

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	1
Περίληψη.....	4
Abstract .....	4
Λέξεις κλειδιά.....	4
Key words.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	7
2.1 Η διαχρονικότητα των μεθόδων ναυσιπλοΐας και η εξέλιξη της τεχνολογίας.....	7
2.2 Τέλος του 19ου αιώνα και πρώιμος 20ος αιώνας (μέχρι το 1920). - Οι πρώτες τηλεπικοινωνίες, το ραδιογωνιόμετρο και η γυροπυξίδα.....	13
2.2.1 Οι πρώτες τηλεπικοινωνίες και οι εφαρμογές τους στη ναυσιπλοΐα .....	13
2.2.2 Το ραδιογωνιόμετρο.....	13
2.2.3 Το γυροσκόπιο, η γυροπυξίδα και τα πρώτα συστήματα αυτόματης πηδαλιουχίσεως .....	15
2.3 Από τη δεκαετία του 1920 μέχρι το τέλος του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου. ....	16
2.3.1 Η επινόηση και η ανάπτυξη του radar.....	17
2.3.2 Τα πρώτα συστήματα υπερβολικής ναυτιλίας.....	18
2.4 Από το τέλος του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου μέχρι και τη δεκαετία του 1970. ....	19
2.4.1 Ο πρώτος ηλεκτρονικός υπολογιστής, ο κρυσταλλοδίοδος (transistor), τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και οι εφαρμογές στη ναυτιλία.....	19
2.4.2 Εξέλιξη της υπερβολικής ναυτιλίας κατά την περίοδο των δεκαετιών 1950–1970 ....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο – ΤΟ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΟ.....	22
3.1 Ιστορία .....	22
3.2 Το ελεύθερο γυροσκόπιο .....	23
3.2.1 Ορισμός και περιγραφή .....	23
3.2.3 Συμπεριφορά του ελεύθερου γυροσκοπίου σε σχέση με το επίπεδο του ορίζοντα στα διάφορα πλάτη της Γης .....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο – ΤΟ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΟ ΜΕ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΦΩΤΟΣ ΣΕ ΔΑΚΤΥΛΙΟ (φωτογυροσκόπιο ή γυρο- σκόπιο laser).....	44
4.1 Περιγραφή και ιδιότητες.....	44
4.2 Αρχή λειτουργίας.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο .....	50
ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΠΥΡΗΝΑ.....	50
5.1 Περιγραφή και ιδιότητες.....	50
5.2 Αρχή λειτουργίας.....	50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο – Η ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΠΥΞΙΔΑ .....	57
6.1 Γενικά χαρακτηριστικά μαγνητικής πυξίδας.....	57
6.2 Σύγχρονες μαγνητικές πυξίδες.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο.....	65
– Η ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΥΞΙΔΑ .....	65
7.1 Τεχνικές μετατροπής του ελεύθερου γυροσκοπίου σε γυροσκοπική πυξίδα.....	65
7.2 Εξαναγκασμός του ελεύθερου γυροσκοπίου να αναζητεί τον Βορρά .....	65
7.3 Προσανατολισμός στον Βορρά και απο κατάσταση του άξονα περιστροφής στον μεσημβρινό .....	68
7.4 Η χρήση του βαλλιστικού υγρού .....	72
7.5 Η σταθεροποίηση του άξονα περιστροφής στον μεσημβρινό .....	74
7.6 Χρόνος ενεργοποίησης των ηλεκτρομηχανικών γυροσκοπικών πυξίδων .....	76
7.7 Σφάλματα των γυροσκοπικών πυξίδων.....	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο.....	84
– ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΠΥΞΙΔΕΣ ΚΑΙ ΠΥΞΙΔΕΣ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΦΩΤΩΣ (LASER) ΜΕ ΟΠΤΙΚΟ ΔΑΚΤΥΛΙΟ Ή ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ .....	84
8.1 Οι ψηφιακές γυροσκοπικές πυξίδες.....	85
8.2 Γυροσκοπικές πυξίδες laser με οπτικό δακτύλιο ή περιέλιξη οπτικής ίνας .....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο.....	88
– ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΠΥΞΙΔΕΣ .....	88
ΕΠΙΛΟΓΟΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92

## **Περίληψη**

Στο παρακάτω κείμενο αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο η εξέλιξη της τεχνολογίας επηρέασε τη μέθοδο εύρεσης της πορείας και του στίγματος ενός πλοίου. Γίνεται αναφορά στον ρόλο που έπαιξε ο Β΄ Παγκόσμιος Πόλεμος και η εφεύρεση του τρανζίστορ στην επιτάχυνση της ανάπτυξης της τεχνολογίας. Συγκεκριμένα, γίνονται ιστορικές αναφορές στα όργανα που χρησιμοποιούσαν οι ναυτικοί στην αρχαιότητα και πως αυτά εξελίχθηκαν εξ αιτίας της ανάγκης τήρησης ασφαλούς πορείας και γνώσης του στίγματος σε όλο ένα και μεγαλύτερες αποστάσεις από την ακτή. Τέλος γίνεται σαφές ότι με το πέρασμα του χρόνου κάθε επόμενη γενιά ναυτικών θα έχει πρόσβαση σε όλο ένα και πιο ακριβείς πυξίδες με πολύ μικρά σφάλματα.

## **Abstract**

The following text discusses how the evolution of technology has influenced the method of finding the course and position of a ship. Reference is made to the role played by World War II and the invention of the transistor in accelerating the development of technology. Specifically, historical references are made about the instruments used by sailors in ancient times, and how they evolved because of the need to keep a safe course and knowledge of the position ,at an ever increasing distance from the coast. Finally, it is made clear that with the passing of time each of the next generation of seafarers will have access to more and more accurate compasses with very small errors.

## **Λέξεις κλειδιά**

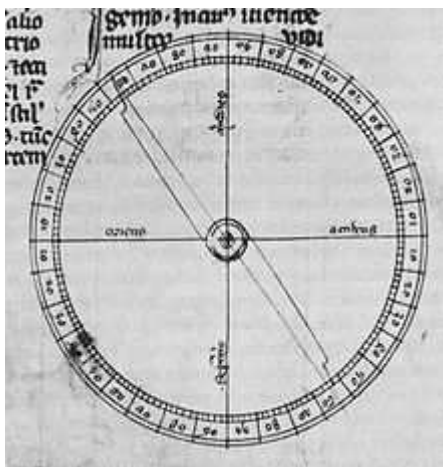
Ιστορική Εξέλιξη, Μαγνητική Πυξίδα, Γυροσκόπιο, Ψηφιακή Εποχή.

## **Key words**

Historical Evolution, Magnetic Compass, Gyroscope, Digital Age

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πυξίδα (από την αρχαία ελληνική λέξη πυξίς - ίδος, που αρχικά σημαίνει ξύλινο κουτί) ή



Εικόνα 1. Σχέδιο πυξίδας από το σύγγραμμα *Epistola de magnetibus* του 1269

κοινώς μπουσουλας (από την ιταλική λέξη bussola) και κουμπάσο (από τη λέξη compass) είναι όργανο με το οποίο επιτυγχάνεται ο προσανατολισμός του χρήστη, δείχνοντάς του την κατεύθυνση του Βορρά. Ιδιαίτερα όμως

στη ναυσιπλοΐα αποτελεί το σημαντικότερο "ναυτιλιακό βοήθημα" με το οποίο μετρούνται και πραγματοποιούνται τόσο οι Επειδή το όργανο αυτό αναπτύχθηκε εξ ανάγκης στη ναυτιλία αλλά και εκ της σημαντικότητάς του σ' αυτή

ονομάζεται συνηθέστερα ναυτική πυξίδα. Η ναυτική πυξίδα σήμερα διακρίνεται στην μαγνητική πυξίδα (magnetic compass) που βασίζεται στη λειτουργία της μαγνητικής

βελόνας και είναι η πλέον διαδεδομένη, στην γυροσκοπική πυξίδα που βασίζεται στην ταχεία περιστροφή του [ελεύθερου γυροσκοπίου](#) με μηδενικό σχεδόν σφάλμα και στην γυρομαγνητική πυξίδα περιορισμένης χρήσης.

Από την εποχή που ο άνθρωπος επιδόθηκε στη Ναυτιλία παρατήρησε πως ο Πολικός αστέρας παρέμενε πάντα πλησίον ενός σημείου στον ουρανό του Β. ημισφαιρίου και αυτόν χρησιμοποιούσε για πυξίδα του. Όταν ο Πολικός δεν ήταν ορατός ο ναυτιλλόμενος χρησιμοποιούσε άλλους αστέρες. Η εφεύρεση της μαγνητικής πυξίδας, προ χιλιάδων ετών ίσως, και στη συνέχεια κατά τον 20ό αιώνα της γυροσκοπικής πυξίδας στα πλοία προσφέρουν σήμερα στον ναυτιλλόμενο μια βασική μέθοδο τήρησης πορείας με επιθυμητή ακρίβεια. Η μαγνητική πυξίδα είναι από τα παλαιότερα όργανα στη ναυσιπλοΐα που όμως η καταγωγή της δεν είναι απόλυτα ακριβής. Το 203 π.Χ. ο Αννίβας όταν αναχώρησε από την Ιταλία λέγεται ότι πλοηγός του ήταν κάποιος ονόματι Πελόρους. Ίσως η πυξίδα να ήταν ήδη σε χρήση τότε. Κανένας όμως δεν μπορεί να υποστηρίξει αυτό με βεβαιότητα. Λέγεται επίσης πως έλκει τη καταγωγή της από την Κίνα, κατ' άλλους ότι από εκεί εισήγαγε αυτήν ο Μάρκο Πόλο στην Ιταλία κατά τον 13ο αιώνα. Μια μαγνητική βελόνη επιπλέουσα σε δοχείο ύδατος συνιστούσε την αρχαιότερη πυξίδα.

Το 1269 ο Peter Peregrinus στο βιβλίο του "Epistola de Magnete" έγραψε για "την στηριζόμενη επί αξονίσκου επιπλέουσα βελόνη με γραμμή πίστεως" και λέγεται πως ήταν εφοδιασμένη με υποτυπώδεις διόπτρες για λήψη διοπτρικών. Η πιστότητα της σημερινής μαγνητικής πυξίδας

ανάγεται όμως στο μόλις πρόσφατο παρελθόν. Πριν από 100 περίπου χρόνια ο Λόρδος Κέλβιν τελειοποίησε την μαγνητική πυξίδα η οποία χρησιμοποιείται σήμερα.



*Εικόνα 2. Στρατιωτική ατομική διοπτηρία πυξίδα*

κατευθύνσεις του ορίζοντα.

Το ανεμολόγιο της πυξίδας, κατά την παράδοση χρονολογείται από τον 14ο αιώνα όταν ο Φλάβιο Τζιόια (Flavio Gioja) από το Αμάφι προσάρμοσε τεμάχιο μαγνήτη κάτω από φύλλο χάρτου, όμως αυτό καθ' αυτό το ανεμολόγιο είναι αρχαιότερο της πυξίδας καθόσον αποτελούσε τον ανεμοδείκτη των αρχαίων Ελλήνων από την πρώιμη ακόμη ναυσιπλοΐα τους και πολύ - πολύ πριν ακόμη αναγείρουν το 100 π.Χ. τον "Πύργο των Ανέμων" με τις οκτώ πλευρές που είναι και οι κύριες σήμερα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

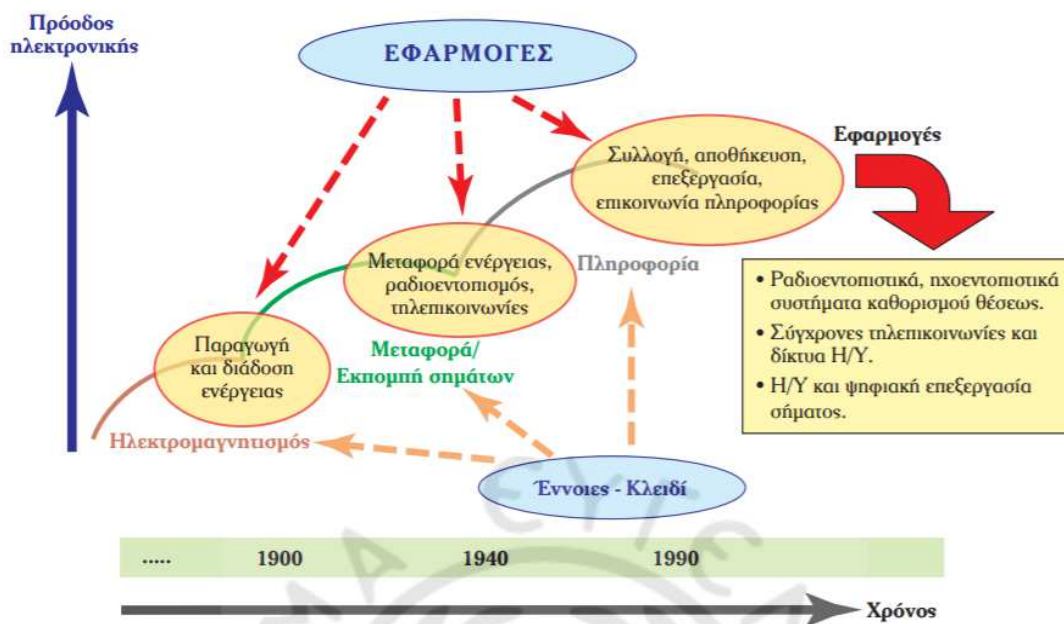
### 2.1 Η διαχρονικότητα των μεθόδων ναυσιπλοΐας και η εξέλιξη της τεχνολογίας

Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά ναυτικά όργανα αποτελούν προϊόν αποδοτικού συγκερασμού των διαχρονικών αναγκών της ναυσιπλοΐας και των εκάστοτε επιστημονικών εξελίξεων στους τομείς της ηλεκτρονικής, των τηλεπικοινωνιών, της διαστημικής τεχνολογίας, των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της πληροφορικής. Στο σχήμα 1 περιγράφονται τα στάδια από τα οποία διήλθε η επιστήμη της ηλεκτρονικής μέχρι να καταξιωθεί στις μέρες μας ως το απαραίτητο στοιχείο κάθε σύγχρονης τεχνολογικής εφαρμογής. Στο σχήμα 2 αναπαρίστανται τα αντίστοιχα εξελικτικά στάδια της προόδου που σημειώθηκε στα ηλεκτρονικά ναυτικά όργανα. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να εξετάσουμε την εξέλιξη των ηλεκτρονικών ναυτικών οργάνων, υπό το πρίσμα των μεθόδων εκτελέσεως ναυσιπλοΐας. Θα διαπιστώσουμε τότε, ότι οι μέθοδοι υπακούουν σε κοινή διαχρονική λογική. Η διαθέσιμη τεχνολογία δηλαδή, υποστηρίζει ανά εποχή σταθερά καταξιωμένες μεθόδους ναυσιπλοΐας, κάθε φορά με πλέον προηγμένα μέσα σε συνάρτηση με την εξέλιξη. Ας επεξεργασθούμε λοιπόν με τη λογική αυτήν τη μέθοδο ευρέσεως της θέσεως και κινήσεως του πλοίου. Θα παρατηρήσουμε τότε, ότι ανεξάρτητα με τις εκάστοτε τεχνολογικές καινοτομίες, η μέθοδος συνίσταται πάντοτε στον προσδιορισμό τουλάχιστον δύο γραμμών θέσεως, διοπτύσεων ή αποστάσεων, με τη βοήθεια γεωγραφικών σημείων αναφοράς. Στη συνέχεια, οι ευθείες θέσεως χαράσσονται στο ναυτικό χάρτη, με το στίγμα να βρίσκεται στην τομή τους. Ακολουθεί ο υπολογισμός της κινήσεως του πλοίου (πορεία-ταχύτητα), μέσω διαδοχικών στιγμάτων πάνω στο χάρτη. Ανεξάρτητα λοιπόν από το χρησιμοποιούμενο μέσο εξαγωγής στίγματος, δηλαδή το ναυτικό όργανο (π.χ. επαναλήπτης γυροσκοπικής πυξίδας με διόπτρα για μέτρηση οπτικών διοπτύσεων, ραντάρ για μέτρηση αποστάσεων, ραδιογωνιόμετρο για μέτρηση ραδιοδιοπτύσεων κ.λπ.), στην τελική της μορφή η χρησιμοποιούμενη μέθοδος ακολουθεί την προαναφερόμενη λογική. Εκεί όμως που υφίσταται διαφοροποίηση από μέσο σε μέσο είναι: α) Στην απόσταση ανάμεσα στο πλοίο και στα γεωγραφικά σημεία αναφοράς, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εύρεση του στίγματος. β) Στη διαθεσιμότητα του μέσου (ναυτικού οργάνου), δηλαδή στην ικανότητά του να παρέχει απρόσκοπτα τις υπηρεσίες του, με το να υπόκειται στους ελάχιστους δυνατούς περιορισμούς καιρικών συνθηκών, ορατότητας, εμβέλειας κ.λπ..

