακτές και τη θάλασσα (ITOPF, 2011a).

Συνδυασμένες διεργασίες

Από την στιγμή που θα βρεθεί το πετρέλαιο στη θάλασσα, υπόκειται αμέσως σε διεργασίες μετασχηματισμού. Οι πρώτες είναι η εξάπλωση, η εξάτμιση, η διασπορά, η γαλακτωματοποίηση, η διάλυση και η μετακίνηση. Σε επόμενο χρόνο ακολουθούν η φωτοοξείδωση, η καταβύθιση και η βιοδιάσπαση, οι οποίες και καθορίζουν την τελική τύχη του πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον (ITOPF, 2011a).



Εικόνα 3. Εικόνα που δείχνει την εξάπλωση, την εξάτμιση, την διασπορά και την γαλακτωματοποίηση που αποτελούν τις πρώτες από τις διεργασίες μετασχηματισμού του πετρελαίου. (Πηγή: Πανεπιστήμιο Αιγαίου-Σχολή Περιβάλλοντος-Τμήμα επιστημών θαλάσσης, [eurydice.lib.aegean.gr/ original /id1620/file0.doc](http://eurydice.lib.aegean.gr/original/id1620/file0.doc))

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο Οι επιπτώσεις του πετρελαίου

3.1 Τοξικές δράσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς

Η τοξικότητα των συστατικών του πετρελαίου ανάλογα με τη χημική δομή τους αυξάνει ως εξής: αλκάνια < ναφθένια (κυκλικοί υδρογονάνθρακες) < αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Για ενώσεις με την ίδια χημική δομή, τα διάφορα κλάσματα μικρού μοριακού βάρους είναι τοξικότερα από αυτά μεγαλύτερου μοριακού βάρους. Έτσι, τα οκτάνια και τα δεκάνια είναι ισχυρά τοξικά, ενώ τα δωδεκάνια και οι μεγαλύτερου μοριακού βάρους παραφίνες είναι σχεδόν μη τοξικές ενώσεις. Βεβαίως τα κλάσματα μικρού μοριακού βάρους (υδρογονάνθρακες με λιγότερα από 15 άτομα άνθρακα) εξατμίζονται τις πρώτες μέρες ή ώρες ενός ατυχήματος και για τον λόγο αυτό η τοξικότητα του πετρελαίου που έχει εκχυθεί στη θάλασσα μειώνεται με τον χρόνο (Clark, 2003).

Το πετρέλαιο επιδρά στην αναπαραγωγή, την ανάπτυξη, και τη συμπεριφορά των οργανισμών. Σε γενικές γραμμές, στην ανοιχτή θάλασσα και τις παράκτιες περιοχές, τα ενήλικα ψάρια με εμπορική σημασία για τον άνθρωπο έχουν την ικανότητα να αποφεύγουν περιοχές στις οποίες επιπλέει πετρέλαιο και σπάνια πεθαίνουν. Τα αυγά των ψαριών και οι προνύμφες τους όμως είναι ευάλωτα στη ρύπανση από πετρέλαιο και έχει παρατηρηθεί θάνατος των προνυμφών και μείωση του ποσοστού εκκολαπτόμενων αυγών σε συγκεντρώσεις πετρελαίου 10-25 ng/L. Υπάρχουν αναφορές για ανάπτυξη όγκων σε ψάρια και δίθυρα που διαβιούν σε περιοχές με χρόνια ρύπανση από υδρογονάνθρακες πετρελαίου. Επίσης το πετρέλαιο αυξάνει την ευαισθησία των ψαριών στις ασθένειες (Clark, 2003).

Οι επιβλαβείς επιδράσεις του πετρελαίου είναι μεγαλύτερες στους οργανισμούς που διαβιούν σε διαπαλιρροιακά ή ρηχά νερά με κινητά (αμμώδη) υποστρώματα και η βλάβη μπορεί να διαρκέσει για χρόνια. Αυτό συμβαίνει διότι το πετρέλαιο εισέρχεται στο ίζημα, με αποτέλεσμα να παραμένει εκεί ανέπαφο, λόγω της απουσίας οξυγόνου και φωτός. Σε τέτοιες περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί σημαντική μείωση των πληθυσμών βενθικών ειδών (καβουριών, στρειδιών και μυδιών) με διάρκεια έως και έξι χρόνια μετά την εισροή πετρελαίου (Clark, 2003).

Το πλαγκτόν και ιδιαίτερα το νευστόν, που ζει στα ανώτερα λίγα μικρόμετρα (μm) της στήλης του νερού, επηρεάζεται από την παρουσία του πετρελαίου. Το αρωματικό κλάσμα του πετρελαίου είναι τοξικότερο στο πλαγκτόν σε σύγκριση με τις

αλειφατικές ενώσεις (π.χ. αλκάνια και κυκλοαλκάνια). Καθώς ο χρόνος μετά την έκλυση του πετρελαίου περνάει, διεργασίες όπως η εξάτμιση και η διάλυση αλλάζουν τη σύσταση του πετρελαίου (γήρανση πετρελαίου – weathering of oil), απομακρύνοντας τα ελαφρύτερα συστατικά του, οπότε η τοξικότητά του στο πλαγκτόν μειώνεται. Γενικά, ενώ έχει παρατηρηθεί ότι μετά από ένα έντονο επεισόδιο ρύπανσης από πετρέλαιο οι πλαγκτονικοί οργανισμοί πεθαίνουν, οι επιδράσεις αυτές είναι βραχύβιες και γρήγορα το σύστημα επανέρχεται στην κατάσταση πριν τη ρύπανση (Clark, 2003).

Τα φυτά των αλοελών και των μαγγρόβιων δασών ⁵ φύονται σε προφυλαγμένες περιοχές χαμηλής κυματικής ενέργειας. Στο λεπτόκοκκο ίζημα που χαρακτηρίζει τις περιοχές αυτές, το πετρέλαιο παγιδεύεται και παραμένει για μεγάλα χρονικά διαστήματα, επιδρώντας αρνητικά στη βλάστηση. Οι περιοχές αυτές αποτελούν τα όρια μεταξύ χερσαίων και θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Ελέγχουν την παράκτια διάβρωση, αποτελούν πηγή οργανικής ύλης που μεταφέρεται στη θάλασσα και προσφέρουν καταφύγιο στα νεαρά στάδια ανάπτυξης διαφόρων θαλασσιών οργανισμών (Clark, 2003).

Τα ετήσια φυτά των αλοελών καταστρέφονται από το πετρέλαιο και το οικοσύστημα αποκαθίσταται με σπόρους από μακριά, πράγμα που μπορεί να γίνει δύο ή τρία χρόνια αργότερα. Τα πολυετή φυτά είναι πιο ανθεκτικά. Πολλές φορές οι προσπάθειες καθαρισμού των περιοχών αυτών (νερό υπό πίεση, απορρυπαντικά) είναι πιο καταστροφικές από το ίδιο το πετρέλαιο (Clark, 2003).

3.2 Τοξικότητα στα θαλασσοπούλια

Η πιο εμφανής στην κοινή γνώμη επίδραση επεισοδίων ρύπανσης από πετρέλαιο στο οικοσύστημα σχετίζεται με τους θανάτους των θαλασσοπουλιών. Είναι δύσκολο να δοθεί ακριβής εκτίμηση, αλλά φαίνεται ότι δεκάδες ή εκατοντάδες χιλιάδες πτηνά υφίστανται την επιβλαβή επίδραση του πετρελαίου στον βορειοανατολικό Ατλαντικό κάθε χρόνο. Έχουν εκφραστεί φόβοι ότι εξαιτίας της αυξημένης και σταθερής αυτής θνησιμότητας μπορεί τελικά να μειωθούν οι πληθυσμοί των θαλασσοπουλιών.

Αντίθετα με τους περισσότερους άλλους θαλάσσιους οργανισμούς, τα θαλασσοπούλια βλάπτονται έμμεσα, κυρίως λόγω των φυσικών ιδιοτήτων του επιπλέοντος πετρελαίου, ενώ η άμεση τοξικότητα των συστατικών του έχει μικρότερη σημασία. Όταν το φτέρωμα ενός πουλιού καλυφθεί από πετρέλαιο, παύει να απωθεί το νερό. Έτσι το νερό διεισδύει στο φτέρωμα και εκτοπίζει τον αέρα

που βρίσκεται παγιδευμένος μεταξύ των φτερών και του δέρματος των πουλιών. Ο αέρας αυτός, παρέχει αυξημένη άνοση και θερμική μόνωση. Έτσι, το πουλί βυθίζεται στο νερό και πνίγεται. Ακόμη και αν δεν πνιγεί, η απώλεια της θερμικής μόνωσης έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία εξάντληση των αποθεμάτων ενέργειας του ζώου, που προσπαθεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία του σώματός του σταθερή. Ακολουθεί υποθερμία και θάνατος (Clark, 2003).

Επιπλέον, τα πουλιά προσπαθούν να καθαρίσουν το φτέρωμά τους από το πετρέλαιο με το ράμφος τους, με αποτέλεσμα να το καταπίνουν. Ανάλογα με την τοξικότητά του, το πετρέλαιο μπορεί να τους δημιουργήσει εντερικές διαταραχές, νεφρική και ηπατική ανεπάρκεια. Σχετικά μικρές ποσότητες πετρελαίου που καταπίνονται από τα πουλιά κατά την περίοδο αναπαραγωγής καταστέλλουν την ωοτοκία. Από τα αυγά που γεννιούνται τελικά, το ποσοστό αυτών που εκκολάπτονται είναι μειωμένο. Επίσης, εάν στη διάρκεια της επώασης των αυγών μεταφερθεί πετρέλαιο από το ρυπασμένο φτέρωμα στο αυγό, το έμβρυο μπορεί να πεθάνει. Πάντως το πετρέλαιο απειλεί λιγότερο την αναπαραγωγή των πουλιών σε σχέση με την υποθερμία και τον πνιγμό ενήλικων πουλιών που προκαλεί (Clark, 2003).

Είναι δύσκολο να υπολογιστεί ο αριθμός των πουλιών που πεθαίνουν λόγω των πετρελαιοκηλίδων, επειδή πολλά βυθίζονται πριν εκβραστούν στην ακτή, όπου μπορούν να μετρηθούν. Περίπου 3.200 νεκρά πουλιά, μερικά από τα οποία ανήκουν σε σπάνια είδη, μετρήθηκαν μετά τη διαρροή από το Amoco Cadiz. Η διαρροή από το Exxon Valdez πιστεύεται ότι σκότωσε 250.000 θαλασσοπούλια.

3.3 Κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία

Κάποιοι υδρογονάνθρακες πετρελαίου είναι τοξικοί για τον άνθρωπο και υπάρχει μικρός αριθμός περιστατικών όπου αναφέρεται ότι μικρά παιδιά αρρώστησαν ή ακόμη και πέθαναν μετά από ακούσια κατάποση κηροζίνης. Ευτυχώς το κατώφλι γεύσης των υδρογονανθράκων πετρελαίου για τον άνθρωπο είναι εξαιρετικά χαμηλό και η γεύση τους είναι ιδιαίτερα απεχθής. Έτσι ο κίνδυνος να εκτεθούν οι άνθρωποι σε επιβλαβείς ποσότητες των ουσιών αυτών από ρυπασμένα τρόφιμα ή νερό είναι μικρή (Clark, 2003).