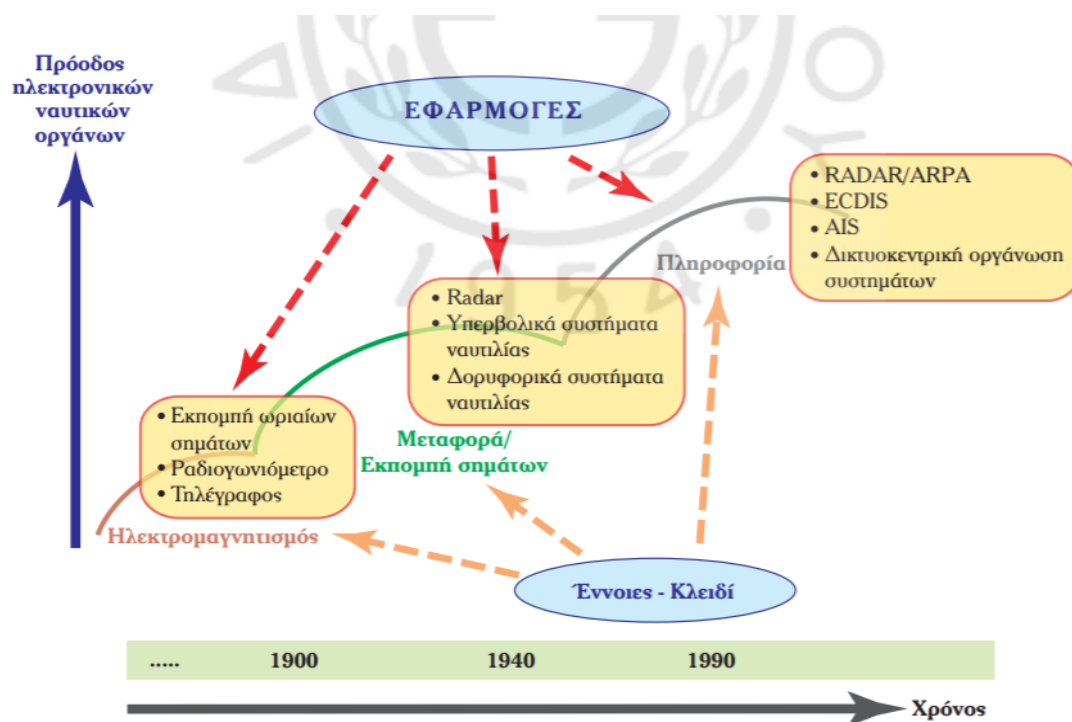
Η εξέλιξη λοιπόν της τεχνολογίας είχε ως αποτέλεσμα:

α) Τη δυνατότητα χρήσεως για την εξαγωγή του στίγματος σημείων αναφοράς που βρίσκονταν ολόενα και σε μεγαλύτερη απόσταση από το πλοίο.

β) Τη διαρκή αύξηση του χρονικού διαστήματος που το μέσο εξαγωγής στίγματος (ναυτικό όργανο) ήταν διαθέσιμο.



Εικόνα 3. Εξελικτικά στάδια της επιστήμης των ηλεκτρονικών.



Εικόνα 4 . Εξέλιξη της προόδου στα ηλεκτρονικά ναυτικά όργανα.



Στο σχήμα, παρουσιάζονται τα μέσα εξαγωγής στίγματος (ναυτικά όργανα), σε συνάρτηση με την απόσταση των γεωγραφικών σημείων αναφοράς και τη διαθεσιμότητα κάθε μέσου. Αρχικά, η εξαγωγή στίγματος δεν ήταν δυνατή παρά μόνο κατά την ακτοπλοΐα με την εκτέλεση οπτικών παρατηρήσεων. Ως παράδειγμα αναφέρεται η λήψη διοπτύσεων με τη δίοπτρα της γυροσκοπικής ή της μαγνητικής πυξίδας και ο προσδιορισμός αποστάσεων με τη μέτρηση γωνίας ύψους γνωστού αντικειμένου με τον εξάντα (π.χ. φάρος) για τον προσδιορισμό της αποστάσεώς του. Η μέθοδος αυτή, αν και είναι αποτελεσματική και χρήσιμη ακόμα και σήμερα, περιορίζεται εντούτοις από τη διαθεσιμότητά της, είτε λόγω καιρικών συνθηκών/συνθηκών ορατότητας, είτε κατά τον πλου στην ανοικτή θάλασσα. Πρακτικά είναι εφαρμόσιμη μέχρι αποστάσεις της τάξεως των 10 έως 20 ναυτικών μιλίων (ν.μ.) από την ακτή.

Ήδη από τις αρχές του 19ου αιώνα η χρησιμοποίηση του ραδιογωνιόμετρου αυξάνει την απόσταση από την ακτή, στην οποία είναι δυνατή η εύρεση στίγματος και μάλιστα ανεξάρτητα από τις συνθήκες ορατότητας, κάτι που αποτελεί πολύ σημαντική καινοτομία για τις μέχρι τότε μεθόδους ναυσιπλοΐας. Στην προκειμένη περίπτωση οι προσδιοριζόμενες ευθείες θέσεως είναι ραδιοδιοπτύσεις, δηλαδή διοπτύσεις ηλεκτρομαγνητικού σήματος που εκπέμπουν ραδιοφάροι εγκατεστημένοι σε συγκεκριμένες θέσεις, είτε επί της ξηράς είτε επί της θαλάσσης (καραβοφάναρα). Εν τούτοις και σ' αυτήν την περίπτωση, η διαθεσιμότητα του ραδιογωνιόμετρου περιορίζεται από την αντίστοιχη των ραδιοφάρων, οι οποίοι συνήθως είναι τοποθετημένοι κοντά σε λιμένες ή αεροδρόμια.

Η χρησιμοποίηση του ραντάρ (radar) κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, επιτρέπει τη χρήση γεωγραφικών σημείων για τον προσδιορισμό ευθειών θέσεως (διοπτύσεις ή/και αποστάσεις), σε μεγάλες αποστάσεις από την ακτή. Περιορίζεται όμως και το μέσο αυτό από τη διαθεσιμότητά του, αφού τα 30 έως 50 ν.μ. της εμβέλειάς του αφορούν και πάλι σε αποστάσεις που λαμβάνονται από γεωγραφικά σημεία επί της πλησιέστερης ακτής. Στην ανοικτή θάλασσα, δεν είναι λοιπόν διόλου διαθέσιμο για την εξαγωγή στίγματος, ενώ επιπλέον περιορίζεται μερικώς από τη θαλασσοταραχή και τη βροχόπτωση.

Στα συστήματα υπερβολικής ναυτιλίας, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, η εμβέλεια αυξάνεται στα 500 ν.μ. από τις θέσεις των παρακτίων σταθμών εκπομπής. Στην περίπτωση αυτή, το στίγμα προκύπτει στην τομή τουλάχιστον δύο υπερβολικών γραμμών θέσεως.

Το επόμενο στάδιο εξελίξεως των ηλεκτρονικών συστημάτων προσδιορισμού θέσεως είναι η εποχή της δορυφορικής ναυτιλίας, όπου τα γεωγραφικά σημεία αναφοράς ανεξαρτητοποιούνται από την επιφάνεια της Γης και μεταφέρονται στο διάστημα. Τα γεωγραφικά σημεία αναφοράς

είναι πλέον οι θέσεις δορυφόρων σε ελλειπτική τροχιά, οι οποίοι εκπέμπουν κατάλληλα διαμορφωμένα σήματα. Και στην περίπτωση αυτή, για την εύρεση στίγματος χρησιμοποιείται η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών σημάτων, με τη διαφορά ότι πλέον οι «ραδιοφάροι» βρίσκονται στο διάστημα αντί επί της Γης και η τεχνολογική πρόοδος επιτρέπει να προκύπτει από κάθε δορυφορικό σήμα η απόσταση δορυφόρου-πλοίου, ως γραμμή θέσεως για την εύρεση του στίγματος.

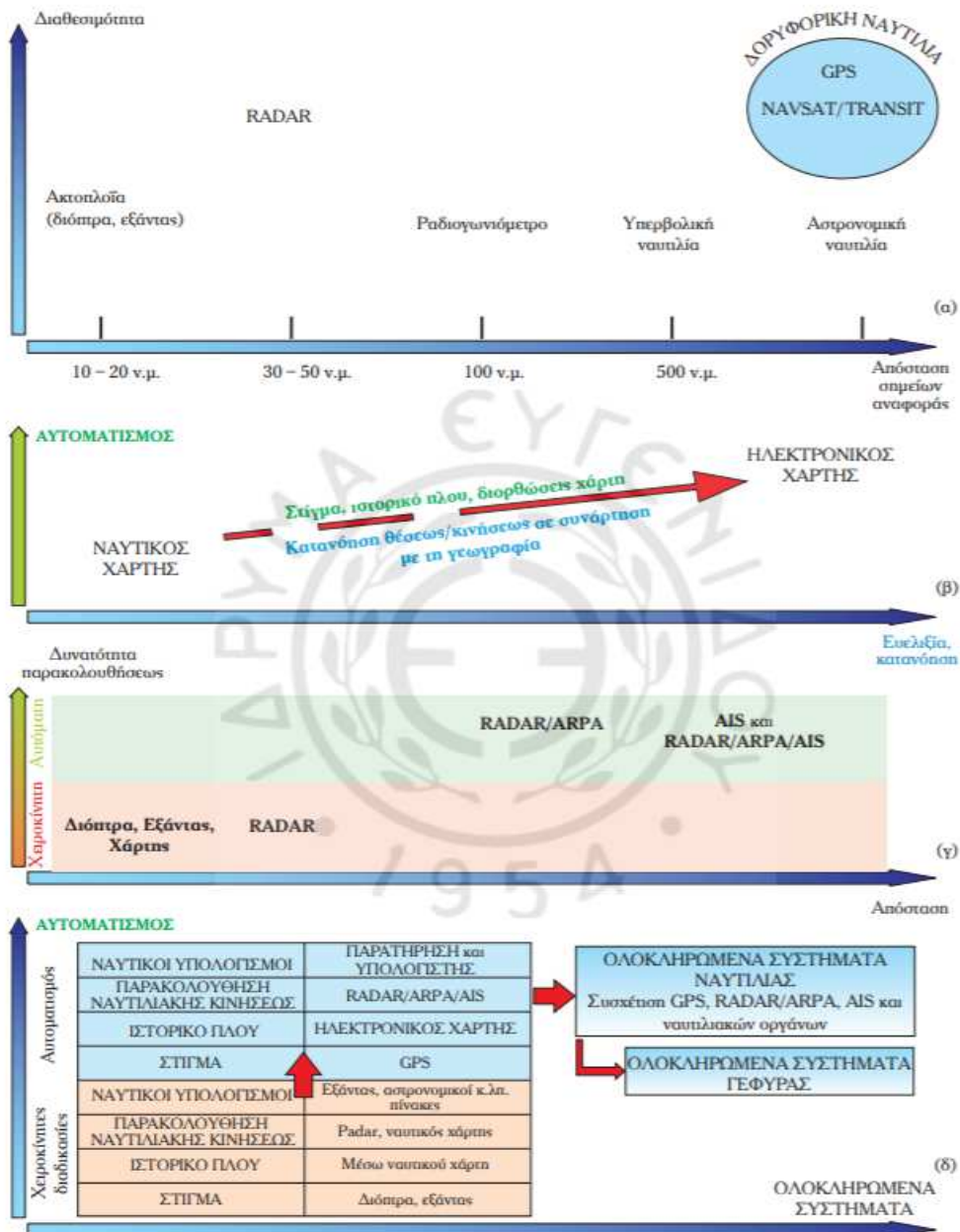
Συνεχίζοντας την ιστορική προσέγγιση στα ηλεκτρονικά ναυτικά όργανα, αναφερόμαστε στην εξέλιξη από τον κλασικό έντυπο χάρτη στον ηλεκτρονικό. Ανεξάρτητα από την εποχή, η εύρεση του στίγματος αποκτά έννοια με την αναπαράσταση της θέσεως, του πλοίου επί ενός χάρτη. Μέσω αυτού, ο ναυτικός αποκτά αίσθηση τόσο της θέσεως όσο και της κινηματικής καταστάσεως του πλοίου του σε συνάρτηση με το χώρο και το χρόνο. Και εδώ δηλαδή η λογική είναι διαχρονικά η ίδια, με την εξέλιξη να επιδρά στο είδος του χάρτη και στη χρηστικότητα του απεικονιστικού μέσου. Στο σχήμα 1.1γ(β), απεικονίζονται οι επιπτώσεις της εμφανίσεως του ηλεκτρονικού χάρτη, τόσο σε επίπεδο αυτοματισμού διαδικασιών, όσο και σε επίπεδο ευελιξίας-κατανοήσεως της κινηματικής του πλοίου. Η συνεχής απεικόνιση της θέσεως και των κινήσεων του πλοίου επί του ηλεκτρονικού χάρτη, αποκαλύπτει με τον πλέον ζωντανό και παραστατικό τρόπο στο ναυτικό, το πώς εξελίσσεται η θέση του σε συνάρτηση με το ναυτιλιακό περιβάλλον.

Εκτός από τον ακριβή προσδιορισμό της θέσεως και της κινήσεως του πλοίου, μία διαχρονικά πάγια και βασικότατη απαίτηση των μεθόδων ναυσιπλοΐας είναι και ο προσδιορισμός της θέσεως και της κινήσεως των λοιπών πλοίων που βρίσκονται στην περιοχή. Με την εμφάνισή του, το radar αύξησε την απόσταση εντοπισμού των παραπλεόντων πλοίων. Για το σκοπό αυτό, αρχικά χρησιμοποιηθήκαν χειροκίνητες μέθοδοι υποτυπώσεως της ναυτιλιακής κινήσεως [σχ. 1.1γ(γ)]. Μέσω διαδοχικών θέσεων των παραπλεόντων πλοίων (που χαράσσονταν σε χάρτη, σε φύλλο υποτυπώσεως ή στην οθόνη του radar με υαλογράφο), εξάγονταν τα στοιχεία της κινήσεώς τους. Ακολούθως ο ναυτικός προέβαινε σε χειροκίνητη εύρεση των παραμέτρων αποφυγής συγκρούσεως (CPA , TCPA ), κατέτασσε τα πλοία σε βαθμό επικινδυνότητας σε σχέση με τα οικεία χαρακτηριστικά της πλεύσεώς του και αποφάσιζε για τους περαιτέρω χειρισμούς του. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και τη συνδυασμένη λειτουργία RADAR/ARPA , όλες οι παράμετροι της παρακολουθήσεως των παραπλεόντων πλοίων (θέση, πορεία, ταχύτητα, CPA, TCPA) υπολογίζονται αυτόματα και ακολούθως υποδεικνύονται με λυιαν παραστατικό τρόπο στην οθόνη του radar. Επιπλέον, στα πλέον πρόσφατα συστήματα, ο ναυτικός μπορεί να εισάγει ως δεδομένο τον επικείμενο ελιγμό του και το σύστημα τον αξιολογεί ως προς την ασφάλειά του.

Η μετέπειτα εμφάνιση του αυτόματου συστήματος αναγνώρισεως πλοίων AIS , πολλαπλασίασε τόσο το συντελεστή ασφάλειας κατά την πλεύση, όσο και την ποιότητα της εξαγόμενης ναυτιλιακής εικόνας-καταστάσεως. Το AIS καθιστά κάθε παραπλέον πλοίο συνεργαζόμενο φορέα, για τον οποίο δεν απαιτείται η παρακολούθησή του με σκοπό την εύρεση των στοιχείων της κινήσεώς του, αφού αυτά εκπέμπονται από τον ίδιο μέσω του συστήματος AIS. Η τυποποιημένη «φόρμα» επικοινωνίας του συστήματος AIS περιλαμβάνει και άλλα χρήσιμα στοιχεία, από τα οποία κυριότερο είναι εκείνο του τύπου του πλοίου. Καθίσταται έτσι κατανοητό το πόσο αυξάνεται η ασφάλεια του πλου, αφού για κάθε πλοίο διαφορετικού τύπου (μηχανοκίνητο, αλιευτικό, ιστιοπλοϊκό κ.λπ.), ο ναυτικός προετοιμάζεται για διαφορετικό χειρισμό, σε συνάρτηση με τα αντίστοιχα ελκτικά στοιχεία και την προτεραιότητα που ορίζει ο ΔΚΑΣ . Με το σύστημα AIS, αυξάνεται και η απόσταση εντοπισμού της ναυτιλιακής κινήσεως τόσο από τεχνικής πλευράς (ιδιαίτερα με τη χρήση αναμεταδοτών), όσο και από πρακτικής πλευράς, για πλοία που αποκρύπτονται πίσω από χερσαίους όγκους και κατά συνέπεια το radar αδυνατεί να εντοπίσει.

Στο σχήμα 1.1γ(δ) απεικονίζεται η μετάβαση αρχικά από χειροκίνητα σε αυτοματοποιημένα συστήματα και μετέπειτα από αυτόνομα σε συνδυαζόμενολοκληρωμένα συστήματα. Στη γέφυρα ενός σύγχρονου πλοίου, τα διατιθέμενα ηλεκτρονικά όργανα συνδυάζονται μέσω δικτυοκεντρικής προσεγγίσεως σε ενιαία πληροφοριακή υποδομή. Μέσω της εργονομικής απεικόνισεως της συνδυασμένης πληροφορίας, συγκροτείται ένα υπερσύστημα/εργαλείο, που αποκαλύπτει με τον πλέον κατανοητό τρόπο κάθε λεπτομέρεια τόσο της κινήσεως του πλοίου, όσο και του ναυτικού περιβάλλοντος. Κατ' επέκταση, η αποδοτική συσχέτιση των επιμέρους ναυτιλιακών πληροφοριών αφενός ελαχιστοποιεί το χρόνο λήψεως αποφάσεως, αφετέρου μεγιστοποιεί την πιθανότητα της ορθότητάς της.

Μετά τη σύντομη ιστορική αναδρομή με γνώμονα τη διαχρονικότητα των μεθόδων ναυσιπλοΐας, θα αναφερθούμε με χρονολογική σειρά στα τεχνολογικά επιτεύγματα που δρομολόγησαν τη δυναμική εξέλιξη των ναυτικών ηλεκτρονικών οργάνων και συστημάτων.



Σχ. 1.1γ.

Η διαχρονικότητα των μεθόδων ναυσιπλοΐας και η εξέλιξη της τεχνολογίας.

Εικόνα 5 . Διαχρονικότητα των μεθόδων ναυσιπλοΐας και η εξέλιξη της τεχνολογίας.

## **2.2 Τέλος του 19ου αιώνα και πρώιμος 20ος αιώνας (μέχρι το 1920). - Οι πρώτες τηλεπικοινωνίες, το ραδιογωνιόμετρο και η γυροπυξίδα.**

### **2.2.1 Οι πρώτες τηλεπικοινωνίες και οι εφαρμογές τους στη ναυσιπλοΐα**

Ιστορικός σταθμός στην εξέλιξη της επιστήμης της ηλεκτρονικής, αποτελεί η επίτευξη ασύρματης επικοινωνίας. Στις 12 Δεκεμβρίου του 1901 ο Guglielmo Marconi, καταφέρνει να στείλει από την Αγγλία στις ΗΠΑ το πρώτο υπερατλαντικό ασύρματο μήνυμα, το γράμμα «S». Το πρώτο όμως επίτευγμα ασύρματης επικοινωνίας είχε ήδη προηγηθεί στη θάλασσα από το 1900, όταν με την τεχνική του Marconi, επικοινωνήσαν μεταξύ τους δύο αμερικανικά πολεμικά πλοία, το «New York» και το «Massachusetts», ενώ βρίσκονταν σε απόσταση 30 ν.μ. Η πρόοδος των τεχνικών μέσων που χρησιμοποίησε ο Marconi, κατέστησαν στη συνέχεια δυνατή την επικοινωνία στα 1.551 ν.μ. και αργότερα στα 2.100 ν.μ.

Ως πρώτη εφαρμογή της ασύρματης επικοινωνίας στις μεθόδους ναυσιπλοΐας, θεωρείται η κατά την αρχή του 20ου αιώνα εκπομπή ωριαίων σημάτων για την τήρηση ακριβούς χρόνου στα πλοία. Η σπουδαιότητα της εφαρμογής αυτής συνίσταται στο γεγονός ότι κατά την περίοδο εκείνη ο προσδιορισμός της θέσεως του πλοίου στην ανοικτή θάλασσα γινόταν αποκλειστικά με αστρονομικές μεθόδους, στις οποίες όμως σφάλμα χρόνου τεσσάρων δευτερολέπτων αντιστοιχούσε σε σφάλμα στίγματος ενός πρώτου λεπτού μήκους. Μέσω όμως της ασύρματης εκπομπής καταλλήλων σημάτων, επετεύχθη η ρύθμιση του χρονόμετρου των πλοίων, με σφάλμα μικρότερο του ενός δευτερόλεπτου.

### **2.2.2 Το ραδιογωνιόμετρο**

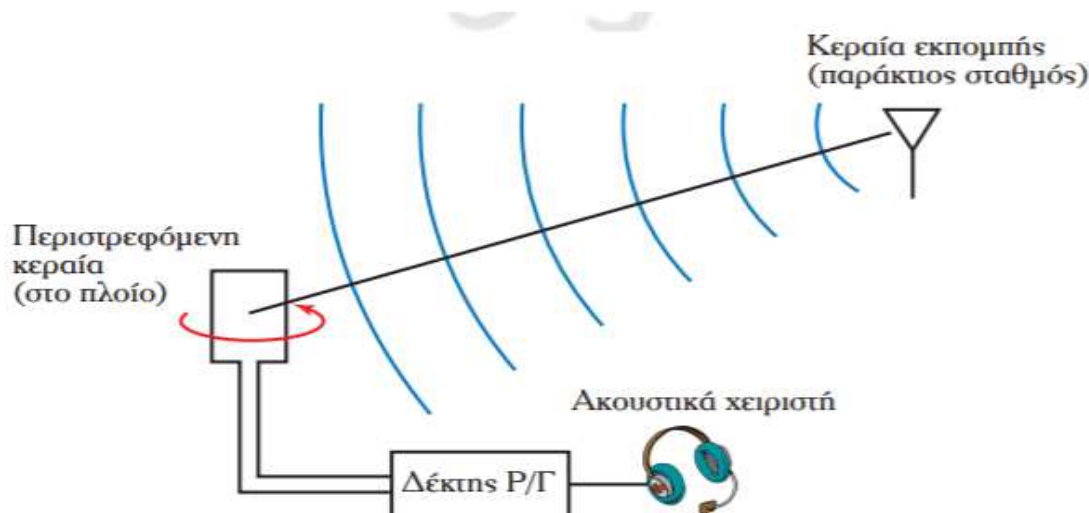
Το ραδιογωνιόμετρο (Radio Direction Finding–RDF), αποτελεί το παλαιότερο ραδιοναυτιλιακό βοήθημα. Η χρήση του χρονολογείται από τον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Με τη χρησιμοποίηση του ραδιογωνιόμετρου προσδιορίζεται μία γραμμή θέσεως που αντιστοιχεί στη διεύθυνση (διόπτευση) του σταθμού, από τον οποίο εκπέμπονται τα λαμβανόμενα στο δέκτη της συσκευής σήματα. Η ένταση του λαμβανόμενου από την περιστρεφόμενη κεραία σήματος, μεταβάλλεται ανάλογα με τη διεύθυνση του επιπέδου της κεραίας ως προς τη διεύθυνση διαδόσεως του σήματος. Όταν η ένταση του σήματος στα ακουστικά του χειριστή μηδενιστεί, η διεύθυνση του επιπέδου της περιστρεφόμενης κεραίας αντιστοιχεί στη διεύθυνση (ραδιοδιόπτευση) του παράκτιου σταθμού. Ο παλαιότερος και απλούστερος τύπος ραδιογωνιόμετρου είναι το ραδιογωνιόμετρο με περιστρεφόμενη κεραία. Οι περιστρεφόμενες κεραίες παρουσίαζαν αρκετά προβλήματα και περιορισμούς σχετικά με την εγκατάσταση, περιστροφή και μετάδοση της ενδείξεως στο δέκτη με μηχανικό τρόπο. Σε νεότερους τύπους ραδιογωνιόμετρου αντί της περιστρεφόμενης κεραίας, χρησιμοποιούνται δύο σταθερές κεραίες πλαισίου σε κάθετες μεταξύ

τους διευθύνσεις και η ένδειξη της ραδιοδιοπτέυσεως εμφανίζεται αυτόματα σε ψηφιακό ενδείκτη μετά από το συντονισμό της συσκευής στην κατάλληλη συχνότητα και τη συνεχή περιστροφή του πηνίου έρευνας (γωνιόμετρο).

Το ραδιογωνιόμετρο χρησιμοποιήθηκε στη ναυτιλία στις επόμενες δύο εφαρμογές:

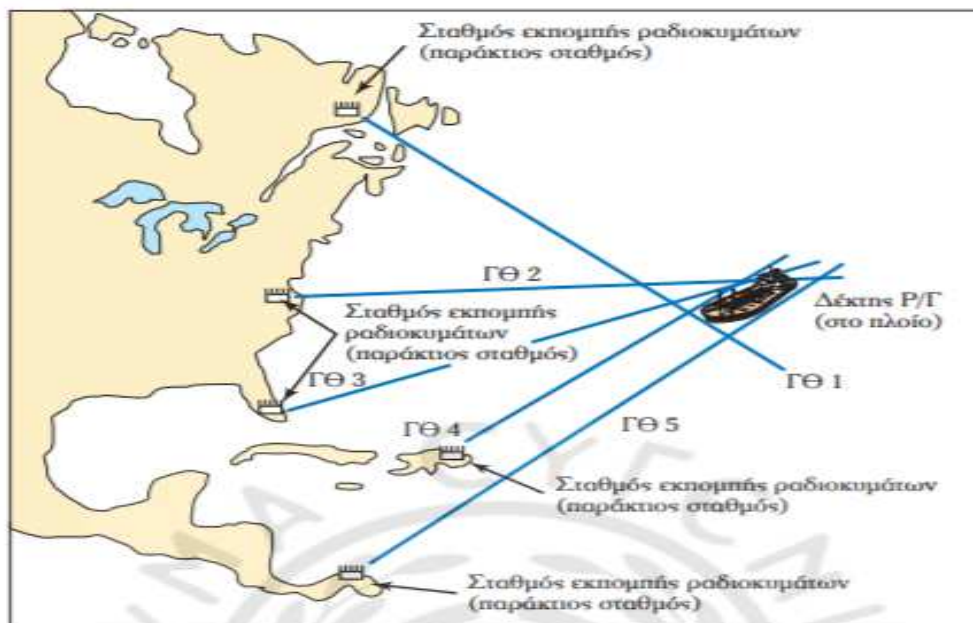
α) Προσδιορισμός θέσεως (στίγματος) πλοίου με τη μέτρηση ραδιοδιοπτέυσεων προς ορισμένους παράκτιους σταθμούς (ραδιοφάροι), οι οποίοι εκπέμπουν ειδικά για το σκοπό αυτό σήματα.

β) Ραδιοεντοπισμός κινδυνεύοντος πλοίου με ραδιοδιοπτέυσεις από παράκτιους σταθμούς ραδιογωνιομετρήσεως ή/και από άλλα παραπλέοντα πλοία.



Εικόνα 6 Αρχή λειτουργίας ραδιογωνιόμετρου.





(α) Προσδιορισμός θέσεως (στίγματος) πλοίου με ραδιοδιοπευσεις.



Εικόνα 7 Ραδιοεντοπισμός κινδυνεύοντος πλοίου με ραδιοδιοπευσεις από παράκτιους σταθμούς και παραπλέον πλοίο.

### 2.2.3 Το γυροσκόπιο, η γυροπυξίδα και τα πρώτα συστήματα αυτόματης πηδαλιουχίσεως

Το πρώτο γυροσκόπιο κατασκευάστηκε το 1810 από το Γερμανό Bohnenberg, αρκετά νωρίτερα από την πλήρη επιστημονική τεκμηρίωση του φαινομένου της γυροσκοπικής αδράνειας από το Γάλλο φυσικό Foucault κατά το 1861. Εν τούτοις, η αξιοποίηση του γυροσκόπιου στη ναυτιλία πραγματοποιήθηκε ορισμένες δεκαετίες αργότερα και συγκεκριμένα μετά την καθιέρωση των

μεταλλικών ναυπηγήσεων, λόγω της επιδράσεως του μαγνητικού πεδίου του σκάφους στην ακρίβεια των ενδείξεων της παραδοσιακής μαγνητικής πυξίδας με τη δημιουργία της γυροπυξίδας.

Η λειτουργία του γυροσκοπίου συνίσταται στη διατήρηση σε ταχεία περιστροφή ενός σφονδύλου, ο οποίος τοποθετείται εντός κινούμενου πλαισίου, το οποίο διατηρεί τη συνισταμένη των εξωτερικών ροπών ίση με το μηδέν. Έτσι, εάν το πλοίο λάβει κλίση είτε ως προς το διαμήκη είτε ως προς τον εγκάρσιο άξονα, ο σφόνδυλος του γυροσκοπίου θα συνεχίζει να περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα, ενώ παράλληλα θα διατηρείται προσανατολισμένος στην ίδια διεύθυνση. Η γωνιακή απόκλιση ανάμεσα στο σταθερά προσανατολισμένο σφόνδυλο του γυροσκοπίου και τους άξονες των στελεχών του περιστρεφόμενου πλαισίου, παρέχει τις πληροφορίες αφενός των γωνιών στροφής, αφετέρου του ρυθμού μεταβολής τους. Με την πάροδο του χρόνου, η εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε στη δραστική αύξηση της ακρίβειας της μετρήσεως των δύο προαναφερομένων πληροφοριών.

Με τις βελτιώσεις που προαναφέρθηκαν προέκυψε σταδιακά η δυνατότητα της χρήσεως του γυροσκοπίου σε πλήθος εφαρμογών, όπως:

- α) Εκτέλεση ακριβούς ναυτιλίας.
- β) Μηχανισμοί σταθεροποίησεως (stabilizers) κινουμένων οχημάτων (πλοία, αεροσκάφη, υποβρύχια, κατευθυνόμενα βλήματα).
- γ) Συστήματα αδρανειακής ναυτιλίας.
- δ) Συστήματα αυτόματου πιλότου.

Η πρώτη γυροπυξίδα που χρησιμοποιήθηκε στη ναυτιλία επινοήθηκε και κατασκευάστηκε από το Γερμανό Herman Anschütz-Kaempfe το έτος 1903 και βελτιώθηκε από το συνεργάτη του Schuler. Το 1909, ο Αμερικανός Elmer Sperry κατασκεύασε το πρώτο σύστημα αυτόματης πηδαλιουχίσεως αεροσκαφών με γυροσκοπία και το 1911 επέδειξε τη λειτουργία μιας νέας ναυτικής γυροσκοπικής πυξίδας στο πολεμικό πλοίο των ΗΠΑ «Dellaware». Το πρώτο σύστημα αυτόματου πηδαλίου για τη ναυσιπλοΐα κατασκευάστηκε το 1916 στο Κίελο της Γερμανίας, από την εταιρεία Anschütz και εγκαταστάθηκε σε ένα δανικό επιβατηγό πλοίο.

### **2.3 Από τη δεκαετία του 1920 μέχρι το τέλος του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου.**

Κατά τη δεκαετία του 1920 σε διάφορα πανεπιστήμια των ΗΠΑ και της Ευρώπης, διεξήχθησαν τεκμηριωμένες επιστημονικές μελέτες για τη δημιουργία νέων ραδιοναυτιλιακών βοηθημάτων, τόσο για τη μέτρηση αποστάσεων με την εκπομπή και λήψη ραδιοκυμάτων και τη μέτρηση του χρόνου διαδόσεώς τους (αρχή λειτουργίας radar), όσο και για τον προσδιορισμό της θέσεως



(στίγματος) πλοίου στην τομή δύο υπερβολικών γραμμών θέσεως με τη λήψη και επεξεργασία ραδιοκυμάτων που εκπέμπονται από παράκτιους σταθμούς (αρχή υπερβολικής ναυτιλίας). Εν τούτοις, οι επιστημονικές αυτές επινοήσεις παρέμειναν αναξιοποίητες μέχρι την περίοδο του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, κατά την οποία αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για στρατιωτικές ανάγκες, τόσο το ναυτικό radar, όσο και τα πρώτα συστήματα υπερβολικής ναυτιλίας.

### **2.3.1 Η επινόηση και η ανάπτυξη του radar**

Το 1920 κατασκευάζεται στην Αμερική η πρώτη λυχνία magnetron από τον Albert W. Hull της εταιρείας General Electric. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της είναι η παραγωγή μικροκυμάτων υψηλής συχνότητας και μεγάλης ισχύος. Όταν τέτοια σήματα εκπέμπονται από μία πηγή, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για να μεταφέρουν σήματα σε μεγάλες αποστάσεις. Δεν είναι λοιπόν τυχαίο, ότι με την ανακάλυψη της λυχνίας, σημειώνεται δραστική πρόοδος στις ασύρματες επικοινωνίες. Άμεση συνέπεια ήταν η βελτίωση των τεχνικών διαμορφώσεως, δηλαδή εκείνων των τεχνικών, με τις οποίες μεταβάλλοντας κατάλληλα τα χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου σήματος, μεταφέρομε πληροφορία από μία θέση σε μία άλλη. Οι αποστάσεις επικοινωνίας αυξάνονται και η ποιότητα των σημάτων βελτιώνεται.

Η συσκευή radar αναγνωρίζεται διαχρονικά ως το χαρακτηριστικότερο ηλεκτρονικό ναυτιλιακό όργανο. Αποτελεί το «ηλεκτρονικό μάτι» του ναυτικού, το οποίο ερευνά δυναμικά το περιβάλλον, προσδιορίζοντας σε πραγματικό χρόνο τόσο τους ακίνητους ή χερσαίους ναυτιλιακούς κινδύνους, όσο και τους κινούμενους στόχους. Αποτελεί λοιπόν το κατεξοχήν μέσο συνθέσεως και συναισθήσεως του ναυτιλιακού περιβάλλοντος. Η ονομασία radar (ραντάρ) αποτελεί συντομογραφία του όρου Radio Detection and Ranging. Η αρχή λειτουργίας του ραντάρ στηρίζεται στην ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα πρώτα πειράματα που κατέδειξαν την ιδιότητα της ανακλάσεως των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από αντικείμενα στα οποία προσπίπτουν, εκτελέστηκαν από τον Heinrich Hertz το 1886. Στη συνέχεια, η τεχνική αναπτύχθηκε σταδιακά, ταυτόχρονα από Γερμανούς, Γάλλους, Βρετανούς και Αμερικανούς επιστήμονες. Η πρώτη επιτυχημένη χρήση τέτοιας συσκευής έγινε το 1935 και αφορούσε στον επιτυχή εντοπισμό και στην εξαγωγή της αποστάσεως επερχόμενου αεροσκάφους. Η πρώτη ναυτιλιακή εφαρμογή έγινε το 1937 με την εγκατάσταση της πρώτης συσκευής σε πολεμικό πλοίο των ΗΠΑ. Το radar αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα τεχνολογικά επιτεύγματα του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, διεκδικώντας επάξια μερίδιο ευθύνης για την επιτυχή έκβασή του. Το 1944 άρχισε σταδιακά η εγκατάστασή του και στα εμπορικά πλοία, η οποία γενικεύθηκε μετά το τέλος του πολέμου. Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας, βελτιώθηκε

σημαντικά η ακρίβεια της εξαγόμενης πληροφορίας της συσκευής, καθώς και η περαιτέρω αξιοποίησή της, ώστε να επιτευχθεί η αυτόματη υποτύπωση της ναυτιλιακής κινήσεως.

### **2.3.2 Τα πρώτα συστήματα υπερβολικής ναυτιλίας**

Η μέθοδος προσδιορισμού θέσεως στην τομή δύο υπερβολικών γραμμών θέσεως ήταν γνωστή και χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς τουλάχιστον κατά τον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, για τον εντοπισμό της θέσεως των πυροβόλων του εχθρού με την καταγραφή των χρονικών στιγμών που ακουγόταν η βολή του πυροβόλου σε διαφορετικές θέσεις. Με τον τρόπο αυτό η διαφορά του χρόνου διαδόσεως του ηχητικού κύματος μετατρέποταν σε διαφορά αποστάσεως, από την οποία προέκυπτε η αντίστοιχη υπερβολική γραμμή θέσεως (βασική ιδιότητα της υπερβολής). Εν τούτοις, τα πρώτα ραδιοναυτιλιακά βοηθήματα υπερβολικής ναυτιλίας κατασκευάστηκαν πολύ μεταγενέστερα και συγκεκριμένα κατά το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Τα συστήματα αυτά παρείχαν τη δυνατότητα προσδιορισμού της θέσεως (στίγματος) του πλοίου με τη λήψη και την επεξεργασία ραδιοσημάτων, τα οποία εκπέμπονταν από κατάλληλους σταθμούς ξηράς σε αποστάσεις από τις ακτές κατά πολύ μεγαλύτερες από την εμβέλεια του ραδιογωνιόμετρου και του ραντάρ.

Στα συστήματα υπερβολικής ναυτιλίας η θέση του πλοίου προσδιορίζεται στην τομή δύο υπερβολικών γραμμών θέσεως, οι οποίες προκύπτουν ως εξής:

α) Η 1η υπερβολική γραμμή θέσεως προκύπτει από τη μέτρηση της διαφοράς των αποστάσεων του πλοίου από τους σταθμούς Α και Β.

β) Η 2η υπερβολική γραμμή θέσεως προκύπτει από τη μέτρηση της διαφοράς των αποστάσεων του πλοίου από τους σταθμούς Α και Γ.