Το πετρέλαιο περιέχει πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs), κάποιοι εκ των οποίων είναι γνωστές καρκινογόνες ουσίες για τον άνθρωπο. Παλιότερα υπήρξαν φόβοι ότι οι ουσίες αυτές συσσωρεύονται στους οργανισμούς και βιομεγεθύνονται στις τροφικές αλυσίδες. Σήμερα έχει αποδειχτεί ότι η κατανάλωση θαλασσινών αποτελεί το 2-3% της λήψης των PAHs μέσω μιας κανονικής διαίτας

(Clark, 2003).

3.4 Επιδράσεις στις εμπορικές δραστηριότητες

Στην ανοιχτή θάλασσα και σε παράκτιες περιοχές τα ψάρια μπορούν και απομακρύνονται από ρυπασμένες με πετρέλαιο περιοχές και συνήθως δεν πεθαίνουν. Τα αυγά των ψαριών και οι προνύμφες τους είναι περισσότερο ευάλωτα στη ρύπανση από πετρέλαιο. Επίσης, σημαντικά προβλήματα δημιουργούνται και στους οργανισμούς που διαβιούν σε προφυλαγμένες παράκτιες περιοχές, όπου το πετρέλαιο παραμένει ανέπαφο για χρόνια (Clark, 2003).

Οι ιχθυοκαλλιέργειες και οι οστρακοκαλλιέργειες είναι ιδιαίτερα ευπαθείς σε διαρροές πετρελαίου, διότι τα ψάρια δεν μπορούν να διαφύγουν από τη ρυπασμένη περιοχή. Ενώ είναι δυνατό τα ψάρια να εκτεθούν σε χαμηλές συγκεντρώσεις πετρελαίου οι οποίες δεν έχουν τοξικές επιδράσεις, η γεύση και η μυρωδιά που αποκτούν απαξιώνει την εμπορική τους αξία και τα κάνει μη εμπορεύσιμα (Clark, 2003).

Μια ακόμη ανθρώπινη δραστηριότητα που επηρεάζεται σημαντικά από τη ρύπανση με πετρελαιοειδή, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ατυχημάτων, είναι ο τουρισμός και η αναψυχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Εντοπισμός πετρελαιοκηλίδων μέσω δορυφόρου

Ένα πολύ σημαντικό σημείο στην αντιμετώπιση της πετρελαϊκής ρύπανσης είναι ο έγκαιρος εντοπισμός μιας πετρελαιοκηλίδας. Αν μια πετρελαιοκηλίδα αντιμετωπιστεί νωρίς, η απορρύπανση είναι πιο αποτελεσματική. Επίσης μπορεί ευκολότερα να βρεθεί η πηγή της ρύπανσης και να επιβληθούν κυρώσεις. Οι δορυφόροι που είναι εξοπλισμένοι με Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (ΡΣΑ) (Synthetic Aperture Radar – SAR) αποτελούν ιδανικά εργαλεία για τη συμπλήρωση των συμβατικών αεροπορικών μέσων εντοπισμού πετρελαιοκηλίδων, λόγω της ικανότητάς τους να ανιχνεύουν πετρελαιοκηλίδες στην επιφάνεια της θάλασσας αλλά και να επιθεωρούν μεγάλες θαλάσσιες περιοχές ανεξάρτητα από το φως του ήλιου και τη νεφοκάλυψη (Τοπουζέλης et al., 2005).

Ο εντοπισμός οφείλεται στο ότι η ύπαρξη της πετρελαιοκηλίδας εξασθενεί τα τριχοειδή κύματα επιφανείας (short gravity - capillary waves) που δημιουργούνται από τον άνεμο στην επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της οπισθοσκέδασης της ακτινοβολίας του ραντάρ, με συνέπεια οι περιοχές που περιέχουν πετρελαιοκηλίδες να παρουσιάζονται με σκούρο χρώμα στις απεικονίσεις ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, έχοντας έντονη αντίθεση από τις γειτονικές περιοχές καθαρής θάλασσας (Τοπουζέλης et al., 2005). Εκτός των πετρελαιοκηλίδων, στην απουσία των κυμάτων αυτών μπορούν να συντελέσουν και άλλα φυσικά φαινόμενα, όπως τα θαλάσσια ρεύματα, η βροχόπτωση και η απουσία ανέμου.

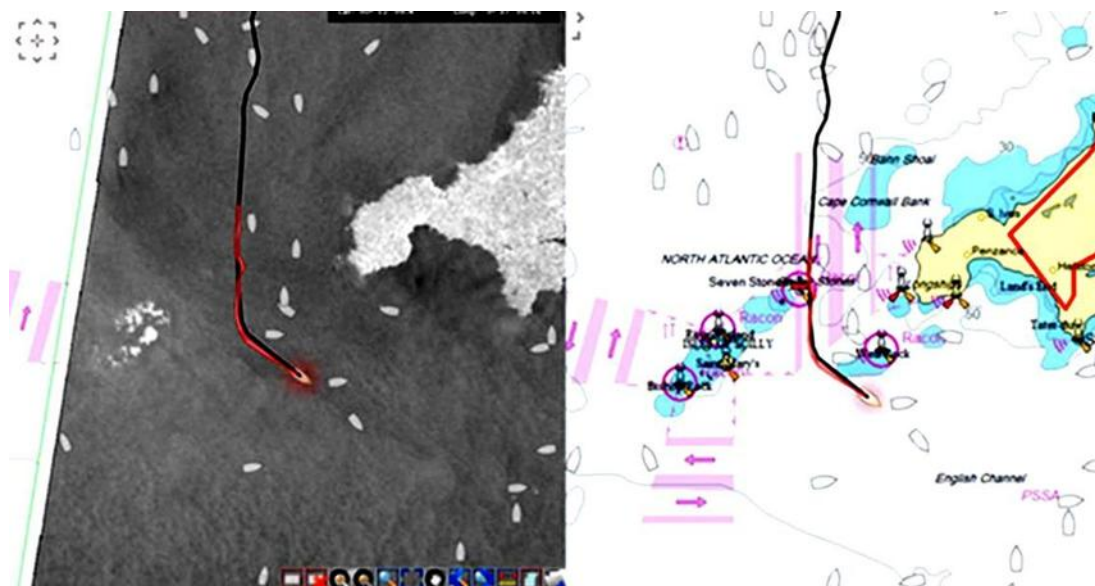
Το CleanSeaNet είναι ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα εντοπισμού πετρελαιοκηλίδων και πλοίων που σχετίζονται με ρυπάνσεις μέσω δορυφόρου (EMSA, χ.χ.). Οι υπηρεσίες που προσφέρονται στα ευρωπαϊκά κράτη μέσω του CleanSeaNet είναι οι εξής:

- Εντοπισμός/ανίχνευση ρύπανσης από πετρέλαιο στην επιφάνεια της θάλασσας.
- Παρακολούθηση της ατυχηματικής ρύπανσης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.
- Εντοπισμός των πλοίων που σχετίζονται με τη ρύπανση.

Η υπηρεσία CleanSeaNet βασίζεται σε δορυφορικές εικόνες ραντάρ που καλύπτουν όλες τις θαλάσσιες περιοχές της Ευρώπης, οι οποίες αναλύονται με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών πετρελαιοκηλίδων στην επιφάνεια της θάλασσας. Όταν μια πιθανή πετρελαιοκηλίδα ανιχνευτεί σε εθνικά ύδατα, αποστέλλεται ένα

προειδοποιητικό μήνυμα στην αντίστοιχη χώρα, εντός 30 λεπτών από τη λήψη των δεδομένων του δορυφόρου. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να συσχετιστούν με τα δεδομένα της κυκλοφορίας των πλοίων (SafeSeaNet) και να εντοπιστεί το πλοίο που προκάλεσε τη ρύπανση.

Παράδειγμα αποτελεί ο εντοπισμός του δεξαμενόπλοιου Maersk Kiera (Εικόνα 2), το οποίο στις 25 Φεβρουαρίου 2012 κινείτο ανοιχτά των ακτών της Κορνουάλλης, στο Ηνωμένο Βασίλειο. Ο συνδυασμός των δορυφορικών εικόνων με πληροφορίες AIS από το SafeSeaNet απέδειξε χωρίς αμφιβολία ότι το εν λόγω σκάφος ήταν υπεύθυνο για τη ρύπανση και έτσι η εταιρεία καταδικάστηκε για την παράβαση και της επιβλήθηκε πρόστιμο.



Εικόνα 4. Δορυφορική εικόνα (αριστερά) στην οποία απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα ο εντοπισμός πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας. Το σχήμα της κηλίδας υποδεικνύει την απόρριψη πετρελαίου από πλοίο σε πορεία. Στη δεξιά εικόνα, το ίχνος της πορείας του πετρελαιοφόρου Maersk Kiera (μέσω AIS – Automatic Identification System). (Πηγή: EMSA, χ.χ. Στοιχεία άδειας χρήσης: «Reproduction is authorized, provided the source is acknowledged, save where otherwise stated», <http://emsa.europa.eu/emsa-homepage/156-uncategorised/118-important-legal-notice.html>).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο Μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων

Σε γενικές γραμμές, τα προϊόντα διύλισης πετρελαίου (π.χ. βενζίνη, ντίζελ) και κάθε αργό πετρέλαιο πλούσιο σε ελαφριά συστατικά δεν παραμένουν πολύ χρόνο στην επιφάνεια της θάλασσας, εξαιτίας της ταχείας εξάτμισης των πτητικών συστατικών και της ευκολίας με την οποία διασπείρονται σε όλη τη στήλη του νερού, ιδιαίτερα σε κακοκαιρία (White & Molloy, 2003). Αντίθετα, το αργό πετρέλαιο με υψηλή περιεκτικότητα σε βαριά συστατικά όπως επίσης και το βαρύ καύσιμο πετρέλαιο των πλοίων παραμένουν ανέπαφα, διότι δεν περιέχουν πολλά πτητικά συστατικά και έχουν υψηλό ιξώδες (είναι παχύρευστα). Για τον λόγο αυτό αντιμετωπίζονται δυσκολότερα (π.χ. το καύσιμο πετρέλαιο του Erika) (White & Molloy, 2003). Στις επόμενες παραγράφους αναπτύσσονται οι κύριες μέθοδοι αντιμετώπισης των πετρελαιοκηλίδων.

Πλωτά φράγματα και διατάξεις άντλησης (ITOPF, 2011b, 2012a)

Τα πλωτά φράγματα (booms) αποτελούν διατάξεις που χρησιμοποιούνται αφενός για να προστατέψουν τις ακτές, τις ιχθυοκαλλιέργειες και άλλους πόρους από την πετρελαϊκή ρύπανση, αφετέρου για να περιορίσουν την πετρελαιοκηλίδα και να αυξήσουν το πάχος της, κάνοντας ευκολότερη την απομάκρυνση του πετρελαίου από το νερό.

Ένα πλωτό φράγμα αποτελείται από τα εξής μέρη: Τα έξαλλα (freeboards), που αποτρέπουν την υπερχειλίση του πετρελαίου, το πλέγμα (skirt) κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας για την αποφυγή διαφυγής του πετρελαίου, ένα υλικό ανώσεως (buoyant material) για την επίπλευση του φράγματος και ένα βάρος στο κάτω μέρος του πλέγματος, που αντιστέκεται στις τάσεις των κυμάτων και ρευμάτων και διατηρεί το φράγμα κατακόρυφο. Το ύψος ενός φράγματος μπορεί να κυμαίνεται από 20 εκατοστά έως ένα μέτρο.

Το πετρέλαιο συλλέγεται/αντλείται με τη βοήθεια πλωτών συστημάτων επιφανειακής συλλογής/άντλησης (skimmers). Ορισμένες διατάξεις βασίζονται στη συνεχή κίνηση ενός ιμάντα που περιέχει προσροφητικό υλικό, βυθίζεται στο πετρέλαιο και κατόπιν διέρχεται μέσα από περιστρεφόμενους κυλίνδρους για την ανάκτηση του πετρελαίου. Με τέτοια μέσα μπορεί να αντιμετωπιστούν μικρές ποσότητες πετρελαίου και είναι χρησιμότερα σε λιμάνια και προστατευμένες περιοχές παρά στην ανοιχτή θάλασσα.

Η συγκράτηση του πετρελαίου με πλωτά φράγματα και η συλλογή του (άντληση) με διάφορες μηχανικές διατάξεις συλλογής από την επιφάνεια της θάλασσας αποτελεί τη φιλικότερη προς το περιβάλλον μέθοδο αντιμετώπισης των πετρελαιοκηλίδων. Κατόπιν, το πετρέλαιο που συλλέχτηκε μπορεί να διαχωριστεί από το θαλασσινό νερό που σε κάποιο ποσοστό συλλέγεται μαζί και, ανάλογα με τις ιδιότητές του, να επαναχρησιμοποιηθεί ή να διατεθεί σε κατάλληλες εγκαταστάσεις.

Τα προβλήματα στη χρήση των πλωτών φραγμάτων είναι:

- Το πετρέλαιο, ανάλογα και με τον κυματισμό της θάλασσας, διασκορπίζεται στη στήλη του νερού, οπότε δεν μπορεί να συλλεχθεί από τα φράγματα, που είναι σχεδιασμένα να συγκρατούν πετρέλαιο που βρίσκεται στην επιφάνεια.
- Τα σκάφη και τα φράγματα αναπτύσσονται αργά, ενώ το πετρέλαιο έχει την τάση να εξαπλώνεται γρήγορα σε μεγάλες εκτάσεις. Η μέγιστη ταχύτητα ρυμούλκησης του φράγματος είναι 0,5 κόμβοι. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες τα φράγματα δεν μπορούν να διατηρήσουν την κατακόρυφη θέση τους και το πετρέλαιο υπερχειλίζει.
- Ο συντονισμός των σκαφών είναι δύσκολος και καλό είναι να γίνεται από αεροσκάφη.

Γενικά, οι ποσότητες του πετρελαίου που μπορεί να ανακτηθούν ακόμα και σε πολύ ευνοϊκές συνθήκες είναι μικρές.

Περιοχές ιδιαίτερης οικολογικής σημασίας, εγκαταστάσεις ιχθυοκαλλιέργειας κ.λπ. μπορεί να προστατευτούν με τη χρήση πλωτών φραγμάτων. Μεγάλα φράγματα, σχήματος V, χρησιμοποιούνται με τρόπο ώστε να διοχετεύεται το πετρέλαιο στην κορυφή του V και κατόπιν να αντλείται ευκολότερα, καθώς συσσωρεύεται και αυξάνεται το πάχος της κηλίδας.

Στην εικόνα 3 φαίνεται μια προσπάθεια συλλογής πετρελαίου από τη διαρροή του Deerwater Horizon από σκάφος της αμερικανικής ακτοφυλακής με χρήση φράγματος και διάταξης συλλογής πετρελαίου.

Χημικά διασκορπιστικά (ITOPF 2011c)

Η φυσική διασπορά του πετρελαίου στο νερό επιτυγχάνεται όταν με τη βοήθεια της μηχανικής ενέργειας των κυμάτων η πετρελαιοκηλίδα σπάει σε μικροσκοπικά σταγονίδια, που αιωρούνται στη στήλη του νερού. Η φυσική αυτή διεργασία μπορεί να επιταχυνθεί με τον ψεκάσμο της πετρελαιοκηλίδας με χημικές ουσίες που ονομάζονται διασκορπιστικά (dispersants) (Εικόνα 4).

Στα διασκορπιστικά περιέχονται επιφανειοδραστικές ουσίες οι οποίες

αποτελούνται από ένα υδρόφοβο και ένα υδρόφιλο τμήμα. Το υδρόφοβο τμήμα έλκεται από τα μόρια του πετρελαίου, ενώ το υδρόφιλο από το νερό. Με τη δομή αυτή, το διασκορπιστικό μειώνει την επιφανειακή τάση του πετρελαίου και του νερού και επιτρέπει να σχηματιστούν μικροσκοπικά σταγονίδια πετρελαίου που περιβάλλονται από μόρια διασκορπιστικού, τα οποία αιωρούνται στη στήλη του νερού.



Εικόνα 5. Κόλπος Μεξικού. Αντιμετώπιση της πετρελαιοκηλίδας του Deepwater Horizon με φράγματα και διατάξεις συλλογής. (Πηγή: U.S. Coast Guard, Jason Radcliffe, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deepwater_Horizon_oil_spill_skimming_response.jpg Το παρόν έργο αποτελεί κοινό κτήμα – public domain)

Με τον τρόπο αυτό απομακρύνεται το πετρέλαιο από την επιφάνεια της θάλασσας και αραιώνεται στη στήλη του νερού, συνεπώς οργανισμοί όπως τα θαλασσοπούλια που βουτάνε στη θάλασσα για να βρουν την τροφή τους δεν εκτίθενται σε τόσο μεγάλες ποσότητες. Επίσης, ενισχύεται η διάσπαση του πετρελαίου από τους μικροοργανισμούς, λόγω της αύξησης της επιφάνειας των σταγονιδίων σε σύγκριση με αυτή της πετρελαιοκηλίδας.

Τα διασκορπιστικά έχουν περιορισμούς. Δεν είναι αποτελεσματικά σε ιζώδη

πετρέλαια ή σε πετρέλαια που έχουν παραμείνει στη θάλασσα για κάποιο χρονικό διάστημα και έχουν υποστεί μετασχηματισμούς όπως η εξάτμιση, η διάσπαση και η γαλακτωματοποίηση (γηρασμένο πετρέλαιο - weathered oil), διότι αυτές οι διεργασίες αυξάνουν το ιξώδες του υπολειμματικού πετρελαίου. Συνεπώς η απόφαση για το αν θα χρησιμοποιηθούν διασκορπιστικά θα πρέπει να ληφθεί λίγες ώρες ή το πολύ μέρες (ανάλογα και με τις συνθήκες) από τη στιγμή της διαρροής.

Επιπλέον, τα διασκορπιστικά, ως χημικές ουσίες, είναι τοξικά. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει η τοξικότητα του μίγματος πετρελαίου - διασκορπιστικού να είναι μικρότερη από την τοξικότητα του πετρελαίου στους θαλάσσιους οργανισμούς.

Όταν η πετρελαιοκηλίδα είναι μεγάλη, δύσκολα συγκεντρώνεται μεγάλος αριθμός πλοίων ή αεροσκαφών για να αντιμετωπιστεί όλη η πετρελαιοκηλίδα γρήγορα. Συνήθως ψεκάζεται μόνο ένα μικρό της μέρος.



Εικόνα 6. Πολεμικό C-130 της Αμερικανικής Αεροπορίας ψεκάζει διασκορπιστικό πάνω από την πετρελαιοκηλίδα του [Deepwater Horizon](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:C-130_support_oil_spill_cleanup.jpg). (Πηγή: US Air Force public affairs, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:C-130_support_oil_spill_cleanup.jpg Το παρόν έργο αποτελεί κοινό κτήμα – public domain).

Επιτόπου καύση

Η επιτόπου καύση (in-situ burning) είναι ένας όρος που σημαίνει την ελεγχόμενη καύση του πετρελαίου στο σημείο της εκροής του στη θάλασσα (Εικόνα 5). Για να επιτευχθεί, θα πρέπει το πετρέλαιο να περιοριστεί, ώστε η πετρελαιοκηλίδα να αποκτήσει ένα ελάχιστο πάχος, και να υπάρχει μια πηγή ανάφλεξης. Οι απαραίτητες συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται για την εφαρμογή της μεθόδου είναι (NOAA χ.χ.):

- Το ελάχιστο πάχος της κηλίδας να είναι 2-3 mm, έτσι ώστε να παρέχεται ένα σταθερό καύσιμο και να αντιμετωπίζεται ο ανασχετικός ρόλος του νερού. Κατά την καύση του πετρελαίου, αυτό που καίγεται είναι οι ατμοί του πετρελαίου και όχι το υγρό πετρέλαιο. Ένα μικρό μέρος της ενέργειας που

απελευθερώνεται από την καύση απορροφάται από το πετρέλαιο, προκαλώντας περαιτέρω εξάτμιση και συνέχιση της καύσης. Αν το πάχος της πετρελαιοκηλίδας είναι μικρότερο από 2-3 mm, τότε η θερμότητα απορροφάται από το νερό, δεν παράγονται ατμοί πετρελαίου και η καύση σταματά. Η αύξηση του πάχους της κηλίδας επιτυγχάνεται με άκαυστα

- φράγματα, που περιορίζουν την εξάπλωση του πετρελαίου.
- Πειράματα έχουν δείξει ότι η επιτόπου καύση του πετρελαίου είναι δυνατή μόνο υπό ήπιες καιρικές συνθήκες. Οι ταχύτητες του ανέμου που πνέουν στην περιοχή πρέπει να είναι χαμηλότερες από 5 μποφόρ και το ύψος των κυμάτων μικρότερο από 3 πόδια. Διαφορετικά, το πετρέλαιο δεν μπορεί να συγκρατηθεί στα φράγματα και η γαλακτωματοποίησή του προχωρά γρήγορα.
- Τα θαλάσσια ρεύματα στην περιοχή θα πρέπει να έχουν ταχύτητα μικρότερη του ενός κόμβου. Σε αντίθετη περίπτωση το πετρέλαιο διαφεύγει είτε πάνω είτε κάτω από το φράγμα.
- Επειδή τα ελαφρά κλάσματα του πετρελαίου είναι περισσότερο εύφλεκτα από τα βαριά, αλλά ταυτόχρονα είναι και τα πιο πτητικά, το ποσοστό του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί πρέπει να είναι λιγότερο από 30%.

Επειδή, λόγω της γαλακτωματοποίησης το πετρέλαιο αναμιγνύεται με νερό, το περιεχόμενο νερό θα πρέπει να είναι λιγότερο από το 25% του όγκου του πετρελαίου, ώστε να επιτυγχάνεται και να συντηρείται η καύση.



Εικόνα 7. Ελεγχόμενη καύση του πετρελαίου που διέρρευσε στον Κόλπο του Μεξικού, μετά το ατύχημα του Deep Water Horizon (6 Μαΐου 2010). (Πηγή: United States Navy,

Το χρονικό περιθώριο για την εφαρμογή της μεθόδου είναι στενό. Οι δύο τελευταίοι παράγοντες σημαίνουν ότι η καύση της πετρελαιοκηλίδας μπορεί να γίνει με επιτυχία κάποιες ώρες μετά τη διαρροή του πετρελαίου, ανάλογα και με τις συνθήκες.