Τα κυριότερα ραδιοναυτιλιακά βοηθήματα υπερβολικής ναυτιλίας που δημιουργήθηκαν κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, ήταν:

α) Το σύστημα CONSOL, το οποίο δημιουργήθηκε από τους Γερμανούς και χρησιμοποιήθηκε ευρέως για τη ναυτιλία ανοικτής θαλάσσης υποβρυχίων με την ονομασία SONNE. Μετά τη λήξη του πολέμου αναπτύχθηκε περαιτέρω από τους Βρετανούς και διατέθηκε για ελεύθερη χρήση με την ίδια ονομασία.

β) Το σύστημα DECCA, το οποίο αναπτύχθηκε από τους Βρετανούς και χρησιμοποιήθηκε ιδιαίτερα για την εκμετάλλευση πληροφοριών στίγματος στην απόβαση της Νορμανδίας. Μετά

τη λήξη του πολέμου αναπτύχθηκε περαιτέρω από την εταιρεία Decca Navigator System και διατέθηκε για ελεύθερη εμπορική χρήση.

γ) Το σύστημα LORAN, το οποίο αναπτύχθηκε το 1941 από τις ΗΠΑ για την παροχή στίγματος ακρίβειας ανοικτής θαλάσσης. Μετά τη λήξη του πολέμου αναπτύχθηκε περαιτέρω και διατέθηκε για ελεύθερη χρήση με την ονομασία LORAN-A με συχνότητα εκπομπής σταθμών ξηράς 1700–2000 KHz και εμβέλεια 540 ν.μ.. Το 1957 δημιουργήθηκε το σύστημα LORAN-C με συχνότητα εκπομπής σταθμών ξηράς 100 KHz και εμβέλεια 1080 ν.μ..

## **2.4 Από το τέλος του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου μέχρι και τη δεκαετία του 1970.**

### **2.4.1 Ο πρώτος ηλεκτρονικός υπολογιστής, ο κρυσταλλοδιόδος (transistor), τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και οι εφαρμογές στη ναυτιλία**

Ένας ιστορικός σταθμός στην εξέλιξη της επιστήμης της ηλεκτρονικής αποτελεί η κατά το 1946 κατασκευή του πρώτου ηλεκτρονικού υπολογιστή με το όνομα ENIAC από τους Eckert και Madchy, στο πανεπιστήμιο της Pennsylvania. Ο πρώτος αυτός υπολογιστής εκτελούσε 5.000 πράξεις το δευτερόλεπτο, ζύγιζε πάνω από 30 τόνους, περιείχε περισσότερες από 18.000 λυχνίες κενού και απαιτούσε για τη λειτουργία του ηλεκτρική ισχύ 130 kwatt. Η τεχνολογική επανάσταση αρχίζει το 1947, όταν ερευνητική ομάδα των εργαστηρίων Bell Labs στις ΗΠΑ, η οποία αποτελούνταν από τους John Bardeen, Walter Brattain και William Shockley, ανακάλυψαν το transistor, εγκαινιάζοντας στην ηλεκτρονική την εποχή των ημιαγωγών. Το transistor έχει χρήσεις όμοιες μ' αυτές της λυχνίας, διαθέτει όμως εξαιρετικά πλεονεκτήματα, τα οποία συνοψίζονται ως εξής:

- α) Το κόστος κατασκευής του είναι αμελητέο.
- β) Για να λειτουργήσει, απαιτεί ελάχιστη ηλεκτρική ισχύ της τάξεως των 2 μwatt.
- γ) Καταλαμβάνει ελάχιστο όγκο και το βάρος του είναι επίσης αμελητέο.
- δ) Λόγω των δύο παραπάνω χαρακτηριστικών, εκατοντάδες ή και χιλιάδες transistors καταλαμβάνουν τον ίδιο ελάχιστο χώρο και απαιτούν για να λειτουργήσουν την ίδια ηλεκτρική ισχύ, μ' αυτήν που απαιτείται για να λειτουργήσει μία μόνο λυχνία.
- ε) Η ίδια κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως ενισχυτής, όσο και ως βασικό αποθηκευτικό στοιχείο (μνήμη).

Με την πάροδο του χρόνου, βελτιώνεται με αλματώδεις ρυθμούς η δυνατότητα της «ολοκληρώσεως» μεγάλου αριθμού transistors σε ένα σύστημα, το οποίο εκτελεί ταχύτατα μία πολύπλοκη μαθηματική λογική διεργασία. Κατασκευάζονται έτσι τα πρώτα ολοκληρωμένα

κυκλώματα (Integrated Circuits–ICs) και στη συνέχεια οι μικροεπεξεργαστές (microprocessors). Ας αναλογισθούμε ότι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα διαθέτει μερικά εκατομμύρια transistors ή αντίστοιχα στοιχεία ημιαγωγών, σε επιφάνεια μερικών μόλις τετραγωνικών χιλιοστών. Το πρώτο ολοκληρωμένο κύκλωμα κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ από τον Jack Kilby, στα εργαστήρια της εταιρείας Texas Instruments. Με την πάροδο του χρόνου, η δυνατότητα ολοκληρώσεως στοιχείων ημιαγωγών σε ένα μοναδικό ολοκληρωμένο κύκλωμα αυξάνεται. Προκύπτουν έτσι τεχνολογικά επιτεύγματα, τα οποία εκφράζουν μία ολόκληρη λογική συνεπεξεργασίας χιλιάδων δεδομένων εισόδου. Παράλληλα, ένας μικροεπεξεργαστής εκτελεί περίπου ό,τι και το ολοκληρωμένο κύκλωμα, αλλά όχι μία αποκλειστική λειτουργία ή λογική. Δηλαδή, ο μικροεπεξεργαστής προγραμματίζεται με μία σειρά εντολών που διαφοροποιείται ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, στην οποία χρησιμοποιείται.

Οι πρώτες εφαρμογές των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στη ναυτιλία αφορούσαν στη δραστική αναβάθμιση των παραδοσιακών δεκτών των συστημάτων υπερβολικής ναυτιλίας με την ενσωμάτωση σ' αυτούς μικροεπεξεργαστή. Παρέχεται έτσι η δυνατότητα να εκτελείται αυτόματη επεξεργασία των λαμβανομένων ραδιοσημάτων για τον υπολογισμό και την ένδειξη των γεωγραφικών συντεταγμένων της θέσεως (στίγματος) σε ειδική ψηφιακή οθόνη.

#### **2.4.2 Εξέλιξη της υπερβολικής ναυτιλίας κατά την περίοδο των δεκαετιών 1950–1970**

Τα πρώτα βοηθήματα υπερβολικής ναυτιλίας, παρά τις μετέπειτα βελτιώσεις τους, διέθεταν περιορισμένη εμβέλεια (μέχρι τα 250 ν.μ. για το DECCA και τα 2000 ν.μ. για το LORAN). Για το λόγο αυτό, από το 1947 διεξήχθησαν στις ΗΠΑ μελέτες για την ανάπτυξη ενός νέου συστήματος υπερβολικής ναυτιλίας παγκόσμιας καλύψεως. Η δημιουργία του συστήματος αυτού ολοκληρώθηκε περί τα τέλη της δεκαετίας του 1950 και έλαβε την ονομασία OMEGA. Το συγκεκριμένο σύστημα, λειτουργώντας στις συχνότητες VLF1, επέτρεπε την εύρεση στίγματος σε οποιοδήποτε σημείο της υδρογείου, καθώς και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (για δέκτες εγκατεστημένους σε υποβρύχια). Το σύστημα OMEGA καταργήθηκε οριστικά το 1999, με την ωρίμανση του προγράμματος δορυφορικής ναυτιλίας GPS2. Γενικότερα, η ανάδειξη του κλάδου της δορυφορικής ναυτιλίας, οδήγησε σταδιακά στο περιθώριο τη χρήση των λοιπών ραδιοναυτιλιακών βοηθημάτων. Σήμερα πλέον, μόνο το σύστημα LORAN βρίσκεται σε χρήση και μόνο σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές.

Η εξέλιξη της ψηφιακής τεχνολογίας κατά τη δεκαετία του '70 είχε ως αποτέλεσμα την τεράστια βελτίωση των λειτουργικών και επιχειρησιακών δυνατοτήτων των κλασικών υπερβολικών συστημάτων ναυτιλίας. Οι νέοι δέκτες των υπερβολικών συστημάτων,

συγκρινόμενοι με τους αντίστοιχους της παλαιότερης γενιάς, είχαν μικρότερες διαστάσεις και βάρος. Επιπρόσθετα, ήταν περισσότερο εύχρηστοι, καθώς περιείχαν ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή και ψηφιακή οθόνη, με τη βοήθεια των οποίων ήταν δυνατή η επεξεργασία των λαμβανομένων σημάτων στο δέκτη και η άμεση (σε πραγματικό χρόνο) ένδειξη του στίγματος με τις γεωγραφικές συντεταγμένες, καθώς και η επίλυση διαφόρων ναυτιλιακών προβλημάτων, όπως ακολουθητέα πορεία για άφιξη σε διάφορα σημεία προορισμού, απόσταση και διόπτευση μεταξύ διαφόρων σημείων, επίλυση προβλημάτων λοξοδρομικού πλου, υπολογισμός πραγματικής ως προς το βυθό πορείας και ταχύτητας κ.λπ.



Εικόνα 8 Εκτέλεση υπερβολικής ναυτιλίας με πρώιμα ηλεκτρονικά συστήματα (δεκαετία 1950–1960).



(α) Παλιός δέκτης υπερβολικού συστήματος DECCA.



(β) Νεότερος δέκτης συστήματος DECCA, με ψηφιακή οθόνη ενδείξεως γεωγραφικών συντεταγμένων.



(γ) Παλιός δέκτης υπερβολικού συστήματος LORAN.



(δ) Νεότερος δέκτης LORAN, με ψηφιακή οθόνη ενδείξεως γεωγραφικών συντεταγμένων.

Εικόνα 9 Εξέλιξη δεκτών συστημάτων υπερβολικής ναυτιλίας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο – ΤΟ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΟ

### 3.1 Ιστορία

Η πυξίδα (compass)(από την αρχαία ελληνική λέξη πυξίς □ ίδος, που αρχικά σημαίνει ξύλινο κουτί) ή κοινώς μπούσουλας (από την ιταλική λέξη bussola) είναι όργανο με το οποίο επιτυγχάνεται ο προσανατολισμός του χρήστη, δείχνοντάς του την κατεύθυνση του Βορρά.

Ιδιαίτερα όμως στη ναυσιπλοΐα αποτελεί το σημαντικότερο "ναυτιλιακό βοήθημα" με το οποίο μετρούνται και πραγματοποιούνται τόσο οι πορείες των πλοίων όσο και οι διοπτρεύσεις. Επειδή το όργανο αυτό αναπτύχθηκε εξ ανάγκης στη ναυτιλία αλλά και εκ της σημαντικότητάς του σ'αυτή ονομάζεται συνηθέστερα ναυτική πυξίδα. Η ναυτική πυξίδα σήμερα διακρίνεται στην μαγνητική πυξίδα (magnetic compass) που βασίζεται στη λειτουργία της μαγνητικής βελόνης και είναι η πλέον διαδεδομένη, στην γυροσκοπική πυξίδα (gyrocompass) που βασίζεται στην ταχεία περιστροφή του ελεύθερου γυροσκοπίου με μηδενικό σχεδόν σφάλμα και στην γυρομαγνητική πυξίδα (gyro □ magnetic compass) περιορισμένης χρήσης. Από την εποχή που ο άνθρωπος επιδόθηκε στη Ναυτιλία παρατήρησε πως ο Πολικός αστέρας παρέμενε πάντα πλησίον ενός σημείου στον ουρανό του Β. ημισφαιρίου και αυτόν χρησιμοποιούσε για πυξίδα του. Όταν ο Πολικός δεν ήταν ορατός ο ναυτιλλόμενος χρησιμοποιούσε άλλους αστέρες. Η εφεύρεση της μαγνητικής πυξίδας, προ χιλιάδων ετών ίσως, και στη συνέχεια κατά τον 20ό αιώνα της γυροσκοπικής πυξίδας στα πλοία προσφέρουν σήμερα στον ναυτιλλόμενο μια βασική μέθοδο τήρησης πορείας με επιθυμητή ακρίβεια. Η μαγνητική πυξίδα είναι από τα παλαιότερα όργανα στη ναυσιπλοΐα που όμως η

καταγωγή της δεν είναι απόλυτα ακριβής. Το 203 π.Χ. ο Ανίβας όταν αναχώρησε από την Ιταλία λέγεται ότι πλοηγός του ήταν κάποιος ονόματι "Pelorus". Ίσως η πυξίδα να ήταν ήδη σε χρήση τότε. Κανένας όμως δεν μπορεί να υποστηρίξει αυτό με βεβαιότητα. Λέγεται επίσης πως έλκει τη καταγωγή της από την Κίνα, κατ' άλλους ότι από εκεί εισήγαγε αυτήν ο Μάρκο Πόλο στην Ιταλία κατά τον 13ο αιώνα. Μια μαγνητική βελόνη επιπλέουσα σε δοχείο ύδατος συνιστούσε την αρχαιότερη πυξίδα. Το 1269 ο Peter Peregrinus στο βιβλίο του "Epistolade Magnete" έγραψε για "την στηριζόμενη επί αξονίσκου επιπλέουσα βελόνη με γραμμή πίστεως" και λέγεται πως ήταν εφοδιασμένη με υποτυπώδεις διόπτρες για λήψη διοπτρεύσεων. Η πιστότητα της σημερινής μαγνητικής πυξίδας ανάγεται όμως στο μόλις πρόσφατο παρελθόν. Πριν από 100 περίπου ετών ο Λόρδος Κέλβιν τελειοποίησε την μαγνητική πυξίδα η οποία χρησιμοποιείται σήμερα. Το ανεμολόγιο της πυξίδας, κατά την παράδοση χρονολογείται από του 14ου αιώνα όταν ο Φλάβιο Τζιόια (Flavio Gioja) από το Αμάφι προσάρμοσε τεμάχιο μαγνήτη κάτω από φύλλο χάρτου, όμως αυτό καθ' αυτό το ανεμολόγιο είναι αρχαιότερο της πυξίδας καθόσον αποτελούσε τον ανεμοδείκτη των αρχαίων Ελλήνων από την πρώιμη ακόμη ναυσιπλοΐα τους και πολύ □ πολύ πριν ακόμη αναγεί

ρουν το 100 π.Χ. τον "Πύργο των Ανέμων" με τις οκτώ πλευρές που είναι και οι κύριες σήμερα κατευθύνσεις του ορίζοντα.

Ο προσδιορισμός της πορείας του πλοίου και η μέτρηση διευθύνσεων (διοπτρεύσεων) κατά τη διάρκεια του πλου αποτελούν βασικότερες ανάγκες της ναυσιπλοΐας. Στην παραδοσιακή ναυτιλία η υλοποίηση των αναγκών αυτών γινόταν αρχικά με τη βοήθεια της μαγνητικής πυξίδας και στη συνέχεια με τη βοήθεια της γυροσκοπικής.

Στο τελευταίο μισό του 20ού αιώνα μία σειρά από τεχνολογίες αιχμής βελτιστοποίησαν, τόσο την μαγνητική, όσο και την ηλεκτρομηχανική γυροσκοπική πυξίδα και δημιούργησαν νέες κατηγορίες ψηφιακών ναυτικών πυξίδων. Επίσης δημιουργήθηκαν νέου τύπου γυροσκόπια, όπως τα φωτογυροσκόπια (γυροσκόπια δακτυλίου laser και γυροσκόπια οπτικών ινών) και το γυροσκόπιο μαγνητικού συντονισμού πυρήνα. Οι νεότεροι αυτοί τύποι γυροσκοπίων αποτελούν σύγχρονες εφαρμογές της ίδιας λογικής που εφαρμόζεται στο μηχανικό γυροσκόπιο. Σύμφωνα με τη λογική αυτή, ένα στέλεχος-τμήμα εντός της συσκευής περιστρέφεται, με μία ιδιότητα να εμφανίζει απόλυτα σταθερά χαρακτηριστικά. Όταν όμως περιστραφεί και το πλαίσιο, εντός του οποίου βρίσκεται η συσκευή, η ιδιότητα αυτή μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την περιστροφή του πλαισίου. Με τις βελτιώσεις αυτές προέκυψε σταδιακά η δυνατότητα της χρήσεως του γυροσκοπίου σε πλήθος εφαρμογών, όπως:

- 1) Εκτέλεση ακριβούς ναυτιλίας.
- 2) Μηχανισμοί σταθεροποίησης (stabilizers) κινουμένων οχημάτων (πλοία, αεροσκάφη, υποβρύχια, κατευθυνόμενα βλήματα).
- 3) Συστήματα αδρανειακής ναυτιλίας και
- 4) συστήματα αυτόματης πηδαλιουχίσεως.

Για τον προσδιορισμό της κατευθύνσεως του πλοίου, εκτός από τις σύγχρονες ψηφιακές πυξίδες, χρησιμοποιούνται και οι δορυφορικές πυξίδες οι οποίες αποτελούν ένα σύστημα προσδιορισμού της κατευθύνσεως του πλοίου, με την αξιοποίηση των δυνατοτήτων των δορυφορικών συστημάτων προσδιορισμού θέσεως GNSS (Global Navigation Satellite Systems).

## **3.2 Το ελεύθερο γυροσκόπιο**

### **3.2.1 Ορισμός και περιγραφή**

Η αρχή του γυροσκοπίου (gyroscope) παραπέμπει στο γνωστό παιδικό παιχνίδι της σβούρας. Το γυροσκοπικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1810 από τον Johann Bohnenberger. Το 1851, με τοποθέτηση ενός εκκρεμούς στο Πάνθεον του Παρισιού, ο Leon Foucault προσπάθησε να

αποδείξει πειραματικά την περιστροφή της Γης, σύμφωνα με τη θεωρία που συνδέεται με την ιδιότητα του εκκρεμούς να διατηρεί σταθερό στον χώρο το επίπεδο αιωρήσεώς του. Η προσπάθεια αυτή όμως απέτυχε, λόγω της επιδράσεως του πεδίου της γήινης βαρύτητας. Το 1852, ο Foucault κατασκεύασε έναν πρότυπο γυροσκοπικό μηχανισμό, προκειμένου να εκτελέσει εκ νέου το πείραμά του, χωρίς την επίδραση της βαρύτητας. Αν και το πείραμα διήρκεσε περιορισμένο χρονικό διάστημα για την εξαγωγή ασφαλών επιστημονικών συμπερασμάτων, εντούτοις αποτέλεσε την πρώτη επιστημονική απόδειξη του φαινομένου της γυροσκοπικής αδράνειας.