Τα βασικότερα προβλήματα που σχετίζονται με την εφαρμογή της μεθόδου είναι:

- Η ανάφλεξη και η διατήρηση της καύσης του πετρελαίου είναι δύσκολη, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών, του κυματισμού και της μεταβολής των ιδιοτήτων του πετρελαίου καθώς περνάει ο χρόνος.
- Εάν η καύση επιτευχθεί, εκπέμπονται αέριοι ρύποι (μονοξειδίο του άνθρακα, καπνός, άκαυστοι υδρογονάνθρακες) που είναι επικίνδυνοι για τη δημόσια υγεία. Για τον λόγο αυτό η καύση πετρελαίου θα πρέπει να γίνεται στην ανοιχτή θάλασσα και όχι κοντά στις ακτές.
- Υπάρχουν κίνδυνοι για το ανθρώπινο δυναμικό που ασχολείται με την αντιμετώπιση της πετρελαιοκηλίδας.
- Συνήθως, κατά την καύση δεν καίγεται όλη η ποσότητα του πετρελαίου. Τα πιο βαριά κλάσματα παραμένουν άκαυστα και δημιουργούν στερεά υπολείμματα, που κατακάθονται στον βυθό.

Συνοψίζοντας, η επιτόπου καύση πρέπει να εκτελείται σε μικρό χρόνο μετά τη διαρροή, ώστε το πετρέλαιο να μην έχει εξατμιστεί ή γαλακτωματοποιηθεί, και απαιτεί ήπιες καιρικές συνθήκες και περιορισμό του πετρελαίου. Πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε να μην εκτίθεται ο πληθυσμός στους αέριους ρύπους που εκπέμπονται κατά την καύση.

Βιοαποκατάσταση (bioremediation) (Atlas & Hazen, 2011)

Η βιοαποκατάσταση έχει σκοπό να ενισχύσει τη φυσική διεργασία διάσπασης του πετρελαίου από τους μικροοργανισμούς (βιοδιάσπαση). Η ενίσχυση αυτή γίνεται με τη χρήση διασκορπιστικών και θρεπτικών συστατικών.

Η βιοδιάσπαση συμβαίνει στη διεπιφάνεια πετρελαίου - νερού. Συνεπώς, η αύξηση της διεπιφάνειας αυτής με τη χρήση διασκορπιστικών βελτιώνει τους ρυθμούς της βιοδιάσπασης. Τα διασκορπιστικά βοηθούν τη μεταφορά του πετρελαίου από την επιφάνεια του νερού σε όλη τη στήλη του νερού, υπό μορφή μικρών

σταγονιδίων πετρελαίου σε νερό, αυξάνοντας έτσι τον λόγο επιφάνειας προς όγκο και διευκολύνοντας τη βιοδιάσπαση.

Οι μικροοργανισμοί προτιμούν να διασπούν τις οργανικές ουσίες που έχουν μια συγκεκριμένη αναλογία άνθρακα, αζώτου και φωσφόρου. Η παρουσία του πετρελαίου αυξάνει σημαντικά το ποσοστό του άνθρακα, με αποτέλεσμα η αναλογία C:N:P να μην ευνοεί τη βιοδιάσπαση. Για τον λόγο αυτό, προστίθενται στην πετρελαιοκηλίδα θρεπτικά συστατικά (νιτρικά και φωσφορικά). Η μέθοδος αυτή καταπολέμησης των πετρελαιοκηλίδων χρησιμοποιήθηκε στο ατύχημα του Exxon Valdez, χωρίς να επαληθευτεί πλήρως η αποτελεσματικότητά της. Το βέβαιο είναι ότι η αποκατάσταση βαριά ρυπασμένων περιοχών διαρκεί μήνες ή και χρόνια.

Η ίδια μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στη διαρροή του Deepwater Horizon στον Κόλπο του Μεξικού με καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται σε μια σειρά από λόγους: Στον Κόλπο του Μεξικού υπάρχουν φυσικές υποθαλάσσιες διαρροές πετρελαίου, συνεπώς υπάρχουν ήδη πληθυσμοί μικροοργανισμών που είναι έτοιμοι να διασπάσουν το πετρέλαιο. Επίσης το πετρέλαιο βρισκόταν σε καλή διασπορά στο νερό, καθώς εκτοξευόταν από μεγάλο βάθος προς την επιφάνεια και στην πορεία του διασκορπιζόταν. Ακόμη, η φύση του πετρελαίου ήταν τέτοια (ελαφρύ πετρέλαιο) που ευνοούσε τη διασπορά του. Τέλος, η στρατηγική αντιμετώπισης της διαρροής περιλάμβανε τη χρήση χημικών διασκορπιστικών στο σημείο εκροής του πετρελαίου, στα 1.500 m βάθος, ώστε να διασπείρεται στη στήλη του νερού και να μη φτάνει στην επιφάνεια δημιουργώντας πετρελαιοκηλίδα. Βεβαίως, και σε αυτή την περίπτωση η βιοδιάσπαση δεν είχε αποτέλεσμα σε ορισμένα συστατικά του πετρελαίου, όπως το ασφαλτικό υπόλειμμα.

Υλικά ρόφησης (sorbents) (ITOPF, 2012b)

Τα υλικά ρόφησης δρουν έλκοντας περισσότερο το πετρέλαιο σε σύγκριση με το νερό. Είναι δηλαδή ταυτόχρονα ελαιόφιλα και υδρόφοβα. Στις περισσότερες περιπτώσεις προσροφούν το πετρέλαιο στην επιφάνεια του υλικού (adsorption), ενώ υπάρχουν και υλικά που απορροφούν το πετρέλαιο στο εσωτερικό τους (absorption). Τα υλικά αυτά, ανάλογα με την πρώτη ύλη κατασκευής τους, μπορούν να διακριθούν στις εξής βασικές κατηγορίες:

- κατεργασμένα φυτικά (Natural Organic Sorbents),
- κατεργασμένα ορυκτά (Mineral Sorbents),
- συνθετικά - πολυμερή (Synthetic Sorbents).

Ανάλογα με τη μορφή τους μπορούν να διαχωριστούν σε:

- Απορροφητικά χύμα: Τα προϊόντα αυτά είναι συνήθως σκόνες, λεπτά σωματίδια και μικρού μεγέθους οργανικές ή ορυκτές ίνες ή βιομηχανικά κατάλοιπα.
- Απορροφητικά φράγματα, μαξιλάρια και φύλλα: Τα υλικά αυτά κατασκευάζονται με τη μορφή φραγμάτων, μαξιλαριών ή φύλλων και χρησιμοποιούνται για την καταπολέμηση μικρών διαρροών ή προς το τέλος των εργασιών καθαρισμού.
- Τα απορροφητικά υλικά που επιλέγονται θα πρέπει να έχουν καλές ελαιοφιλικές ιδιότητες, να είναι αβύθιστα και να απωθούν το νερό. Επιπλέον, να έχουν μικρό χρόνο κορεσμού, μεγάλη ικανότητα ρόφησης (π.χ. 70 φορές το βάρος τους) και επαρκή αντοχή για να συγκρατούν το πετρέλαιο και να αντέχουν κατά την ανάκτηση.

Γενικά, τα υλικά ρόφησης χρησιμοποιούνται στα τελικά στάδια του καθαρισμού των ακτών, σε περιπτώσεις μικρών διαρροών πετρελαίου ή όπου άλλες μέθοδοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν. Δεν είναι κατάλληλα για χρήση στην ανοιχτή θάλασσα. Είναι λιγότερο αποτελεσματικά σε ιξώδη πετρέλαια, όπως το HFO, ή σε πετρέλαια που έχουν υποστεί μετασχηματισμούς ή είναι γαλακτωματοποιημένα.

Αν και χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στον καθαρισμό των ακτών, η χρήση τους θα πρέπει να γίνεται με προσοχή, διότι έχουν ως αποτέλεσμα στερεά απόβλητα, που θα πρέπει να υποστούν επεξεργασία ή να διατεθούν με κατάλληλο τρόπο μετά τη χρήση, πράγμα που αυξάνει το κόστος της αποκατάστασης και του καθαρισμού.

5.1 Καθαρισμός ακτών

Για τον καθορισμό της στρατηγικής καθαρισμού των ακτών είναι απαραίτητο να γίνει γρήγορα εκτίμηση του βαθμού και του τύπου της ρύπανσης, όπως και του μήκους, της μορφής/είδους της ακτής και της προσβασιμότητάς της. Ο καθαρισμός της ακτής θα πρέπει να ξεκινήσει το συντομότερο δυνατό μετά τη διαρροή, διότι καθώς το πετρέλαιο μετασχηματίζεται, κολλάει πιο επίμονα σε βράχια και επιφάνειες ή αναμιγνύεται και θάβεται στην άμμο (ITOPF, 2014).

Ο καθαρισμός της ακτής γίνεται συνήθως σε τρία στάδια (ITOPF, 2014):

- Στο πρώτο στάδιο αφαιρούνται οι μεγάλες ποσότητες του πετρελαίου, ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος να παρασυρθεί πίσω στη θάλασσα ρυπαίνοντας γειτονικές, καθαρές περιοχές.
- Στο δεύτερο στάδιο απομακρύνεται το εναπομείναν πετρέλαιο, όπως επίσης και ρυπασμένο υλικό της ακτής. Το στάδιο αυτό διαρκεί περισσότερο.
- Στο τρίτο στάδιο γίνεται ο τελικός καθαρισμός της υπολειμματικής ρύπανσης και η απομάκρυνση των τελευταίων κηλίδων, αν αυτό είναι απαραίτητο.

Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η οικολογική σημασία και ευαισθησία της ακτής, ώστε να διασφαλίζεται ότι ο καθαρισμός δεν θα προκαλέσει μεγαλύτερες βλάβες από το ίδιο το πετρέλαιο (ITOPF, 2014).

Υπάρχει μεγάλο εύρος τεχνικών/τεχνολογιών για την απομάκρυνση του πετρελαίου από τις ακτές και κάθε φορά θα πρέπει να επιλέγεται η καταλληλότερη για το είδος της ακτής και το στάδιο του καθαρισμού. Κατά το πρώτο στάδιο, διάφοροι τύποι άντλησης μπορεί να είναι χρήσιμοι σε λιμνάζον πετρέλαιο. Για ιξώδη ή γαλακτωματοποιημένα πετρέλαια ή πετρέλαια που έχουν εισχωρήσει στην άμμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μηχανική συλλογή με ποικιλία μηχανημάτων. Όταν οι ακτές δεν είναι προσβάσιμες σε μηχανικά μέσα ή όταν είναι ευαίσθητες περιβαλλοντικά, τότε άνθρωποι με φτυάρια απομακρύνουν το πετρέλαιο και το ρυπασμένο ίζημα (Εικόνα 6). Κατά το δεύτερο στάδιο μπορεί να γίνει ξέπλυμα της ακτής με μεγάλες ποσότητες νερού χαμηλής πίεσης, ώστε να απομακρυνθεί το θαμμένο ή προσκολλημένο πετρέλαιο (ITOPF, 2014).