Από τη δεκαετία του 1860 και μετά, η στρέψη του σφονδύλου του γυροσκοπίου, που αποτελεί και τη βασική προϋπόθεση ώστε να γίνει αξιοποιήσιμο το συγκεκριμένο όργανο για τη ναυσιπλοΐα με τη βοήθεια ηλεκτρικών κινητήρων, έκανε δυνατή την κατασκευή μηχανισμών με ολοένα αυξανόμενη αποτελεσματικότητα. Απαιτήθηκαν όμως αρκετά ακόμα χρόνια, περίπου μισός αιώνας, ώστε να αξιοποιηθεί επιχειρησιακά η γυροπυξίδα στα πλοία. Με σκοπό την εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του γυροσκοπίου, που παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο, η επιστημονική κοινότητα πέτυχε τελικά την κατασκευή αξιοπίστων γυροσκοπικών πυξίδων, με σημαντικά πλεονεκτήματα ακρίβειας και πρακτικότητας, καθόσον το γυροσκόπιο υποδεικνύει τη διεύθυνση του γεωγραφικού (πραγματικού) Βορρά.

Το γυροσκόπιο στην τελική του μορφή αποτελείται από μια ζυγοσταθμισμένη στρεπτή μάζα (σφόνδυλος- rotor), της οποίας το μεγαλύτερο μέρος κατανέμεται στην περιφέρεια. Χρησιμοποιείται κατάλληλος μηχανισμός αναρτήσεως (ανάρτηση-cardan), έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να στρέφεται ελεύθερα, χωρίς τριβές, γύρω από τρεις άξονες που τέμνονται κάθετα μεταξύ τους και ακριβώς στο κέντρο βάρους του σφονδύλου και οι οποίοι είναι οι ακόλουθοι:

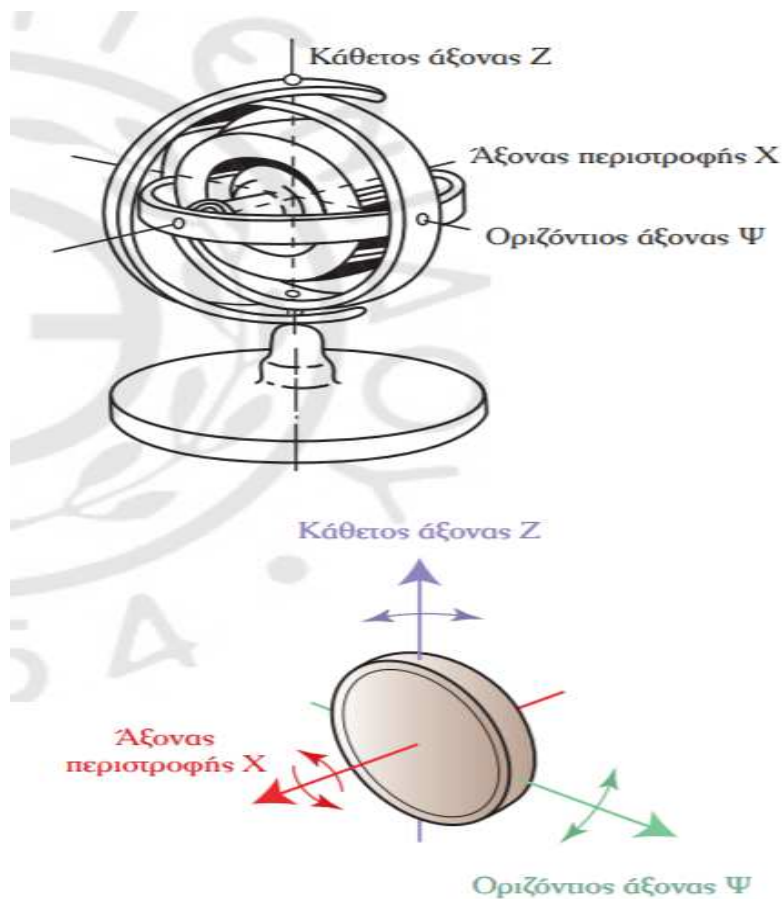
- 1) Ο άξονας περιστροφής X (spin axis).
- 2) Ο οριζόντιος άξονας Ψ (horizontal axis) ή καθ' ύψος άξονας.
- 3) Ο κάθετος άξονας Z (vertical axis) ή κατ' αζιμούθ.

Οι άξονες αυτοί αντιστοιχούν στον πρώτο, δεύτερο και τρίτο βαθμό ελευθερίας του γυροσκοπικού σφονδύλου. Αν ο σφόνδυλος (στρεπτή μάζα) ενός γυροσκοπικού μηχανισμού τεθεί σε ταχεία περιστροφική κίνηση, μετατρέπεται σε ελεύθερο γυροσκόπιο (free gyroscope). Στην κατασκευή του ελεύθερου γυροσκοπίου, το σύστημα Cardan εξασφαλίζει την αμοιβαία καθετότητα των αξόνων, ενώ η έδραση με ειδικούς σφαιροτριβείς (ball bearings) περιορίζει στο ελάχιστο δυνατό τις τριβές. Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του σφονδύλου είναι συνήθως



κατανεμημένο στην περιφέρειά του, ώστε όταν τεθεί σε περιστροφική κίνηση, να εξασφαλίζεται με την ίδια μάζα η μεγαλύτερη δυνατή ροπή αδράνειας. Επιπρόσθετα, με τη ζυγοστάθμιση του σφονδύλου, δεν μεταβάλλεται η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του και επομένως αποφεύγεται

ο κλονισμός του άξονα περιστροφής.



### 3.2.2 Ιδιότητες του γυροσκοπίου

Η κατανόηση των ιδιοτήτων του γυροσκοπίου απαιτεί ιδιαίτερη προσπάθεια, ώστε να αντιληφθούμε το πώς ο άνθρωπος κατάφερε, αξιοποιώντας ένα φυσικό φαινόμενο, να κατασκευάσει έναν μηχανισμό που μπορεί να διατηρείται συνεχώς στραμμένος προς την ίδια κατεύθυνση, ανεξάρτητα από τις κινήσεις του φορέα στηρίξεώς του. Έτσι,

παρακάτω θα επιχειρήσουμε να αναλύσουμε σε βάθος το φαινόμενο του γυροσκοπίου, μέσω της αναφοράς σε απλά παραδείγματα της καθημερινής ζωής. Επειδή όμως η κατανόηση, ενός, φαινομενικά έστω, δυσνόητου φαινομένου δεν είναι δυνατή αποκλειστικά μέσω της διαισθήσεως, θα τεκμηριώσουμε τα συμπεράσματα που εξάγονται από την κοινή λογική, με τη βοήθεια μερικών εννοιών που δανειζόμαστε από την επιστήμη της φυσικής. Σκοπός δεν είναι η σπουδή της φυσικής, αλλά η αντικειμενικότητα στην εξαγωγή των συμπερασμάτων εκείνων, που θα μας καταστήσουν ικανούς να αναγνωρίζουμε τα ιδιαίτερα εκείνα χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει ένα γυροσκόπιο, ώστε να θεωρείται αξιόπιστο ναυτιλιακό όργανο.

Ξεκινώντας την προσπάθεια αναγωγής των συμπερασμάτων της λογικής σ' ένα κατάλληλο φυσικομαθηματικό μοντέλο, θα αναφερθούμε σε ορισμένα μεγέθη που απαντώνται στη γραμμική κίνηση των σωμάτων, ταυτόχρονα με τα ανάλογα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην περιστροφική κίνηση των σωμάτων.

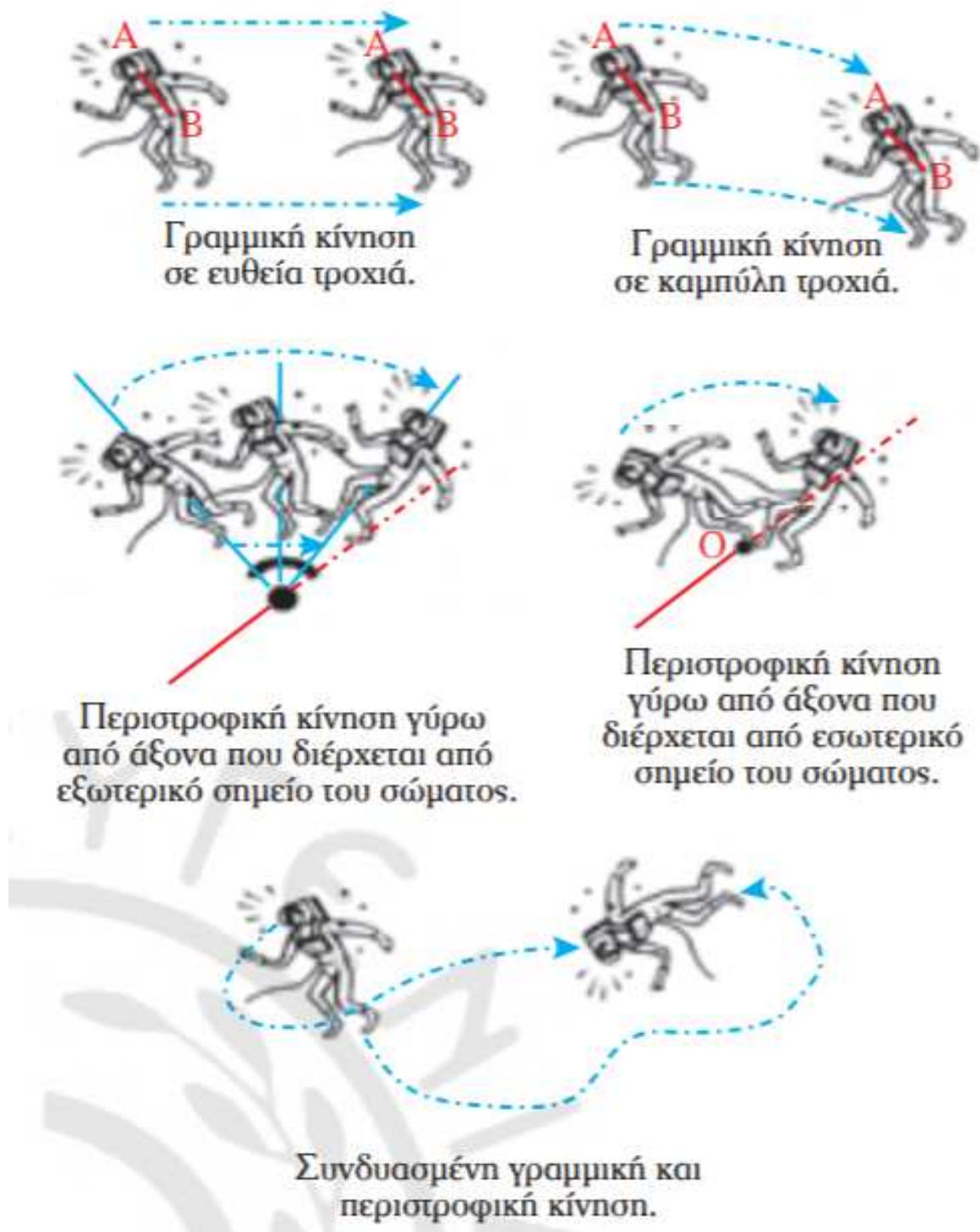
1) Γραμμική, περιστροφική κίνηση και ο Δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα (Αρχή της Διατηρήσεως της Ορμής και Στροφορμής).

Η διάκριση μεταξύ γραμμικής και περιστροφικής κινήσεως γίνεται κατανοητή με τη βοήθεια του σχήματος. Γνωρίζουμε ότι ένα σώμα σε κίνηση είναι δυνατόν να ακολουθήσει οποιαδήποτε τροχιά. Αν ένα οποιοδήποτε ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει δύο σημεία του σώματος μετατοπίζεται παράλληλα ως προς τον εαυτό του, ενώ το σώμα κινείται, τότε αυτό εκτελεί γραμμική κίνηση. Αντίθετα, όταν κατά την κίνηση του σώματος το ανωτέρω ευθύγραμμο τμήμα εμφανίζεται να περιστρέφεται γύρω από άξονα, τότε το σώμα εκτελεί περιστροφική κίνηση. Φυσικά, είναι δυνατός και ο συνδυασμός των δύο προαναφερθέντων κινήσεων σε σύνθετη κίνηση.

Στον πίνακα, αναγράφονται τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στη γραμμική κίνηση, δίπλα από τα αντίστοιχα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην περιστροφική. Δηλαδή πρόκειται για μεγέθη που αποδίδουν χαρακτηριστικά της ίδιας έννοιας, το καθένα στο είδος της κινήσεως που το αφορά, τη γραμμική ή την περιστροφική.

Η πρώτη αντιστοιχία αφορά στο διάνυσμα θέσεως  $r_G$  κατά τη γραμμική κίνηση, σε σχέση με τη γωνία  $\theta$  κατά την περιστροφική. Το διάνυσμα θέσεως  $r_G$  ενός σημείου του σώματος είναι το διάνυσμα με αρχή την αρχή των αξόνων και πέρας το δεδομένο σημείο επί του σώματος. Κατά την περιστροφική κίνηση αντίστοιχα, το χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η γωνία  $\theta$  που διαγράφει ένα σημείο του σώματος, όταν αυτό περιστρέφεται γύρω από τον άξονα περιστροφής του.

Η δεύτερη αφορά στη σύγκριση της γραμμικής με τη γωνιακή ταχύτητα. Ενώ η μέση γραμμική ταχύτητα ισούται με το διανυόμενο διάστημα διά του μεσολαβήσαντος χρόνου, η μέση γωνιακή ταχύτητα ισούται με τη γωνία που υποτυπώνεται κατά την περιστροφή του σώματος διά του μεσολαβήσαντος χρόνου.



Εικόνα 10 Διάφοροι τύποι γραμμικής, περιστροφικής κινήσεως και ο συνδυασμός των δύο αυτών κινήσεων σε σύνθετη κίνηση

<b>Γραμμική κίνηση</b>	
<b>Μέγεθος</b>	<b>Συμβολισμός</b>
Διάνυσμα θέσεως	$\vec{r}$
Γραμμική ταχύτητα	$\vec{v} = \frac{dx}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{r}$
Γραμμική επιτάχυνση	$a = \frac{dv}{dt}$
Μάζα	$m$
Δύναμη	$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$
Ορμή	$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
<b>Περιστροφική κίνηση</b>	
<b>Μέγεθος</b>	<b>Συμβολισμός</b>
Γωνία	$\theta = \frac{s}{r} = \frac{\text{μήκος τόξου}}{\text{ακτίνα}}$
Γωνιακή ταχύτητα	$\omega = \frac{d\theta}{dt}$
Γωνιακή επιτάχυνση	$a = \frac{d\omega}{dt}$
Ροπή αδράνειας ως προς άξονα	$I = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2 = \int m \cdot dr$
Ροπή δυνάμεως	$\vec{\tau} = I \cdot a = \vec{r} \times F$
Στροφορμή	$\vec{L} = \vec{\omega} \cdot I = \vec{r} \times \vec{p}$

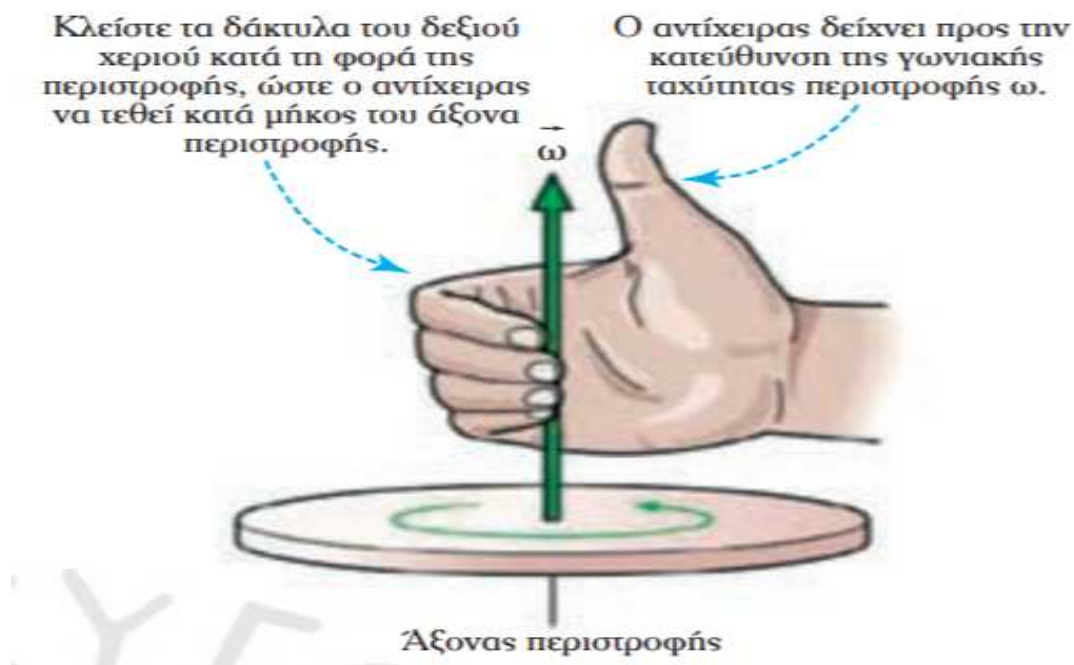
Εικόνα 11 Μεγέθη που χρησιμοποιούνται κατά τη γραμμική κίνηση και τα ισοδύναμά τους κατά την περιστροφική.

Στον πίνακα τα δύο μεγέθη δίδονται με βάση τις στοιχειώδεις μεταβολές του διαστήματος και της γωνίας αντίστοιχα, σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η γωνιακή ταχύτητα είναι διανυσματικό μέγεθος. Η διεύθυνση και η φορά του διανύσματος προκύπτουν με τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα. Στη συνέχεια, η μάζα κατά τη γραμμική κίνηση είναι χαρακτηριστικό της αδράνειας του σώματος. Σώμα μεγάλης μάζας διαθέτει μεγάλη αδράνεια, δηλαδή μεγάλη αντίσταση στο να αλλάξει την κινητική του κατάσταση. Αντίστοιχο μέγεθος στην περιστροφική κίνηση αποτελεί η ροπή αδράνειας, η οποία αποδεικνύει ακριβώς την αδράνεια, δηλαδή τη δυσκολία που παρουσιάζει ένα σώμα ώστε να τεθεί σε περιστροφική

κίνηση, γύρω από δεδομένο άξονα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ροπή αδράνειας ενός σώματος γύρω από έναν άξονα, τόσο δυσκολότερα το σώμα αυτό μπορεί να τεθεί σε περιστροφική κίνηση γύρω απ' αυτόν. Αν ένα σώμα συγκροτείται από στοιχειώδη σωματίδια μάζας  $m_i$ ,  $i = 1 \dots n$ , τότε η ροπή αδράνειας γύρω από έναν άξονα ισούται με:  $I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$ , όπου  $r_i$ ,  $i = 1 \dots n$  οι αντίστοιχες αποστάσεις των στοιχειωδών μαζών από τον άξονα περιστροφής.

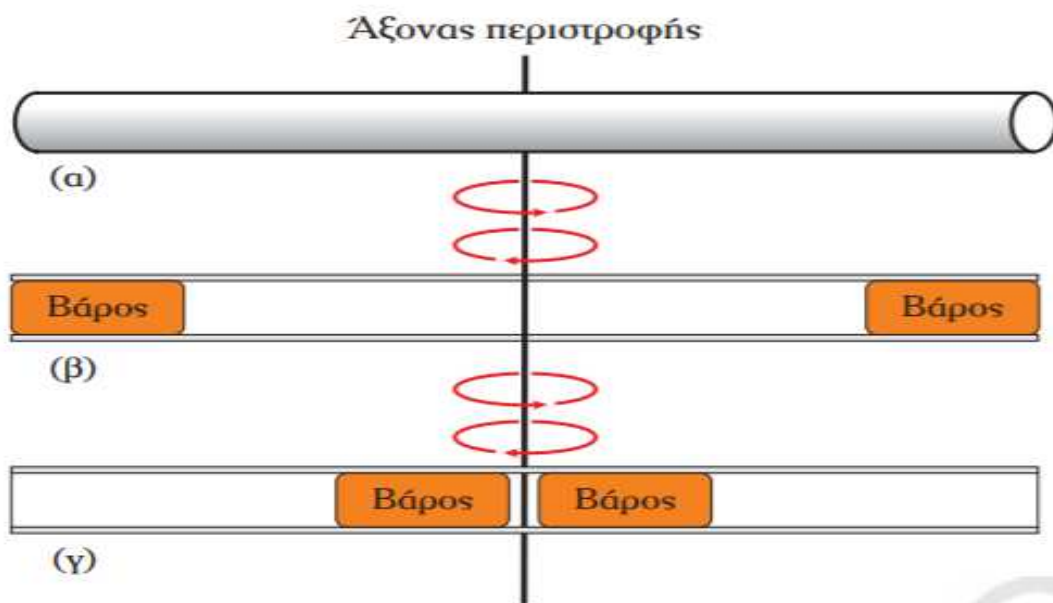
Δηλαδή, η ροπή αδράνειας ενός σώματος εξαρτάται από το πώς είναι κατανομημένη η μάζα του σώματος γύρω από τον άξονα περιστροφής. Στο σχήμα εικονίζεται ένας πλαστικός σωλήνας (α), στο εσωτερικό του οποίου έχουν τοποθετηθεί δύο πανομοιότυπα βάρη.

Στην περίπτωση (β) τα βάρη τοποθετούνται στα άκρα του σωλήνα, στη μεγαλύτερη δυνατή απόσταση από τον άξονα περιστροφής και στην περίπτωση (γ) τοποθετούνται στο κέντρο, πλησίον του άξονα περιστροφής. Στην περίπτωση αυτή (β), η κατανομή του βάρους είναι τέτοια, που ο σωλήνας ανθίσταται έντονα σε ενδεχόμενη περιστροφή του. Η κατανομή της μάζας του γύρω από τον άξονα περιστροφής είναι τέτοια, που τον κάνει να διαθέτει μεγάλη ροπή αδράνειας. Αντίθετα, στην περίπτωση (γ) ο σωλήνας με τη βοήθεια μίας μικρής δυνάμεως μπορεί να τεθεί εύκολα σε περιστροφή. Σε αυτήν την περίπτωση ο σωλήνας διαθέτει μικρή ροπή αδράνειας.



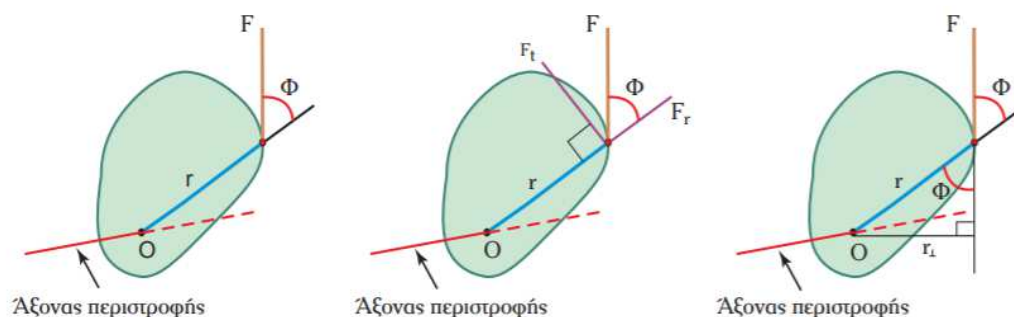
Εικόνα 12 Εφαρμογή του κανόνα του δεξιού χεριού για την εύρεση της κατεύθυνσης και της φοράς του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής.



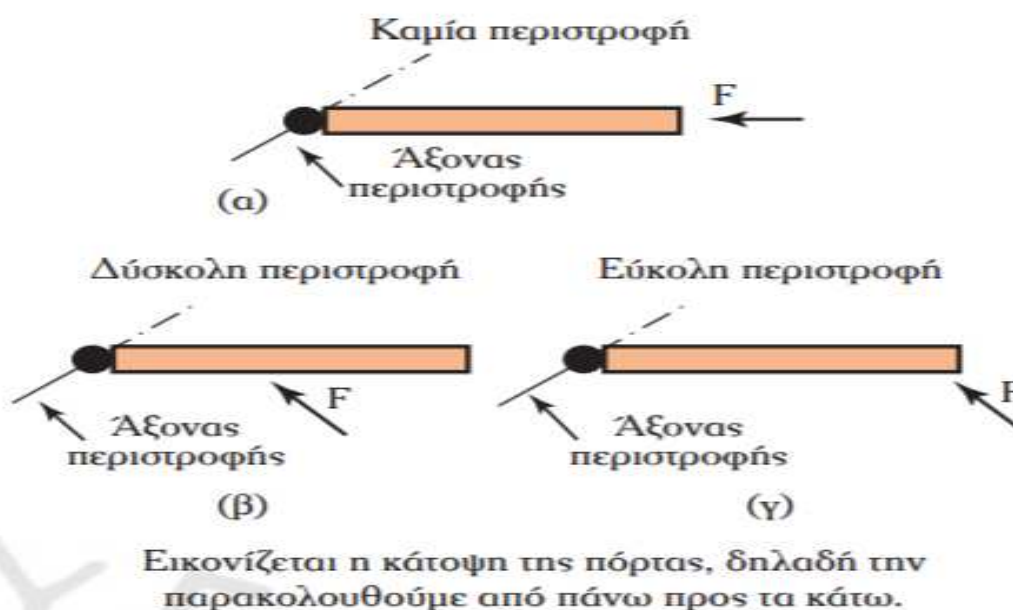


Εικόνα 13 Δύο πανομοιότυποι γεωμετρικά σωλήνες διαθέτουν διαφορετική ροπή αδράνειας, ανάλογα με το πώς έχουν τοποθετηθεί τα βάρη στο εσωτερικό τους.

Ακολουθεί η αναλογία μεταξύ των μεγεθών της δύναμης  $F$   $G$  κατά τη γραμμική κίνηση και της ροπής  $\check{D}$   $G$  κατά την περιστροφική. Η ροπή μιας δύναμης αποτελεί ένα μέγεθος που αποδεικνύει τη δυνατότητα που διαθέτει η δύναμη αυτή να προκαλέσει την περιστροφή του σώματος επί του οποίου ασκείται. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την κατεύθυνση της δύναμης και τη θέση του σημείου εφαρμογής της επί του σώματος. Αν η κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης διέρχεται από το σημείο περιστροφής, τότε η δύναμη δεν μπορεί να προκαλέσει καμία περιστροφή. Με τη βοήθεια του σχήματος, μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τη ροπή δύναμης. Στο σχήμα αυτό επιχειρούμε να ανοίξουμε μία πόρτα με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Στην περίπτωση (α) η δύναμη ασκείται κατά διεύθυνση που διέρχεται από το σημείο περιστροφής, από τους μεντεσέδες της πόρτας. Τότε η πόρτα δεν περιστρέφεται καθόλου. Στην περίπτωση (β) η δύναμη ασκείται στο μέσον της πόρτας και εκείνη ανοίγει δύσκολα. Στην περίπτωση (γ) η δύναμη ασκείται στο άκρο της πόρτας (εκεί που σωστά έχει τοποθετηθεί το πόμολο!) και η πόρτα ανοίγει εύκολα. Το παράδειγμα αυτό παρουσιάζει με χαρακτηριστικό τρόπο το πώς η θέση εφαρμογής της δύναμης έχει επίδραση στην ικανότητά της να περιστρέψει ένα σώμα.



Εικόνα 14 Ροπή δυνάμεως ως προς άξονα.



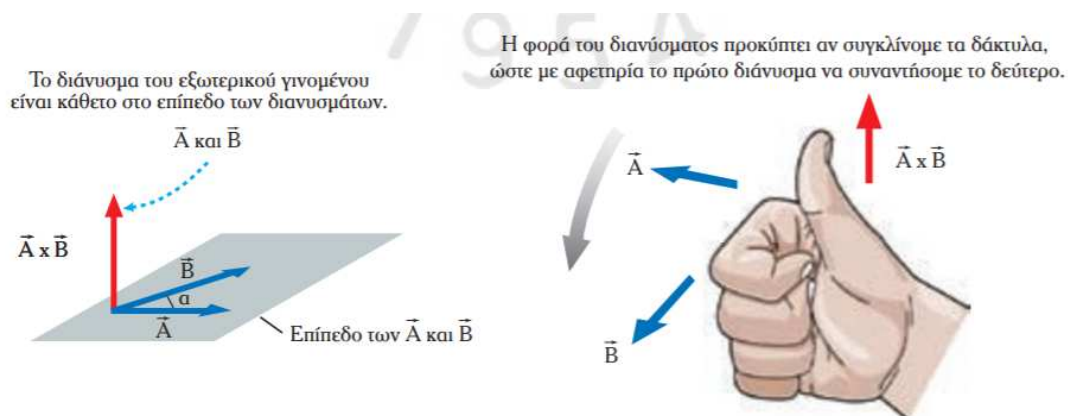
Εικόνα 15 Ροπή δυνάμεως σε τρεις διαφορετικές δυνάμεις κατά το άνοιγμα μίας πόρτας.

Στη φυσική, το χαρακτηριστικό μέγεθος που περιγράφει τα παραπάνω είναι η ροπή δυνάμεως ως προς άξονα. Η ροπή μιας δυνάμεως ως προς άξονα ισούται με το γινόμενο της δυνάμεως επί την κάθετη απόσταση ανάμεσα στον άξονα περιστροφής και στο διάνυσμα της δυνάμεως, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα. Το ίδιο αποτέλεσμα λαμβάνεται αν ληφθεί το γινόμενο της αποστάσεως επί την κάθετη συνιστώσα της δυνάμεως επί του διανύσματος  $r$   $G$  . Το προαναφερόμενο γινόμενο, στη μία ή στην άλλη του μορφή, αποδίδεται στα μαθηματικά με την έννοια του εξωτερικού γινομένου των δύο διανυσμάτων,  $r$   $G$  και  $F$   $G$  . Δηλαδή ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} \vec{\tau} &= r \cdot F_t = r \cdot [F \cdot \text{Sin}(\varphi)] = r_t \cdot F = \\ &= [r \cdot \text{Sin}(\varphi)] \cdot F = \vec{r} \times F \end{aligned}$$

Στο σημείο αυτό σημειώνομε ότι το σύμβολο του επί (x) στην παραπάνω σχέση αντιστοιχεί στην πράξη του εξωτερικού γινομένου διανυσμάτων. Το αποτέλεσμα της πράξεως αυτής είναι ένα νέο

διάνυσμα, το οποίο διαθέτει μέτρο, διεύθυνση και φορά. Εξ ορισμού, το μέτρο του αντιστοιχεί στο γινόμενο των μέτρων των δύο διανυσμάτων, επί το ημίτονο της περιεχόμενης γωνίας τους. Η διεύθυνση και η φορά του διανύσματος προκύπτουν και πάλι με τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπου τώρα κλείνουμε τα δάκτυλα του δεξιού χεριού, ώστε με αφετηρία το πρώτο διάνυσμα να συναντήσουμε το δεύτερο.



Εικόνα 16 Εφαρμογή του κανόνα του δεξιού χεριού για την εύρεση της κατεύθυνσεως και της φοράς του διανύσματος που ισούται με το εξωτερικό γινόμενο δύο διανυσμάτων  $A$  και  $B$ .

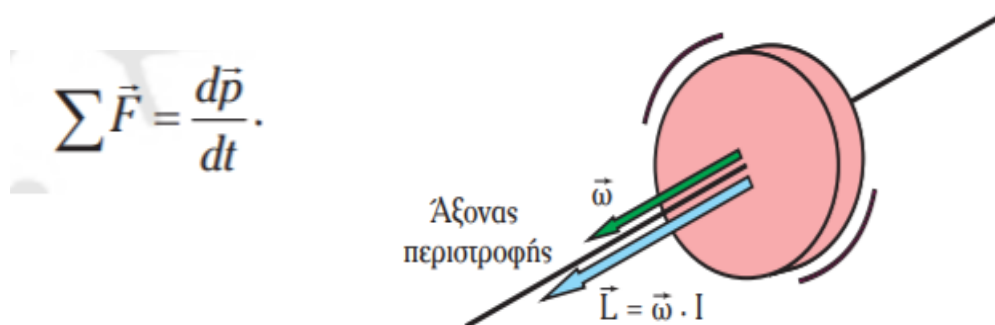
Τα τελευταία δύο μεγέθη που θα εξετάσουμε είναι η ορμή στη γραμμική κίνηση και κατ' αναλογία η στροφορμή στην περιστροφική κίνηση. Στη γραμμική κίνηση, το μέγεθος της ταχύτητας δεν αρκεί για να περιγράψει από μόνο του όλα τα χαρακτηριστικά της κινήσεως ενός σώματος. Για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιείται ένα επί πλέον μέγεθος, η ορμή, η οποία ισούται με το γινόμενο της μάζας ενός σώματος επί την ταχύτητά του. Η ορμή δηλαδή εκφράζει μία «ποσότητα κινήσεως». Η διαφορά στην ορμή που έχουν δύο σώματα, τα οποία επί παραδείγματι έχουν την ίδια ταχύτητα, αλλά διαφορετική μάζα, εξηγεί γιατί ένα φορτηγό αυτοκίνητο φρενάρει πιο δύσκολα από ένα επιβατικό όχημα που κινείται με την ίδια ταχύτητα. Για τον ίδιο λόγο, είναι προτιμότερο να κτυπηθεί κάποιος από ένα ποδήλατο που κινείται με 10 km/h παρά από ένα τρένο που κινείται με την ίδια ταχύτητα. Η ορμή αποτελεί διανυσματικό μέγεθος και έχει την ίδια διεύθυνση με την ταχύτητα του σώματος.

Η έννοια της ορμής κατά τη γραμμική κίνηση αποδίδεται στην περιστροφική κίνηση με την έννοια της στροφορμής. Και εδώ, το μέγεθος αυτό εκφράζει την «ποσότητα της κινήσεως» που διαθέτει ένα σώμα που έχει τεθεί σε περιστροφή γύρω από άξονα. Η στροφορμή είναι και αυτή διανυσματικό μέγεθος και έχει την κατεύθυνση της γωνιακής ταχύτητας  $\vec{\omega}$  ( $L = I\vec{\omega}$ ), δηλαδή την κατεύθυνση του άξονα περιστροφής του σώματος.

Μετά την αναφορά στα μεγέθη της φυσικής που προηγήθηκαν, θα αναφερθούμε στον Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα, καθώς ο νόμος αυτός αποτελεί θεμελιώδη λίθο της φυσικής και ερμηνεύει



το φαινόμενο της γυροσκοπικής αδράνειας. Στην περίπτωση της γραμμικής κινήσεως ο νόμος διατυπώνεται ως εξής: «Το άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα, ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της ορμής του σε συνάρτηση με τον χρόνο». Η αντίστοιχη εξίσωση είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 17 Τα διανύσματα της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής και της στροφορμής για περιστρεφόμενο δίσκο με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού.

Συνέπεια της ισχύος του νόμου αυτού είναι ότι εάν ο άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα ισούται με μηδέν

$$\left( \frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \right), \quad \left( \sum \vec{F} = 0 \right)$$

τότε ο ρυθμός μεταβολής της ορμής του είναι και αυτός

μηδέν. Δηλαδή, η ορμή του σώματος παραμένει σταθερή όταν στο σώμα

δεν ασκούνται καθόλου εξωτερικές δυνάμεις ή ασκούνται αλλά αλληλοαναιρούνται, ώστε το άθροισμά τους να ισούται με μηδέν. Για την περίπτωση της περιστροφικής κινήσεως, ο νόμος διατυπώνεται ως εξής: «Το άθροισμα των ροπών των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα, ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της στροφορμής του σε συνάρτηση με τον χρόνο».