Στο τελευταίο, τρίτο στάδιο του καθαρισμού, μπορεί να γίνει έκπλυση του πετρελαίου σε σκληρές επιφάνειες ή σε τοιχώματα λιμανιών με ζεστό ή κρύο νερό υψηλής πίεσης. Στο στάδιο αυτό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί η τεχνική της βιοαποκατάστασης. Υπολείμματα πετρελαίου απομακρύνονται με προσροφητικά υλικά.

Τελικά, και με το πέρασμα του χρόνου, οι περισσότερες ακτές θα καθαριστούν φυσικά, καθώς το πετρέλαιο μετασχηματίζεται. Ακτές υψηλής ενέργειας (μεγάλου κυματισμού) καθαρίζονται γρήγορα μόνες τους με φυσικό

τρόπο. Αντίθετα, σε αμμώδεις ακτές χαμηλής ενέργειας ο φυσικός μετασχηματισμός είναι αργός και το πετρέλαιο παραμένει ανέπαφο για πολλά χρόνια (ITOPF, 2014).

Οι τεχνικές καθαρισμού ακτών εξαρτώνται από τη μορφή της ακτής (ITOPF, 2014):

- Βράχια, τοιχώματα λιμανιών και παρόμοιες επιφάνειες μπορούν να καθαριστούν με νερό υπό πίεση ή με ατμό υπό πίεση ή με διασκορπιστικά. Εάν χρησιμοποιηθούν χημικές ουσίες, θα πρέπει να συνοδεύονται από μεγάλες ποσότητες νερού, στο οποίο θα διασκορπιστεί το πετρέλαιο.
- Ανώμαλες, βραχώδεις ακτές με βράχια διαφόρων μεγεθών μπορεί να καθαριστούν με νερό χαμηλής πίεσης για δύο ή τρεις μέρες, έως ότου το πετρέλαιο βρεθεί στη θάλασσα, όπου μπορεί να συλλεγεί ή να διασκορπιστεί.
- Σε αμμώδεις ακτές τα διασκορπιστικά είναι άχρηστα, διότι απλώς μεταφέρουν το πετρέλαιο σε βαθύτερα στρώματα, απ' όπου περιστασιακά επανέρχεται στην επιφάνεια. Το μόνο μέσο καθαρισμού αμμωδών ακτών είναι η αφαίρεση του επιφανειακού στρώματος χειρωνακτικά ή με μπουλντόζες.
- Με τις παραπάνω μεθόδους έχουμε δυσάρεστες επιδράσεις στη χλωρίδα και την πανίδα των ακτών. Μια φιλική μέθοδος είναι η χρήση απορροφητικών υλικών, όπως το άχυρο ή η ξερή βλάστηση, για να προσροφήσουν και να απομακρύνουν το πετρέλαιο. Στην περίπτωση που στην ακτή έχουμε ανάπτυξη φυκών, μεγάλη ποσότητα πετρελαίου εγκλωβίζεται στα φύκια, τα οποία πρέπει να κοπούν και να απομακρυνθούν.

Με τις παραπάνω μεθόδους η ακτή καθαρίζεται μερικώς. Επιπλέον, οι τεχνικές καθαρισμού ιδίως των ακτών (αλλά και της ανοιχτής θάλασσας) παράγουν μεγάλη ποσότητα υλικών ρυπασμένων με πετρέλαιο (υλικά προσρόφησης, κατεστραμμένα φράγματα, άμμος και χαλίκια, ξύλα, πλαστικά, φύκια κ.λπ.) (Εικόνα 7), η διαχείριση των οποίων είναι δύσκολη και ακριβή. Αρχικά, θα πρέπει να γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης των αποβλήτων αυτών, με κατάλληλη επιλογή των υλικών και μεθόδων καθαρισμού. Κατόπιν, θα πρέπει να καθαρίζεται και να επαναχρησιμοποιείται ο εξοπλισμός και οι διαθέσιμοι πόροι, όπου αυτό είναι δυνατό. Το πετρέλαιο που συλλέχτηκε θα πρέπει να υφίσταται επεξεργασία σε διυλιστήριο. Ό,τι απομένει θα πρέπει να διαχωρίζεται ανάλογα με το υλικό και τον βαθμό ρύπανσης και να διατίθεται με τέτοιον τρόπο ώστε να μη μολύνει την ξηρά. Οι επιλογές περιλαμβάνουν την καύση σε βιομηχανικούς κλιβάνους και την εναπόθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ITOPF, 2011d).



Εικόνα 8. Στρατιώτες καθαρίζουν την ακτή Παπαμόα στη Νέα Ζηλανδία, μετά τη ρύπανσή της από πετρέλαιο του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων Rena που προσάραξε σε ύφαλο. (Πηγή: New Zealand Defence Force, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rena_oil_spill_cleanup.jpg. Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Attribution 2.0 Generic license).



Εικόνα 9. Σακούλες γεμάτες με ρυπασμένα με πετρέλαιο απόβλητα από τον καθαρισμό της πετρελαιοκηλίδας του Exxon Valdez (Μάρτιος 1989). (Πηγή: NOAA, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valdez_Trash_Pile.jpg Το παρόν έργο αποτελεί κοινό κτήμα – public domain).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο Ατυχήματα πετρελαιοφόρων – Μελέτες περιπτώσεων

Στις επόμενες παραγράφους αναπτύσσονται οι τρόποι αντιμετώπισης και οι επιπτώσεις από ορισμένα μεγάλα και γνωστά ατυχήματα πετρελαιοφόρων.

Το ατύχημα του Exxon Valdez (EPA, 2015· EVOS, 2015)

Τέσσερα λεπτά μετά τα μεσάνυχτα της 24ης Μαρτίου 1989, το υπό αμερικάνικη σημαία πετρελαιοφόρο Exxon Valdez, το οποίο μετέφερε 180.000 τόνους αργού πετρελαίου [Alaska North Slope crude oil (API gravity = 29,8)] από τον σταθμό φόρτωσης Valdez (Alaska) με προορισμό το Λος Άντζελες / Λονγκ Μπιτς, προσάραξε με ταχύτητα 12 κόμβων στον ύφαλο Bligh Reef (που βρίσκεται σε βάθος 10 μέτρων) στα βορειοανατολικά του πορθμού Πρινς Ουίλιαμ στην Αλάσκα. Το πλοίο είχε ξεφύγει από την τακτική πορεία του για να αποφύγει τη σύγκρουση με παρασυρόμενους όγκους πάγου. Η προσάραξη προκάλεσε βλάβη σε 11 από τις 18 δεξαμενές του πλοίου. Περίπου το 1/5 του φορτίου του (36.000 τόνοι πετρελαίου) χύθηκε στη θάλασσα. Πάνω από 7.000 km² πετρελαιοκηλίδων ρύπαναν περίπου 800 km ακτών (2.000 km, αν συμπεριληφθούν τα μικρά νησιά). Το ατύχημα αυτό ήταν το μεγαλύτερο που είχε συμβεί στις ΗΠΑ και η περιοχή στην οποία συνέβη ήταν παρθένα και περιλάμβανε μεγάλο αριθμό προστατευόμενων περιοχών, όπως εθνικά πάρκα και καταφύγια άγριας ζωής.

Για τρεις μέρες μετά το ατύχημα ο καιρός ήταν ήπιος και ο κυματισμός της θάλασσας μικρός. Όμως αμέσως μετά επικράτησαν ισχυροί βορειοανατολικοί άνεμοι, με αποτέλεσμα τη διασπορά του πετρελαίου και την αδυναμία ανάσχεσης της ρύπανσης. Λόγω των ισχυρών ανέμων, μεγάλη ποσότητα πετρελαίου μετατράπηκε σε γαλάκτωμα νερού σε πετρέλαιο (γνωστό ως chocolate mousse), το οποίο δεν μπορεί να καεί και είναι δύσκολο να απομακρυνθεί από την επιφάνεια της θάλασσας και τις ακτές. Το πετρέλαιο μετακινήθηκε προς τα νοτιοδυτικά, ρυπαίνοντας 790 μίλια ακτών, εκ των οποίων τα 200 χαρακτηρίστηκαν βαριά ρυπασμένα. Η υπηρεσία National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) του Υπουργείου Εμπορίου των ΗΠΑ εκτιμά ότι το 35% του πετρελαίου της κηλίδας εξατμίστηκε, το 40% εναποτέθηκε σε παραλίες εντός του πορθμού Πρινς Ουίλιαμ και 25% εισήλθε στον κόλπο της Αλάσκας.

Το κόστος της απορρύπανσης τα τέσσερα πρώτα χρόνια μετά το ατύχημα του

Exxon Valdez ανήλθε στα 2 δισ. δολάρια. Οι προσπάθειες αποκατάστασης του οικοσυστήματος και της παρακολούθησης των ειδών εποπτεύονται από το Exxon Valdez Oil Spill (EVOS) Trustee Council, που αποτελεί ένα συμβούλιο με ομοσπονδιακά και πολιτειακά μέλη.

Αντιμετώπιση της ρύπανσης

Στην κορύφωση της αντιμετώπισης της ρύπανσης ενεπλάκησαν πάνω από 11.000 άτομα προσωπικό, 1.400 σκάφη και 85 αεροσκάφη. Ο καθαρισμός των ακτών ξεκίνησε τον Απρίλιο του 1989 και συνεχίστηκε έως τον Σεπτέμβριο του 1989. Κατόπιν επαναλήφθηκε το 1990 και το 1991, κυρίως τους θερινούς μήνες. Η παρακολούθηση της τύχης και των επιπτώσεων του πετρελαίου συνεχίστηκε για πολλά χρόνια μετά. Συγκεκριμένα, ακολουθήθηκαν οι παρακάτω πρακτικές αντιμετώπισης:

(α) Στη θάλασσα Τις πρώτες τρεις μέρες μετά το ατύχημα ο καιρός ήταν καλός, το πετρέλαιο επέπλεε με τη μορφή φρέσκιας πετρελαιοκηλίδας και οι συνθήκες για την άντληση του ήταν ιδανικές. Το πρόβλημα ήταν ότι ο αναγκαίος εξοπλισμός (πλωτά φράγματα, διατάξεις άντλησης, φορηγίδες αποθήκευσης) δεν ήταν διαθέσιμος σε ικανούς αριθμούς στην περιοχή. Όταν ο κατάλληλος εξοπλισμός κατέφτασε, ο καιρός είχε επιδεινωθεί και το πετρέλαιο είχε δημιουργήσει γαλακτώματα, με αποτέλεσμα να δυσκολεύει την ανάκτησή του.

Στο ατύχημα του Exxon Valdez ελέγχθηκε η αποτελεσματικότητα της βιοδιάσπασης, που είναι μια μέθοδος καθαρισμού που προτάθηκε από την αμερικανική υπηρεσία EPA (Environmental Protection Agency). Συγκεκριμένα, τον Ιούλιο του 1989, στο βαριά ρυπασμένο Γκριν Άιλαντ ρίχτηκαν νιτρικά και φωσφορικά άλατα (λιπάσματα), με σκοπό να υποβοηθήσουν τους πληθυσμούς των μικροβίων να διασπάσουν το πετρέλαιο. Η εφαρμογή αυτή έδειξε ότι η μέθοδος ήταν ελπιδοφόρα και έως το τέλος του καλοκαιριού είχε χρησιμοποιηθεί σε 176 km ακτών. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 48.600 kg νιτρικών λιπασμάτων από το 1989 έως το 1991 (Atlas & Hazen, 2011). Το τελικό συμπέρασμα ήταν ότι η μέθοδος δεν ήταν πανάκεια στην αντιμετώπιση του πετρελαίου όπως αρχικά είχε θεωρηθεί, ενώ ήταν άγνωστες οι συνέπειες της εισαγωγής στο θαλάσσιο οικοσύστημα μεγάλων ποσοτήτων λιπασμάτων (ενδεχόμενη πρόκληση ευτροφισμού) (EPA, 2015).