Η αντίστοιχη εξίσωση είναι η ακόλουθη:

$$\sum \vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

Συνέπεια της ισχύος του νόμου αυτού είναι ότι εάν το άθροισμα των ροπών των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα ισούται με μηδέν τότε ο ρυθμός μεταβολής της ορμής του είναι και αυτός μηδέν

$$\left( \sum \vec{\tau} = 0 \right), \quad \left( \frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \right)$$

Δηλαδή, η στροφορμή του σώματος παραμένει σταθερή, όταν στο σώμα δεν ασκούνται καθόλου ροπές εξωτερικών δυνάμεων ή ασκούνται αλλά αλληλοαναιρούνται, ώστε το άθροισμά τους να ισούται με μηδέν. Επειδή όμως η στροφορμή είναι διανυσματικό μέγεθος (έχει μέτρο και κατεύθυνση), σταθερότητα του μεγέθους αυτού σημαίνει ότι τόσο το μέτρο του όσο και η κατεύθυνσή του παραμένουν σταθερά.

## 2) Γυροσκοπική αδράνεια.

Παράδειγμα ισχύος του Δεύτερου Νόμου του Νεύτωνα αποτελεί η περιστροφή της Γης γύρω από τον εαυτό της. Ο άξονας περιστροφής της, ο οποίος εμφανίζει μια μικρή κλίση ως προς την τροχιά περιφοράς της γύρω από τον Ήλιο, διατηρεί σχεδόν πάντα την ίδια κατεύθυνση. Αυτός είναι ο λόγος που υφίσταται η διαδοχή των εποχών, καθώς και η εμφάνιση για παράδειγμα του πολικού αστέρα στην ίδια θέση καθόλη τη διάρκεια του έτους, που υποδεικνύει τον Βορρά. Αντίστοιχο παράδειγμα αποτελεί η κίνηση μίας μπάλας ποδοσφαίρου, μετά το λάκτισμα που δέχεται από τον παίκτη. Η μπάλα μπορεί να διαγράψει οποιαδήποτε τροχιά. Αν όμως παράλληλα έχει τεθεί σε περιστροφική κίνηση, τότε διατηρεί σταθερό τον άξονα της περιστροφής της καθόλη τη διάρκεια της κινήσεώς της.

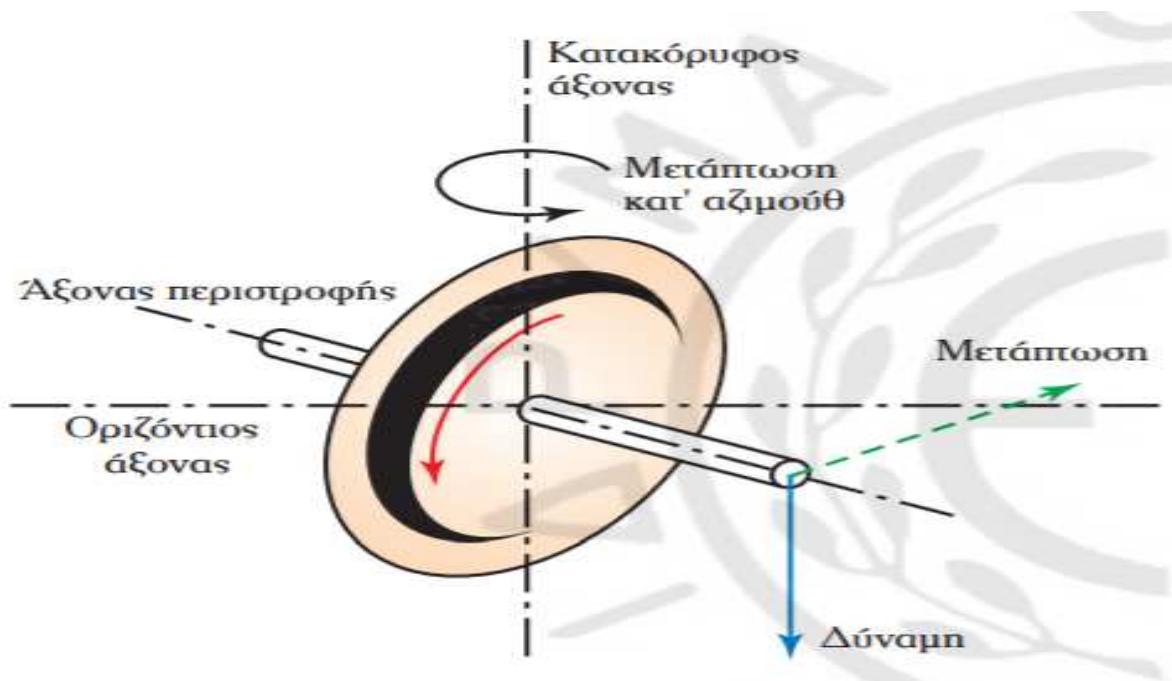
Για τον ίδιο λόγο, η ταχεία περιστροφή του σφονδύλου του γυροσκοπίου τον καθιστά ικανό να διατηρεί τον προσανατολισμό του, με την προϋπόθεση ότι δεν ασκούνται εξωτερικές ροπές δυνάμεων σ' αυτόν. Έτσι, όταν το πλοίο στρέφει ή παίρνει κλίσεις, μετατοπίζονται τα στελέχη του μηχανισμού αναρτήσεως του σφονδύλου. Επειδή η ποιότητα του μηχανισμού αναρτήσεως είναι τέτοια που οι ασκούμενες τριβές στο σφόνδυλο είναι αμελητέες, πρακτικά ουδεμία εξωτερική ροπή ασκείται στον σφόνδυλο του γυροσκοπίου. Σύμφωνα λοιπόν με τον Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα, διατηρείται σταθερό το διάνυσμα της στροφορμής (κατά μέτρο και διεύθυνση), άρα διατηρείται σταθερή και η κατεύθυνση που υποδεικνύει ο σφόνδυλος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται γυροσκοπική αδράνεια (gyroscope inertia).

Συνοψίζοντας, γυροσκοπική αδράνεια καλείται η ιδιότητα του ελεύθερου γυροσκοπίου να διατηρεί σταθερή τη διεύθυνση περιστροφής του, ανεξάρτητα από τις κινήσεις της βάσεώς του ή του επιπέδου στηρίξεώς του, εφόσον δεν δέχεται την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων ή ροπών. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν τοποθετήσουμε το ελεύθερο γυροσκόπιο πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια με τον άξονα περιστροφής του σφονδύλου παράλληλο προς την ευθεία της επίπεδης επιφάνειας και στη συνέχεια το παρακολουθήσουμε για μερικές ώρες, ενώ θα συνεχίζεται η περιστροφή του και δεν θα εφαρμοστεί σ' αυτό καμία δύναμη, θα παρατηρήσουμε ότι ο άξονας περιστροφής θα αρχίσει να κινείται σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς και να πραγματοποιεί στροφή και κλίση. Η μεικτή αυτή κίνηση που παρατηρούμε στον άξονα περιστροφής δεν είναι

πραγματική, αλλά φαινόμενη και οφείλεται στην αντίθετη πραγματική κίνηση που εκτελεί η επίπεδη επιφάνεια στον χώρο, λόγω της περιστροφής της Γης.

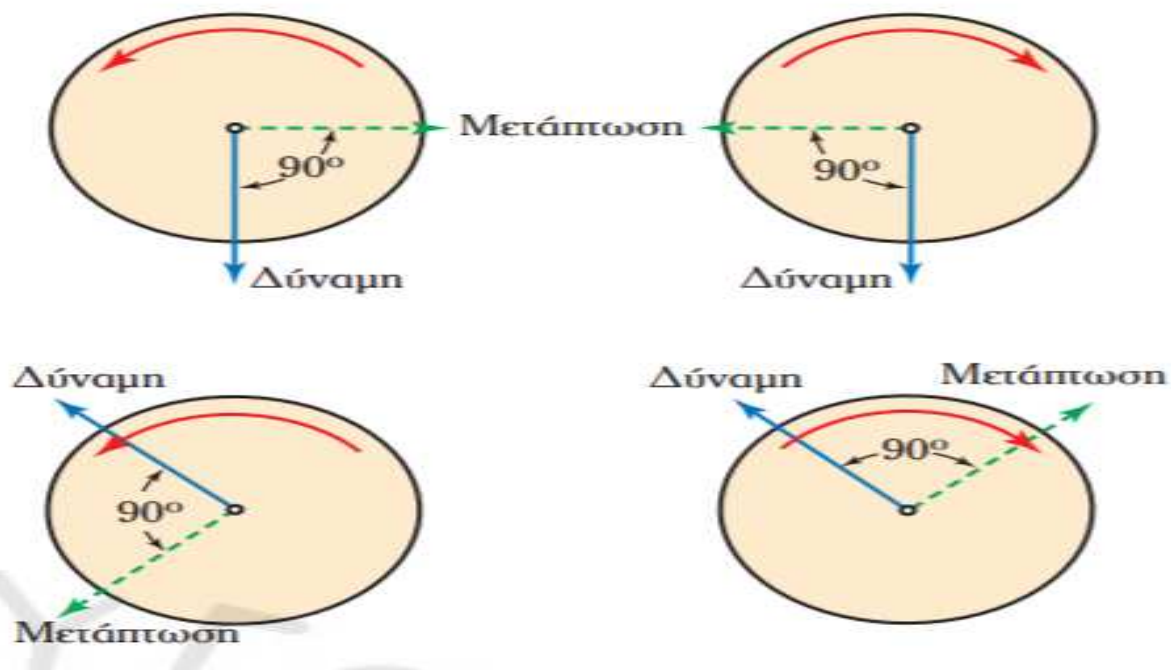
### 3) Το φαινόμενο της μεταπτώσεως.

Μια άλλη βασική ιδιότητα του γυροσκοπίου είναι η μετάπτωση (precession), σύμφωνα με την οποία αν εφαρμοστεί μια δύναμη ή ροπή στον άξονα περιστροφής του, τότε το σημείο του άξονα, στο οποίο εφαρμόζεται η δύναμη, κινείται (μεταπίπτει) σε διεύθυνση κάθετη στην εφαρμοζόμενη δύναμη και με φορά προς τη φορά περιστροφής του σφονδύλου. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, ένα περιστρεφόμενο ελεύθερο γυροσκόπιο κινείται κάθετα ως προς τις εξωτερικές δυνάμεις που του ασκούνται, για παράδειγμα μια παιδική σβούρα δεν ανατρέπεται όταν τη σπρώξουμε ελαφρά, αλλά, όπως φαίνεται και στο σχήμα, εκτρέπεται προς το πλάι.



Εικόνα 18 Επίδειξη της μεταπτώσεως.

Μπορούμε να προσδιορίσουμε τη διεύθυνση και τη φορά της μεταπτώσεως, αν στρέψουμε το διάνυσμα της εφαρμοζόμενης δυνάμεως κατά  $90^\circ$  προς τη φορά περιστροφής του σφονδύλου. Όσον αφορά στη γωνιακή ταχύτητα της μεταπτώσεως, είναι ευθέως ανάλογη προς την εφαρμοζόμενη δύναμη και αντιστρόφως ανάλογη προς την ταχύτητα περιστροφής, τη μάζα και τη διάμετρο του σφονδύλου. Γίνεται διάκριση μεταξύ δεξιόστροφου (clockwise) και αριστερόστροφου (anti-clockwise) γυροσκοπίου.

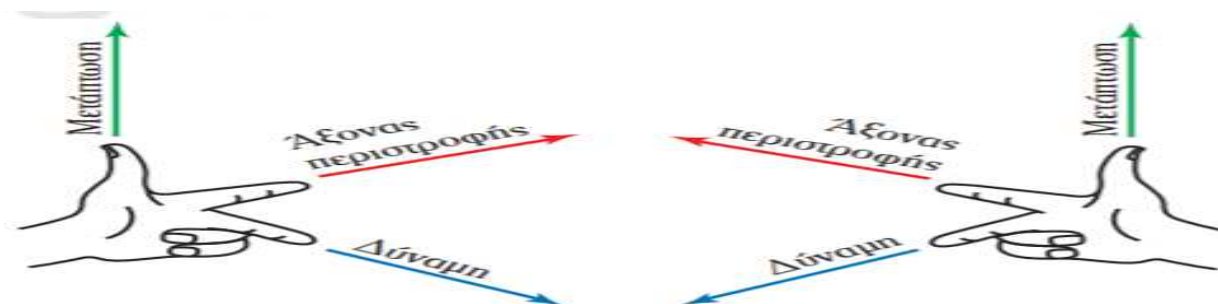


Εικόνα 19 Επίδειξη της μεταπτώσεως.

Από τον συνδυασμό των σχημάτων μπορούμε να καταλήξουμε σε έναν πρακτικό τρόπο ευρέσεως της διεύθυνσεως της μεταπτώσεως, τον γνωστό κανόνα των τριών δακτύλων, όπου το δεξί χέρι χρησιμοποιείται για τα δεξιόστροφα και το αριστερό για τα αριστερόστροφα γυροσκόπια.

Στο σχήμα παρακάτω, τοποθετούμε τον αντίχειρα, τον δείκτη και τον μέσο έτσι, ώστε να είναι κάθετοι μεταξύ τους. Στη συνέχεια:

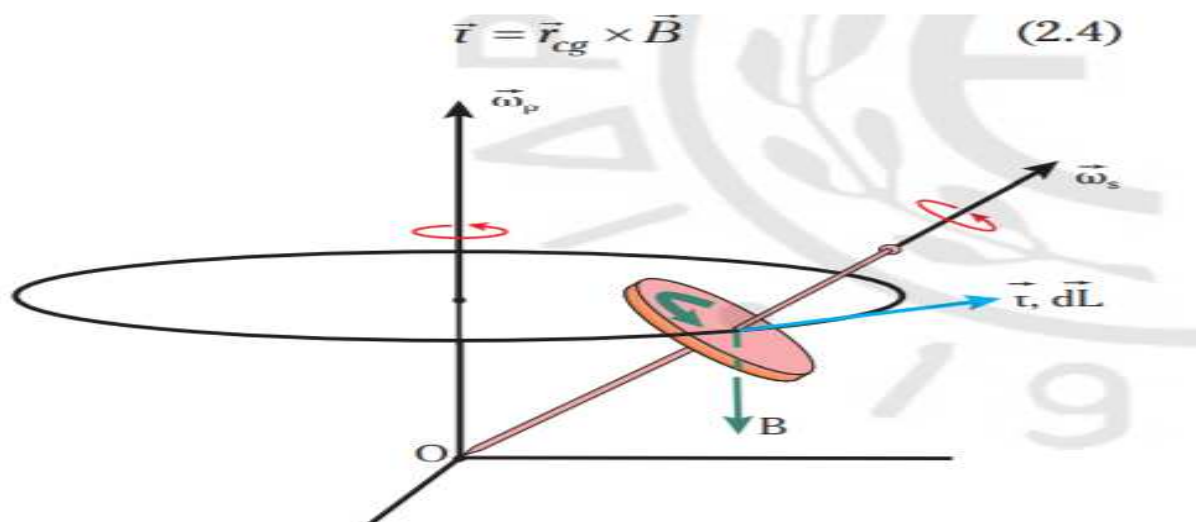
- 1) Φέρνουμε τον δείκτη παράλληλα προς την κατεύθυνση του άξονα περιστροφής του σφονδύλου, η οποία ταυτίζεται με τη διεύθυνση του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$ .
- 2) Φέρνουμε τον μέσο παράλληλα προς την εφαρμοζόμενη δύναμη.
- 3) Ο αντίχειρας θα μας υποδείξει τη διεύθυνση και τη φορά της μεταπτώσεως του σημείου του άξονα στον οποίο έχουμε εφαρμόσει τη δύναμη.



Εικόνα 20 Επίδειξη της μεταπτώσεως.

Η διεύθυνση της μεταπτώσεως μπορεί να προσδιοριστεί και με τον κανόνα του δεξιού χεριού (για τα δεξιόστροφα γυροσκοπία), όπως δείξαμε προηγουμένως, κλείνοντας τα δάκτυλα του δεξιού χεριού ώστε με αφετηρία το διάνυσμα του άξονα περιστροφής να συναντήσουμε το διάνυσμα της εφαρμοζόμενης δύναμης. Ο αντίχειρας θα μας υποδείξει και πάλι τη διεύθυνση και τη φορά της μεταπτώσεως.

Στη φυσική, ως γυροσκοπική μετάπτωση νοείται η ιδιότητα εκείνη του γυροσκοπίου, σύμφωνα με την οποία εάν ασκηθεί ροπή δυνάμεως στον σφόνδυλό του, τότε ο άξονάς του τίθεται και αυτός σε περιστροφική κίνηση (πέραν της περιστροφικής κινήσεως του σφονδύλου), διαγράφοντας κωνική επιφάνεια. Στο σχήμα διακρίνεται μία σβούρα (κατ' αντιστοιχία ο σφόνδυλος του γυροσκοπίου), η οποία υπόκειται στην επίδραση μίας σταθερής ροπής  $\tau$ , λόγω του βάρους της  $B$ , το οποίο εικονίζεται ως διάνυσμα με αφετηρία το κέντρο βάρους της σβούρας και φορά προς το δάπεδο. Αυτή η ροπή δυνάμεως ισούται με το εξωτερικό γινόμενο του διανύσματος θέσεως του κέντρου βάρους επί το βάρος της σβούρας:



Εμφανίζονται χαρακτηριστικά δύο διαφορετικά είδη περιστροφής, εκείνο της σβούρας γύρω από τον εαυτό της με γωνιακή ταχύτητα περιστροφής  $\vec{\omega}_s$  και εκείνο της περιστροφής του άξονα της. Ο άξονας της σβούρας περιστρέφεται και αυτός, διαγράφοντας κωνική επιφάνεια γύρω από άξονα κάθετο στο επίπεδο περιστροφής της, με γωνιακή ταχύτητα περιστροφής  $\vec{\omega}_p$ .

Εικόνα 21

Μελετώντας τη σχέση αυτή, κατανοούμε ότι για την κατασκευή ενός γυροσκοπίου ακρίβειας, η ελαχιστοποίηση της γωνιακής ταχύτητας μεταπτώσεως  $\dot{\delta} \approx G$  απαιτεί μικρό βάρος σφονδύλου, μικρό διά νυσμα θέσεως  $r_{cg}$  και μεγάλη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής  $\omega_s$  του σφονδύλου του γυροσκοπίου.