Σχετικά με τη χρήση διασκορπιστικών, η Exxon ζήτησε άδεια για τη χρήση τους από τις αρχές των ΗΠΑ την πρώτη μέρα του ατυχήματος και την πήρε δύο μέρες αργότερα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια πολύ δυνατή καταιγίδα ενέσκηψε τότε,

περιορίζοντας την αποτελεσματικότητα των διασκορπιστικών.

(β) Στις ακτές Οι βραχώδεις ακτές και οι ακτές με χαλίκια καθαρίστηκαν με τεράστιες ποσότητες ζεστού νερού (60°C) υπό πίεση. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά τόσο εκτεταμένα και αποδείχτηκε αρκετά αποτελεσματική για την απορρύπανση των ακτών. Κατά τη διαδικασία αυτή, όπως και σε κάθε περίπτωση εμπλοκής ανθρώπινου δυναμικού σε καθαρισμούς πετρελαίου, οι εργάτες πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με κατάλληλο εξοπλισμό (στολές, γάντια, γαλότσες και μάσκες), για την προστασία τους από τις τοξικές ιδιότητες του πετρελαίου.

Βιολόγοι εξέφρασαν την άποψη ότι ο καθαρισμός με ζεστό νερό μπορεί να είχε ως αποτέλεσμα να καθυστερήσει η ανάκαμψη της βιοκοινωνίας της διαπαλιροιακής ζώνης συγκριτικά με το να αφηνόταν χωρίς καθαρισμό να επανακάμψει μόνη της.

Σε περιπτώσεις όπου η ρύπανση των ακτών από το πετρέλαιο δεν ήταν ιδιαίτερα βαριά ή σε περιπτώσεις αμμωδών ακτών, όπου θεωρείται ότι το πετρέλαιο διεισδύει στην άμμο, επιλέχθηκε η χειρωνακτική μέθοδος καθαρισμού με φτυάρια, τσουγκράνες και απορροφητικά υλικά. Σε αντίστοιχες με τον χειρωνακτικό καθαρισμό περιπτώσεις πολύ μεγαλύτερης κλίμακας χρησιμοποιήθηκαν διάφορα μηχανήματα, όπως φορτωτές, εκσκαφείς κ.λπ.

Σε μια έρευνα που διεξήχθη το 2001 σε 96 τυχαία επιλεγμένα σημεία των ακτών που είχαν ρυπανθεί από το πετρέλαιο κατά το ατύχημα, προέκυψε ότι το 58% αυτών ήταν ακόμη ρυπασμένα. Το πετρέλαιο βρισκόταν σε προφυλαγμένα σημεία ή θαμμένο κάτω από άμμο και πέτρες. Το πετρέλαιο που εκτίθεται στον αέρα και το ηλιακό φως μετασχηματίζεται και τα ελαφρά συστατικά του αρχικά εξατμίζονται και κατόπιν υφίστανται διάφορες διεργασίες διάσπασης, ώστε στο τέλος να παραμένουν ανέπαφα μόνο τα βαριά κλάσματα (πίσσα), που όμως είναι λιγότερο διαθέσιμα (και άρα επικίνδυνα) για τους οργανισμούς. Αντίθετα, όταν το πετρέλαιο είναι προφυλαγμένο από τον αέρα και τον ήλιο παραμένει για μεγαλύτερο χρόνο στην αρχική του σύσταση, διατηρώντας και τις σχετικές τοξικές ιδιότητες.

Επιδράσεις στη θαλάσσια ζωή

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι το Exxon Valdez ήταν ένα μεγάλο ατύχημα που επέδρασε αρνητικά στην περιοχή. Αναφέρεται ότι πέθαναν 250.000 θαλασσοπούλια, 2.800 ενυδρίδες, 900 φαλακροί αετοί, 22 όρκες και 300 φώκιες. Το ατύχημα επίσης έβλαψε άγνωστο, αλλά τεράστιο, αριθμό αυγών σολομού και ρέγκας.

Ποτέ πριν το ατύχημα αυτό δεν είχε γίνει τόσο μεγάλη προσπάθεια και δεν

είχαν διατεθεί τόσο μεγάλα χρηματικά ποσά για τα εκτιμηθεί η έκταση των αρνητικών επιπτώσεων και η πορεία της ανάκαμψης του οικοσυστήματος. Η ερμηνεία των μελετών αυτών, δέκα χρόνια μετά το ατύχημα, αποτελούσε ακόμη αντικείμενο έντονης διαφωνίας μεταξύ των επιστημόνων, των εθνικών και πολιτειακών αρχών και της Exxon. Μεγαλύτερη σύγκρουση υπήρξε για τις υποθανατηφόρες και μακροχρόνιες δράσεις, οι οποίες είναι δυσκολότερο να αποτιμηθούν, διότι απαιτούν μακροχρόνιες μελέτες μεγάλης κλίμακας. Στην προκειμένη περίπτωση η αβεβαιότητα αυξανόταν από τη φυσική ανάκαμψη του συστήματος και από τις επιδράσεις των συγκεντρώσεων υποβάθρου του πετρελαίου που οφείλονταν σε τυπικές δραστηριότητες της περιοχής (π.χ. κίνηση διαφόρων σκαφών).

Παρ' όλα αυτά, το ατύχημα του Exxon Valdez βελτίωσε τα μέτρα πρόληψης των πετρελαιοκηλίδων, την προετοιμασία για την αντιμετώπιση τους σε περίπτωση που τελικά συμβούν και την κατανόηση των οξείων ή μακροχρόνιων επιπτώσεων σε ένα ευρύ φάσμα ειδών, κοινοτήτων και ενδιατημάτων.

Αλλαγές στους κανονισμούς

Μετά το ατύχημα του EXXON VALDEZ το 1989, οι ΗΠΑ, δυσαρεστημένες από την αδυναμία των διεθνών προτύπων να προλάβουν τη ρύπανση από τα πλοία, προχώρησαν μονομερώς στην έκδοση της Oil Pollution Act του 1990 (OPA 90).

Οι βασικές προβλέψεις της OPA 90 αφορούσαν:

- Μέτρα σχετικά με τη λειτουργία των πλοίων, και συγκεκριμένα αναφορικά με την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, τη χρήση πλοηγών και ρυμουλκών, την οργάνωση των φυλάκων της γέφυρας, τα μέσα τηλεπικοινωνίας και τη στελέχωση των πλοίων. Επίσης επεκτάθηκε η νομοθεσία για θέματα πρόληψης χρήσης ναρκωτικών ουσιών και αλκοόλ.
- Μέτρα σχετικά με την κατασκευή των δεξαμενόπλοιων. Το σημαντικότερο από αυτά ήταν η επιβολή απαίτησης διπλού κύτους, τόσο για τα νεόδμητα πετρελαιοφόρα όσο και για τα υπάρχοντα, στα νερά των ΗΠΑ.
- Μέτρα σχετικά με την ευθύνη σε περίπτωση ρύπανσης από δεξαμενόπλοια ή εγκαταστάσεις, την αποκατάσταση των ζημιών και τις αποζημιώσεις.

Παρότι η OPA 90 ήταν ένας εθνικός κανονισμός, επέφερε πολλές αλλαγές στις ναυτιλιακές μεταφορές σε παγκόσμιο επίπεδο. Μια από αυτές ήταν η υιοθέτηση των διπλών τοιχωμάτων στα πλοία από τον IMO.

Το ατύχημα του Sea Empress (Law and Kelly, 2004)

Το υπό λιβεριανή σημαία πετρελαιοφόρο Sea Empress προσάραξε στα βράχια, στην είσοδο του Μίλφορντ Χέιβεν της νοτιοδυτικής Ουαλίας, καθώς εισερχόταν στο λιμάνι, στις 15 Φεβρουαρίου 1996. Το σκάφος είχε φορτωθεί στη Σκωτία με 131.000 τόνους αργού πετρελαίου (Forties blend crude oil). Μία εβδομάδα μετά την προσάραξη, 72.000 τόνοι από το φορτίο του καθώς και 370 τόνοι καύσιμου πετρελαίου (heavy fuel oil) είχαν εκχυθεί στη θάλασσα. Αυτό σημαίνει ότι το ατύχημα του Sea Empress βρίσκεται μεταξύ των 20 μεγαλύτερων ατυχημάτων της περιόδου 1960-1997.

Η ακτή στην περιοχή της νοτιοδυτικής Ουαλίας έχει ιδιαίτερο οικολογικό και τουριστικό ενδιαφέρον και επιπλέον υποστηρίζει αλιεία και οστρακοαλιεία. Η αιτία του ατυχήματος εξακριβώθηκε ότι ήταν σφάλμα κατά την πλοήγηση και συμπεριλάμβανε λανθασμένο υπολογισμό του παλιρροιακού ρεύματος. Παράγοντες που επιδείνωσαν την κατάσταση ήταν οι κακές καιρικές συνθήκες και η περιορισμένη ισχύς των ρυμουλκών σκαφών (Johnson & Butt, 2006).

Αντιμετώπιση της ρύπανσης

(α) Στη θάλασσα Θεωρητικά, η πιο ελκυστική μέθοδος αντιμετώπισης μιας πετρελαιοκηλίδας από περιβαλλοντική άποψη είναι η απομάκρυνση του πετρελαίου στη θάλασσα. Στην περίπτωση αυτή, παρόλο που ήταν διαθέσιμα πλωτά φράγματα και διατάξεις συλλογής του πετρελαίου, η έγκαιρη μεταφορά τους στο σημείο του ατυχήματος ήταν δύσκολη και η χρήση τους ήταν σχεδόν αδύνατη λόγω των θυελλωδών ανέμων που έπνεαν στην περιοχή (πάνω από 30 κόμβοι). Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν οκτώ σκάφη συλλογής πετρελαίου και είκοσι μικρά βοηθητικά σκάφη. Κατάφεραν να συλλέξουν το 3% του διαρρέοντος πετρελαίου (περίπου 4.000 τόνοι γαλάκτωματος νερού σε πετρέλαιο).

Μεταξύ 18 και 22 Φεβρουαρίου, 446 τόνοι χημικού διασκορπιστικού ψεκάστηκαν από αεροπλάνα πάνω στην πετρελαιοκηλίδα. Η μεγαλύτερη ποσότητα του πετρελαίου που εκχύθηκε από το Sea Empress μεταφέρθηκε στα ανοιχτά της θάλασσας με την άμπωτη. Με τον τρόπο αυτό, φρέσκο πετρέλαιο, που μπορούσε να αντιμετωπιστεί με τα διασκορπιστικά, μεταφερόταν προς τα νότια και μακριά από το Μίλφορντ Χέιβεν. Έτσι, ο ψεκασμός με διασκορπιστικά έλαβε χώρα στα βαθιά νερά, μακριά από τη στεριά. Η παλίρροια στην περιοχή είναι από τις εντονότερες στην

Ευρώπη. Το νερό κατά την άμπωτη απομακρύνεται 20 km από την ξηρά, ειδικά την άνοιξη. Το χημικά διασκορπισμένο πετρέλαιο σχηματίζει πολύ μικρά σταγονίδια, τα οποία υπόκεινται ευκολότερα σε βιοδιάσπαση από τα βακτήρια. Υπολογίζεται ότι η επιτυχημένη εφαρμογή των διασκορπιστικών στο ατύχημα αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αποφυγή ρύπανσης των ακτών της περιοχής από 57.000-110.000 τόνους γαλακτώματος. Συνολικά, 11.000-16.000 τόνοι οδήγησαν στη ρύπανση 200 km ακτών.

(β) Στις ακτές Στις ακτές χρησιμοποιήθηκαν χημικά διασκορπιστικά (περίπου 12 τόνοι). Η μεγαλύτερη ποσότητα εφαρμόστηκε σε ορισμένες ακτές με τουριστική κίνηση. Τα διασκορπιστικά εφαρμόστηκαν πριν την παλίρροια. Οι κυριότερες ακτές ήταν καθαρές για να χρησιμοποιηθούν από τους τουρίστες το επόμενο Πάσχα, εννέα εβδομάδες μετά το ατύχημα.

Επιδράσεις στην αλιεία και τη θαλάσσια ζωή

Οι τοπικοί αλιείς εφάρμοσαν εθελοντικά ως προληπτικό μέτρο την απαγόρευση της αλιείας μετά την προσάραξη του Sea Empress, με σκοπό την προστασία των καταναλωτών από τον κίνδυνο να φάνε μολυσμένα θαλασσινά. Η απαγόρευση κάλυπτε μια περιοχή 2.100 km² και περιλάμβανε ψάρια, οστρακόδερμα, καρκινοειδή και φύκια. Παράλληλα ξεκίνησε μια διαδικασία ελέγχου και παρακολούθησης της μόλυνσης των θαλασσινών από το πετρέλαιο.

Δεν αναφέρθηκαν πάντως θάνατοι ψαριών με εμπορικό ενδιαφέρον μετά το ατύχημα, κυρίως διότι τα ψάρια απομακρύνονται από περιοχές όπου οι συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές γι' αυτά. Παρατηρήθηκαν όμως νεκρά μαλάκια (μύδια κ.λπ.) και αμφίποδα.

Δεν παρατηρήθηκε επίσης μόλυνση του σολομού και της πέστροφας, κυρίως λόγω του ότι την περίοδο του ατυχήματος τα ψάρια αυτά είχαν μεταναστεύσει στα ποτάμια για να αναπαραχθούν. Επίσης, οι συγκεντρώσεις πετρελαιοειδών σε άλλα είδη ψαριών και καρινοειδών (καβούρια, γαρίδες, αστακοί) ήταν μικρές. Τέλος, ελέγχθηκε και η οσμή των ψαριών και καρκινοειδών από ειδική επιτροπή και δεν προέκυψε οσμή πετρελαίου.

Η απαγόρευση στην αλιεία ψαριών σταμάτησε 3-8 μήνες μετά το ατύχημα. Καταγράφηκαν πάνω από 7.000 πουλιά μολυσμένα με πετρέλαιο. Δυστυχώς η επιβίωση τους μετά τον καθαρισμό ήταν πολύ χαμηλή. Ο πληθυσμός του τοπικού κοινού είδους μαυρόπαπιας (*Melanitta nigra*) μειώθηκε σημαντικά και η ανάκαμψη του ήταν πολύ αργή (Johnson & Butt, 2006). Επίσης η απώλεια οικοτόπων επέδρασε στους πληθυσμούς ορισμένων μεταναστευτικών πτηνών. Οι φώκιες και τα κητώδη

της περιοχής δεν επηρεάστηκαν.

Συνοπτικά, η αντιμετώπιση της ρύπανσης και οι φυσικές διαδικασίες απομάκρυνσης είχαν τα εξής αποτελέσματα:

- 3% του πετρελαίου ανακτήθηκε από τη θάλασσα,
- 2% του πετρελαίου ανακτήθηκε από τις ακτές,
- 5% του πετρελαίου παρέμεινε στις ακτές,
- 40% του πετρελαίου εξατμίστηκε,
- 50% του πετρελαίου διασκορπίστηκε με χρήση χημικών.

Παρόλο που το ατύχημα του Sea Empress περιλαμβάνεται στα 20 μεγαλύτερα παγκοσμίως από την άποψη του όγκου του πετρελαίου που εκχύθηκε στη θάλασσα, οι περιβαλλοντικές του επιπτώσεις δεν ήταν ανάλογης σοβαρότητας λόγω των ακόλουθων παραγόντων (Johnson & Butt, 2006):

- Εποχή του χρόνου: Τον Φεβρουάριο δεν υπάρχουν τουρίστες στην περιοχή, ενώ πολλά θαλάσσια είδη έχουν μεταναστεύσει.
- Κατεύθυνση των ανέμων: Οι επικρατούντες άνεμοι ήταν βόρειοι, με αποτέλεσμα το 85% του πετρελαίου να απομακρυνθεί από την ξηρά.
- Οι Law & Kelly (2004) προσθέτουν ότι και οι έντονες παλιρροιακές κινήσεις του νερού στην περιοχή βοήθησαν στην απομάκρυνσή του από την ξηρά και την αντιμετώπισή του με διασκορπιστικά.
- Τύπος πετρελαίου: Το πετρέλαιο forties blend crude oil είναι σχετικά ελαφρύ και είναι εύκολο να αντιμετωπιστεί με διασκορπιστικά, ενώ μεγάλο μέρος του (40%) εξατμίζεται γρήγορα και απομακρύνεται από την περιοχή του ατυχήματος.
- Επιτυχημένη χρήση διασκορπιστικών λόγω παλίρροιας και τύπου του πετρελαίου.

Το ατύχημα του Erika (CEDRE, 2015)

Το υπό σημαία Μάλτας πετρελαιοφόρο Erika ταξίδευε από τη Δουνκέρκη της Γαλλίας στο Λιβόρνο της Ιταλίας φορτωμένο με 31.000 τόνους βαρύ καύσιμο πετρέλαιο (No 6). Το πλοίο ήταν ναυλωμένο από την εταιρεία TotalFina. Είχε ναυπηγηθεί το 1975 στην Ιαπωνία και ήταν μονοπύθμενο, με 9 δεξαμενές φορτίου και 4 δεξαμενές διαχωρισμένου έρματος. Στις 11 Δεκεμβρίου 1999, 40 ναυτικά μίλια ανοιχτά της Βρετάνης στη Βορειοδυτική Γαλλία (Penmarc'h Pointe), στον Βισκαϊκό κόλπο, αντιμετώπισε δομικά προβλήματα υπό ιδιαίτερα δυσμενείς καιρικές συνθήκες

(δυτικοί θυελλώδεις άνεμοι εντάσεως 8-9 μποφόρ). Στις 12 Δεκεμβρίου 1999 το πλοίο έστειλε σήμα κινδύνου ότι αρχικά πήρε κλίση προς τα δεξιά και κατόπιν κόπηκε στα δύο.

Οι έρευνες για το ατύχημα από τη γαλλική κυβέρνηση και τις μαλτέζικες αρχές συμπέραναν ότι στη δομική αστοχία του πλοίου οδήγησαν η ηλικία, η διάβρωση, η ανεπαρκής συντήρηση και οι αμελείς επιθεωρήσεις (IMO, 2010). Έτσι αναπτύχθηκε ευρεία συναίνεση για την ανάγκη πρόσθετων μέτρων, ώστε να μην κυκλοφορούν πλοία χαμηλών προτύπων και κυρίως όσα μεταφέρουν καύσιμο πετρέλαιο (IMO, 2010). Ως αποτέλεσμα, ο IMO επιτάχυνε τις διαδικασίες απόσυρσης των πετρελαιοφόρων μονού κύτους.

Η επιχείρηση διάσωσης ξεκίνησε αμέσως και το πλήρωμα απομακρύνθηκε με τη βοήθεια γαλλικών ελικοπτέρων. Στις 13 Δεκεμβρίου η πλώρη βυθίστηκε στο σημείο του ατυχήματος σε βάθος 120 m περίπου. Η πρύμνη ρυμουλκήθηκε από ένα πλοίο διάσωσης, ώστε να απομακρυνθεί από το γαλλικό νησί Μπελ Ιλ, αλλά τελικά βυθίστηκε και αυτή σε απόσταση 10 km από την πλώρη. Η συνολική ποσότητα πετρελαίου που εκχύθηκε στη θάλασσα υπολογίζεται σε 19.000-20.000 τόνους και εκτιμάται ότι εξαπλώθηκε σε απόσταση 450 km κατά μήκος των γαλλικών ακτών του Ατλαντικού.

Η αντιμετώπιση της ρύπανσης ήταν δύσκολη λόγω της φύσης του πετρελαίου (βαρύ και ιξώδες) και των πολύ κακών καιρικών συνθηκών.

Αντιμετώπιση της ρύπανσης

(α) Στη θάλασσα Η εξάτμιση είναι μια διαδικασία που, ανάλογα με τη σύστασή του και τις μετεωρολογικές συνθήκες, μπορεί να απομακρύνει ποσοστό 20-50% του όγκου του αργού πετρελαίου. Το πετρέλαιο του Erika ήταν βαρύ, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται από την εξάτμιση. Εκτιμάται ότι λιγότερο του 10% της ποσότητάς του απομακρύνθηκε με αυτόν τον τρόπο.

Επιπλέον, οι ιδιότητες του συγκεκριμένου τύπου πετρελαίου δεν ευνοούσαν τη χρήση διασκορπιστικών, διότι το ιξώδες του είναι υψηλό (είναι δηλαδή παχύρρευστο) και δεν επιτρέπει την εισχώρηση των διασκορπιστικών στη μάζα του πετρελαίου. Για τον λόγο αυτό, η κύρια μέθοδος αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας στη θάλασσα ήταν η άντληση του πετρελαίου. Χρησιμοποιήθηκαν πλωτά φράγματα για τη συγκράτηση και τη συσσώρευση του πετρελαίου και κατόπιν το πετρέλαιο αντλήθηκε με κατάλληλες διατάξεις. Η επιχείρηση ήταν δύσκολη λόγω των κακών καιρικών συνθηκών και του ιξώδους του πετρελαίου. Από την άλλη πλευρά, το υψηλό ιξώδες δημιουργούσε κηλίδα αρκετά μεγάλου πάχους και αυτό διευκόλυνε την

άντληση. Συνολικά, ανακτήθηκαν 1.200 τόνοι πετρελαίου από τη θάλασσα. Το πετρέλαιο αυτό υπέστη επεξεργασία σε διυλιστήριο στην Ντονζ.

(β) Στις ακτές Στις 24-25 Δεκεμβρίου, 12 μέρες μετά το ατύχημα, μια καταιγίδα με νοτιοδυτικούς ανέμους μετέφερε το πετρέλαιο από τη θάλασσα στις ακτές και, λόγω της μεγάλης της έντασης, ψηλά στους αμμόλοφους και τους βράχους. Εκτιμάται ότι μολύνθηκαν 450 km ακτών. Πλωτά φράγματα είχαν τοποθετηθεί σε καίρια σημεία για να προστατεύσουν ευαίσθητες περιοχές.

Χιλιάδες εθελοντές κατέφθασαν στην περιοχή, ζητώντας εξοπλισμό και καθοδήγηση για τον καθαρισμό των ακτών. Τα κρατικά κέντρα αντιμετώπισης κατακλύστηκαν από πλήθος ανυπόμονων και απροετοίμαστων εθελοντών, χωρίς να υπάρχει η οργάνωση να αξιοποιηθούν κατάλληλα. Οι κακές καιρικές συνθήκες δυσκόλευαν κάθε προσπάθεια καθαρισμού. Μετά από κάποιες εβδομάδες, όταν ο καιρός μαλάκωσε, η επιχείρηση καθαρισμού των ακτών έγινε αποτελεσματικότερη και στα μέσα Ιανουαρίου βρισκόταν σε πλήρη ανάπτυξη.

Σε πολλές περιοχές ο χειρωνακτικός καθαρισμός ήταν η κύρια μέθοδος αντιμετώπισης της ρύπανσης. Δυστυχώς σε πολλές περιπτώσεις συνέβη επαναρύπανση, καταστρέφοντας τη δουλειά που είχε ήδη γίνει, καθώς η παλίρροια έθαβε το πετρέλαιο στις αμμώδεις ακτές. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν μηχανήματα για την απομάκρυνση της άμμου. Τα βράχια καθαρίστηκαν με νερό υπό πίεση και οι εκροές συλλέχτηκαν από απορροφητικά φράγματα.

Όπως συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων, η αποθήκευση, μεταφορά και απόθεση των ρυπασμένων με πετρέλαιο στερεών αποβλήτων από τις διαδικασίες καθαρισμού των ακτών (φύκια, άμμος, χαλίκια και άλλα υλικά) αποτέλεσε μεγάλο πρόβλημα. Συνολικά, συλλέχτηκαν 200.000 τόνοι στερεών αποβλήτων. Με τη βοήθεια μιας επιτροπής ειδικών, η εταιρεία TotalFinaElf

έθεσε προδιαγραφές για την επεξεργασία των αποβλήτων και στα τέλη του 2000 επιλέχτηκε μια εταιρεία μεταξύ 11 υποψηφίων για να ολοκληρώσει την επεξεργασία των αποβλήτων εντός δύο ετών.

(γ) Άντληση του πετρελαίου από το βυθισμένο σκάφος Για την απομάκρυνση του πετρελαίου που είχε παραμείνει στα βυθισμένα μέρη του πλοίου χρησιμοποιήθηκε η άντληση. Η πλώρη και η πρύμνη βρίσκονταν βυθισμένες σε βάθος 120 m περίπου και σε απόσταση 10 km η μία από την άλλη. Συγκεκριμένα, το πετρέλαιο από την πλώρη αρχικά και κατόπιν από την πρύμνη μεταφέρθηκε σε μια δεξαμενή που βρισκόταν στον βυθό της θάλασσας με τη βοήθεια σταθερής υποπίεσης

που εφαρμόστηκε στη δεξαμενή. Κατόπιν το πετρέλαιο αντλήθηκε από τη δεξαμενή στο επιφανειακό σκάφος. Για να υποβοηθηθεί η άντληση, επειδή οι θερμοκρασίες στον βυθό ήταν μεταξύ 9°C το χειμώνα και 12°C το καλοκαίρι, το πετρέλαιο αναμίχθηκε με ένα διαλυτικό ασφαλές για το περιβάλλον. Η όλη διαδικασία πραγματοποιήθηκε τον Ιούνιο του 2000 με τη βοήθεια ρομπότ, βαθυσκαφών και δυτών. Περίπου 10.000 τόνοι πετρελαίου αντλήθηκαν με τη διαδικασία αυτή. Επιπλέον 1.200 τόνοι αντλήθηκαν κατόπιν, με το πλύσιμο των δεξαμενών με διαλυτικό.

Επιδράσεις στην θαλάσσια ζωή

Το 82% των πουλιών που βρέθηκαν νεκρά ανήκε σε ένα είδος πτηνού που ονομάζεται ουρία (*Uria aalge*). Στα τέλη Ιουνίου 2000 αναφέρθηκαν πάνω από 63.500 πουλιά μολυσμένα με πετρέλαιο. Εξ αυτών τα 61.403 πέθαναν, ενώ τα 2.150 επανέκαμψαν και απελευθερώθηκαν. Το ατύχημα του Erika επέδρασε τόσο πολύ στα θαλασσοπούλια διότι συνέβη σε μια εποχή που πολλά είδη πουλιών ξεχειμώνιαζαν στην περιοχή.

Η επίδραση του ατυχήματος σε άλλους θαλάσσιους οργανισμούς, όπως οι φάλαινες, τα δελφίνια, οι χελώνες και οι καρχαρίες, είναι άγνωστη. Η παραγωγή οστρακοειδών σταμάτησε σε περιπτώσεις που το πετρέλαιο έφτασε στην περιοχή.

Ως αποτέλεσμα της καταστροφής αυτής, ο IMO αποδέχτηκε την επιτάχυνση της απαγόρευσης των μονοπύθμενων πετρελαιοφόρων και το Παράρτημα I της MARPOL τροποποιήθηκε το 2001. Βάσει των τροποποιήσεων αυτών, η χώρα σημαίας μπορεί να επιτρέψει σε μονοπύθμενα σκάφη που συμμορφώνονται με ορισμένες τεχνικές προδιαγραφές να συνεχίσουν να πλέουν έως την 25η επέτειο από την παράδοσή τους. Τα κράτη λιμένα μπορούν όμως να αρνούνται την είσοδο σε τέτοια πλοία, αν έχουν ενημερώσει σχετικά τον IMO. Επίσης προβλέπεται ένα Condition Assessment Scheme (CAS), βάσει του οποίου η κατάσταση των πλοίων ελέγχεται και πιστοποιείται με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Η ΕΕ αντέδρασε νομοθετικά με τα πακέτα Erika I και II με αντίστοιχο περιεχόμενο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Atlas, R. M. & Hazen, T. C. (2011). Oil biodegradation and bioremediation: a tale of the two worst spills in US history. *Environmental Science & Technology*, 45(16), 6709-6715.

CEDRE (2007). Spills. http://www.cedre.fr/index_gb.html (Προσπέλαση Μάιος 2015).

Clark R. B. (2003). *Marine Pollution*, in collaboration with Frid, Ch. & Attrill, M., Oxford: Oxford University Press.

Document,

http://www.petroleumhvp.org/~media/petroleumhvp/documents/category_crude%20oil_march_2011.pdf (Ανάκτηση Οκτ. 2015).

EMSA (2014). *Annual Overview of Marine Accidents and Incidents, 2014*. Lisbon: European Maritime Safety Agency, <http://www.emsa.europa.eu/news-a-press-centre/external-news/item/2303-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2014.html>

EMSA

(χ.χ.).

Clean

SeaNet.

<http://www.emsa.europa.eu/operations/cleanseanet/items.html?cid=122&id=2360>

EPA (2015). Exxon Valdez. <http://www2.epa.gov/emergency-response/exxon-valdez-spill-profile> (Προσπέλαση Μάιος 2015).

EVOS Trustee Council (2015). Exxon Valdez Oil Spill.

<http://www.evostc.state.ak.us/>, (Προσπέλαση Μάιος 2015).

Federation,

http://www.itopf.com/fileadmin/data/Documents/TIPS%20TAPS/TIP5Us_eofSkimmersinOilPollutionResponse.pdf (Ανάκτηση Οκτ. 2015).

Hamam, S. E. M., Hamoda, M. F., Shaban, H. I. & Kilani, A. M. (1988). Crude Oil Dissolution in Saline Water. *Water, Air and Soil Pollution*, 37, 55-64.

IMO (2010). Tanker safety – Preventing accidental pollution. <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Regulations/Pages/OilTankers.aspx>

I TOPF (2011a). Fate of Marine Oil Spills. Technical Information Paper, The International Tanker Owners Pollution Federation, <http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/document/tip-2-fate-of-marine-oil-spills/> (Ανάκτηση Οκτ. 2015).

I TOPF (2011b). Use of Booms in Oil Pollution Response. Technical Information Paper, The International Tanker Owners Pollution Federation, <http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/document/tip-3-use-of-booms-in-oil-pollution-response/> (Ανάκτηση Οκτ. 2015).

I TOPF (2011c). Use of Dispersants to Treat Oil Spills. Technical Information Paper, The International Tanker Owners Pollution Federation, <http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/document/tip-4-use-of-dispersants-to-treat-oil-spills/> (Ανάκτηση Οκτ. 2015).

I TOPF (2011d). Disposal of oil and Debris. Technical Information Paper, The International Tanker Owners Pollution Federation, <http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/document/tip-9-disposal-of-oil-and-debris/> (Ανάκτηση Οκτ. 2015).

I TOPF (2012a). Use of Skimmers in Oil Pollution Response. Technical Information Paper, The International Tanker Owners Pollution

I TOPF (2012b). Use of Sorbent Materials in Oil Spill Response. Technical Information Paper, The International Tanker Owners Pollution Federation, <http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/document/tip-8-use-of-sorbent-materials-in-oil-spill-response/> (Ανάκτηση Οκτ. 2015).

I TOPF (2014). Shoreline Cleanup and Response. <http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/response-techniques/shoreline-clean-up-and-response/>

Johnson, D. & Butt, N. (2006). *The Sea Empress Disaster – 10 Years on*. Southampton Solent University, WWF-

UK, http://www.wwf.org.uk/filelibrary/pdf/ma_seaemp10yrson.pdf (Ανάκτηση Οκτ. 2015).

Law R. J. & Kelly C. (2004). The impact of the “Sea Empress” oil spill. *Aquat. Living Resour.*, 17, 389-394.

National Research Council (2003). Oil in the sea III: inputs, fates, and effects. Washington: Ocean Studies Board and Marine Board, The National Academies Press.

NOAA (χ.χ.). Oil Spills. National Oceanic and Atmospheric Administration & National Ocean Service, <http://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills> (Προσπέλαση Οκτ. 2015).

USEPA (2011). Screening-Level Hazard Characterization, Crude Oil Category. U.S. Environmental Protection Agency, Hazard Characterization

White I. C. & Baker J. M. (1999). The Sea Empress Oil Spill in Context. Εισήγηση στο International Conference on the Sea Empress Oil Spill, 11-13th February 1998, Cardiff, Wales, http://www.anp.gov.br/brnd/round6/guias/PERFURACAO/PERFURACAO_R6/MO_DELAGEM/refer/THE_SEA_EMPRESS_OIL_SPILL_I.PDF (Προσπέλαση Οκτ. 2015).

White, I. C. & Molloy, F. (2003). Factors that Determine the Cost of Oil Spills. Εισήγηση στο International Oil Spill Conference 2003, Vancouver, Canada, 6-11 April 2003.

Τοπουζέλης, Κ., Καραθανάση, Β., Παυλάκης, Π., Ρόκος, . (2005). Ανάπτυξη τηλεσκοπικού συστήματος ραντάρ για τον εντοπισμό πετρελαιοκηλίδων στις ελληνικές θάλασσες, Εισήγηση στο συνέδριο Heleco '05, TEE, Αθήνα, 3-6 Φεβρουαρίου 2005, http://library.tee.gr/digital/m2045/m2045_topouzelis.pdf