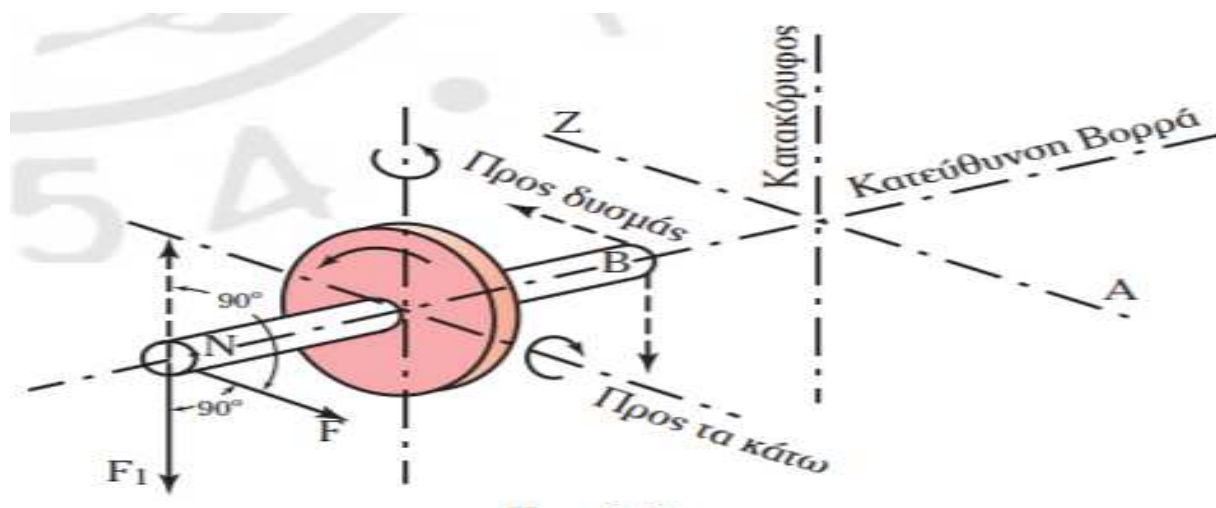
Συνοψίζοντας, όσον αφορά στη συμπεριφορά του γυροσκοπίου λόγω του φαινομένου της μεταπτώσεως συμπεραίνομε τα ακόλουθα:

- 1) Αν αποπειραθούμε να γείρομε ένα γυροσκόπιο, αυτό θα στραφεί κατά το οριζόντιο επίπεδο.
- 2) Αν προσπαθήσομε να το στρέψομε κατά το οριζόντιο επίπεδο, θα γείρει κατά το κατακόρυφο.
- 3) Η μεταπτωτική κίνηση προηγείται  $90^\circ$  της δυνάμεως, ακολουθώντας τη φορά περιστροφής του.
- 4) Το μέγεθος της κινήσεως είναι ανάλογο του μέτρου της εφαρμοζόμενης εξωτερικής δυνάμεως.

Πρέπει να τονιστεί ότι για τις ηλεκτρομηχανικές γυροσκοπικές πυξίδες που εξετάζονται στο επόμενο κεφάλαιο, η φορά περιστροφής του σφονδύλου του γυροσκοπίου προσδιορίζεται βλέποντας τον σφόνδυλο από το νότιο άκρο του άξονα περιστροφής. Ο κανόνας των τριών δακτύλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της διεύθυνσεως και της φοράς της δυνάμεως που πρέπει να εφαρμόσομε ώστε να προκαλέσομε συγκεκριμένη (ελεγχόμενη) μετάπτωση κατ' αντιστοιχία. Στην περίπτωση αυτή, το γυροσκόπιο παύει να είναι ελεύθερο και έχει μετατραπεί πλέον σε ελεγχόμενο. Δηλαδή, όπως θα αναλύσομε παρακάτω, στην κατασκευή μιας γυροπυξίδας, αυτό που μας ενδιαφέρει είναι ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου να γίνει –και να παραμείνει κατά τη λειτουργία της– παράλληλος προς τη διεύθυνση Βορρά/Νότου<sup>2</sup>. Ας υποθέσομε λοιπόν ότι έχομε τοποθετήσει έναν αριστερόστροφο σφόνδυλο με τον άξονα περιστροφής του οριζόντιο και προσανατολισμένο στην κατεύθυνση αυτή.

Μια οριζόντια δύναμη  $F$  που εφαρμόζεται στο νότιο άκρο του άξονα με τη φορά που φαίνεται στο σχήμα, προκαλεί κατακόρυφη μετάπτωσή του προς τα επάνω, ενώ το βόρειο άκρο μεταπίπτει με την ίδια ταχύτητα προς τα κάτω. Αν η με ίδιο μέτρο δύναμη  $F_1$  εφαρμοστεί στο νότιο άκρο του άξονα κατακόρυφα και με τη φορά του διανύσματος προς τα κάτω, τότε αυτό μεταπίπτει οριζόντια προς ανατολάς, ενώ ταυτόχρονα το βόρειο άκρο μεταπίπτει προς δυσμάς. Το συμπέρασμα είναι ότι: «η εφαρμογή δυνάμεως οποιασδήποτε κατευθύνσεως, προκαλεί αντίστοιχη μετάπτωση καθ' ύψος και κατ' αζιμούθ, ανάλογα με το μέτρο της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας της δυνάμεως αυτής». Αν οι δύο αυτές συνιστώσες δυνάμεις – οριζόντια και κατακόρυφη– υπολογιστούν κατάλληλα ώστε να προκαλούν αντίστοιχες μεταπτώσεις καθ' ύψος και κατ' αζιμούθ με αυτές που οφείλονται στην περιστροφή της  $\Gamma$ , τότε ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου θα διατηρείται συνεχώς ορθά προσανατολισμένος, δηλαδή παράλληλος στη διεύθυνση Βορράς/Νότος.





Εικόνα 22 Προσδιορισμός της μεταπτώσεως του άξονα γυροσκοπίου από την εφαρμογή δυνάμεως.

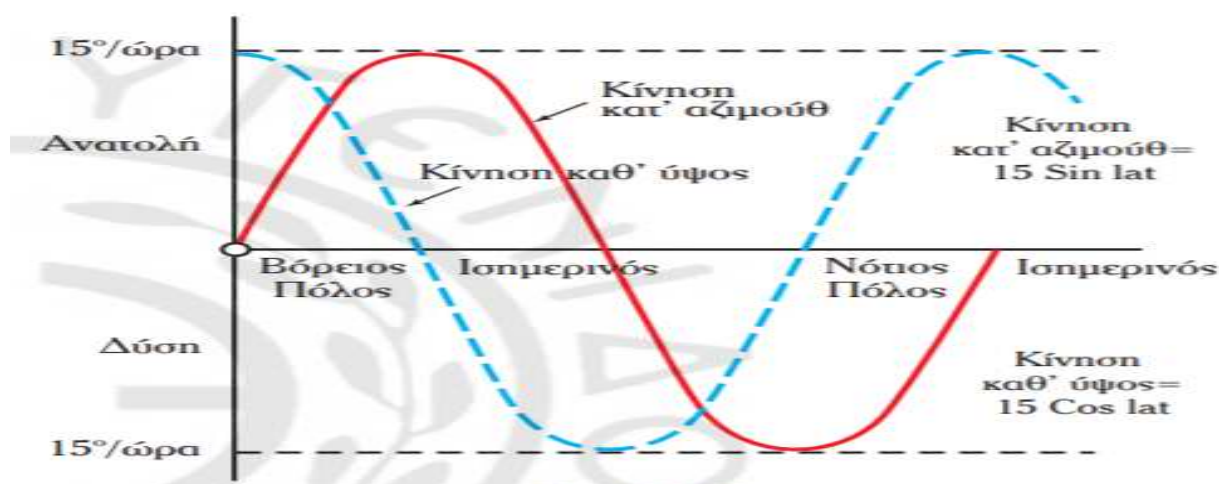
### 3.2.3 Συμπεριφορά του ελεύθερου γυροσκοπίου σε σχέση με το επίπεδο του ορίζοντα στα διάφορα πλάτη της Γης

Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε με σαφήνεια τις μεθόδους με τις οποίες είναι δυνατόν να μετατρέψουμε ένα ελεύθερο γυροσκόπιο σε αποτελεσματική γυροπυξίδα, πρέπει πρώτα να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του σε διάφορα πλάτη της Γης. Θα αποδείξουμε έτσι ότι το γυροσκόπιο δεν μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμο για χρήση στη ναυτιλία, χωρίς περαιτέρω διορθωτικές ενέργειες. Θεωρούμε ότι με τον κατάλληλο μηχανισμό εδράσεως έχουμε επιτύχει ελευθερία κινήσεως στους άξονες  $X$  και  $\Psi$ , ενώ αρχικά η επίδραση της βαρύτητας δεν λαμβάνεται υπόψη. Ας σημειωθεί ότι η Γη κινείται γύρω από τον άξονά της –με φορά από την Ανατολή προς τη Δύση– με γωνιακή ταχύτητα περιστροφής 15 μοίρες την ώρα, συμπληρώνοντας μία πλήρη περιστροφή στο γνωστό σε όλους μας 24ωρο. Στην περιστροφή της Γης οφείλεται η φαινόμενη κίνηση των απλανών αστέρων. Παρόμοιες κινήσεις μ' αυτές των απλανών αστέρων πραγματοποιεί στον χώρο ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου του ελεύθερου γυροσκοπίου, στα διάφορα πλάτη της Γης, κάτω από την επίδραση της γυροσκοπικής αδράνειας και των πραγματικών κινήσεων του ορίζοντα. Αυτή η φαινόμενη κίνηση ποικίλλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, γιατί το επίπεδο του ορίζοντα κάθε τόπου κινείται στον χώρο με τα εξής ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- 1) Καθ' ύψος (μεταβάλλει κλίση-Tilt) με γωνιακή ταχύτητα  $15 \cdot \text{Cos}(\varphi)$  ανά ώρα.
- 2) Κατ' αζιμούθ (στρέφει-Drift) με γωνιακή ταχύτητα  $15 \cdot \text{Sin}(\varphi)$  ανά ώρα, όπου  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος (latitude-lat) του συγκεκριμένου τόπου.

Στο σχήμα παρακάτω παρουσιάζονται οι συνιστώσες της κινήσεως του ελεύθερου γυροσκοπίου με τη βοήθεια της τριγωνομετρίας, ενώ παρακάτω θα παρουσιαστούν διάφορες ενδεικτικές

περιπτώσεις, ανάλογα με τη γεωγραφική θέση που είναι τοποθετημένος ο σφόνδυλος. Αυτό που μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα, είναι το πώς μεταβάλλεται στον χώρο λόγω της περιστροφής της Γης, η μεσημβρινή γραμμή κάθε τόπου (η διεύθυνση Βορρά/Νότου). Αυτή ορίζεται από την τομή του επιπέδου του ορίζοντα και του ουράνιου μεσημβρινού του τόπου, η οποία συμπίπτει με τη διεύθυνση Βορρά/Νότου. Η μεσημβρινή γραμμή πραγματοποιεί στον χώρο τις προαναφερθείσες κινήσεις λόγω της περιστροφής της Γης.

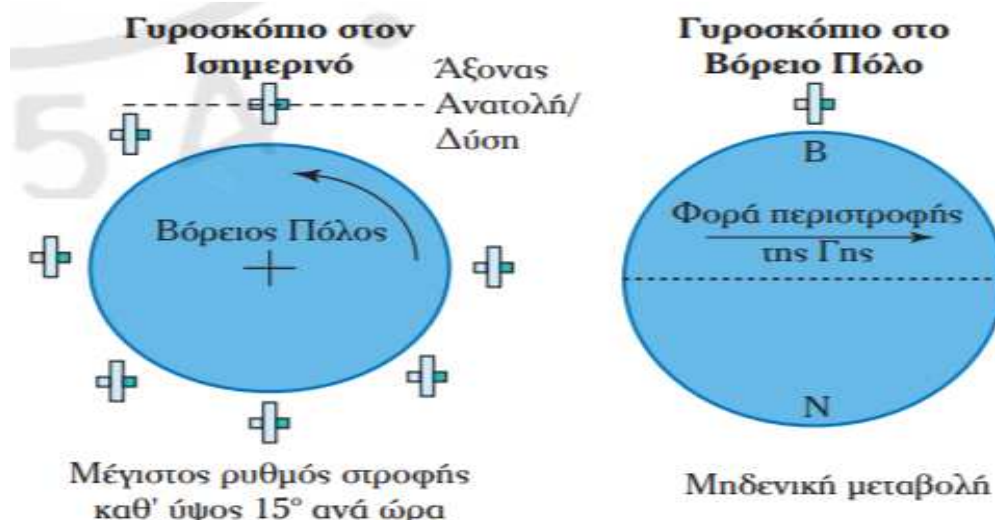


Εικόνα 23 Οι συνιστώσες της κινήσεως στο ελεύθερο γυροσκόπιο με τη βοήθεια της τριγωνομετρίας.

1) Επίδραση του πλάτους και της κατευθύνσε ως του άξονα στη φαινόμενη καθ' ύψος κίνηση του άξονα του γυροσκοπίου (Horizontal Earth Rate – HER).

Στο σχήμα εξετάζεται η περίπτωση ελεύθερου γυροσκοπίου που τοποθετείται στον Ισημερινό με τον άξονα περιστροφής του οριζόντιο κατά τη διεύθυνση Ανατολής/Δύσεως (Απηνλιώτης/Ζέφυρος), δηλαδή κάθετο στη μεσημβρινή γραμμή του τόπου ή αλλιώς κάθετο ως προς τον άξονα γύρω από τον οποίο κινείται καθ' ύψος το επίπεδο του ορίζοντα. Ο άξονας περιστροφής του γυροσφονδύλου μεταβάλλει μόνο την κλίση του σε σχέση με το επίπεδο του ορίζοντα, με γωνιακή ταχύτητα 15ο την ώρα. Διαγράφει έτσι σε 24 ώρες περιφέρεια κύκλου, το επίπεδο της οποίας είναι παράλληλο προς το επίπεδο του Ισημερινού και με φορά απ' την Ανατολή προς τη Δύση. Αν το ελεύθερο γυροσκόπιο τοποθετηθεί στον Βόρειο Πόλο της Γης με αντίστοιχο τρόπο, δηλαδή με τον άξονα του γυροσφονδύλου παράλληλο ως προς το επίπεδο του ορίζοντα, θα παρατηρήσομε ότι ο άξονας διατηρεί σταθερή τη διεύθυνσή του στον χώρο.





Εικόνα 24 Φαινόμενη καθ' ύψος κίνηση του άξονα του γυροσκοπίου

2) Επίδραση του πλάτους στη φαινόμενη καθ' αζιμούθ κίνηση του άξονα του γυροσκοπίου (Vertical Earth Rate –VER).

Στον Ισημερινό, το επίπεδο του οριζόντα κινείται μόνο καθ' ύψος (μεταβάλλει μόνο την κλίση του), γύρω από άξονα παράλληλο προς τον άξονα περιστροφής της Γης από Δύση προς Ανατολή και με γωνιακή ταχύτητα 15ο ανά ώρα. Διευκρινίζεται ότι η μεσημβρινή γραμμή στον Ισημερινό δεν μεταβάλλει τη διεύθυνσή της στον χώρο λόγω της περιστροφής της Γης, καθώς ο άξονας που προαναφέρθηκε συμπίπτει με τη μεσημβρινή αυτή γραμμή. Επομένως, αν το ελεύθερο γυροσκόπιο τοποθετηθεί στον Ισημερινό με τον άξονα περιστροφής του οριζόντιο και κατά την κατεύθυνση Βορρά-Νότου, ο άξονας θα διατηρήσει σταθερή τη διεύθυνσή του στον χώρο. Αν υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις μετατραπεί σε πυξίδα, θα διατηρηθεί η λειτουργία αυτή χωρίς περαιτέρω διορθωτικές ενέργειες. Αν το ελεύθερο γυροσκόπιο τοποθετηθεί στον Βόρειο Πόλο της Γης με αντίστοιχο τρόπο, θα διαπιστώσουμε ότι ο άξονας περιστροφής θα κινείται καθ' αζιμούθ από Ανατολάς προς Δυσμάς με γωνιακή ταχύτητα 15ο ανά ώρα και συμπληρώνοντας μία πλήρη περιστροφή σε 24 ώρες.



Εικόνα 25 Το αποτέλεσμα της συνδυασμένης επιδράσεως των δύο συνιστωσών της κινήσεως στα ενδιάμεσα πλάτη

Έχοντας ήδη παρουσιάσει τις συνιστώσες της κινήσεως του ελεύθερου γυροσκοπίου από την πλευρά της επιστήμης της φυσικής –καθώς και τις αντίστοιχες (απλοϊκές) μαθηματικές και τριγωνομετρικές εξισώσεις που προσδιορίζουν τελικά το μέτρο τους– είναι σχετικά απλή διαδικασία να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι αν τοποθετήσουμε μια κατασκευή ελεύθερου γυροσκοπίου σε ενδιάμεσο βόρειο ή νότιο πλάτος, ο άξονας περιστροφής του θα εκτελεί μεικτή κίνηση, κάτω από το συνδυασμένο αποτέλεσμα των δύο αυτών διαφορετικών επιδράσεων.

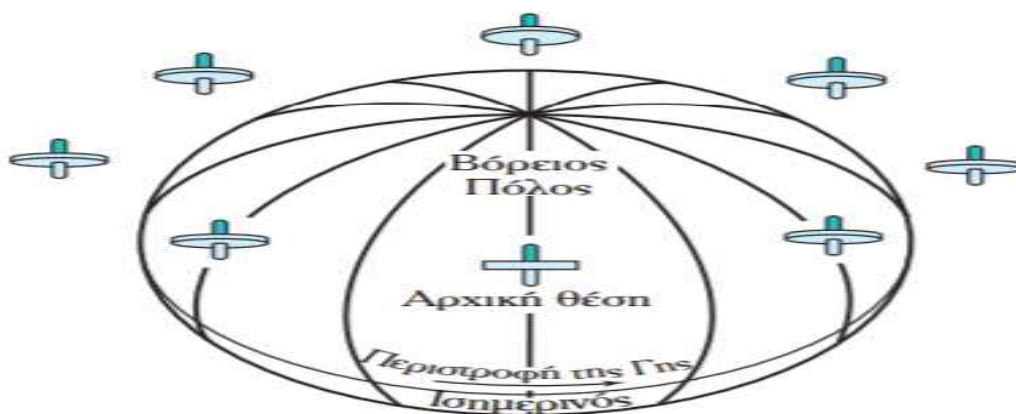
Συνοψίζοντας τα σχήματα, με προσανατολισμένο τον άξονα περιστροφής στις συ- γκεκριμένες κατευθύνσεις Βορράς/Νότος και Ανατολή/Δύση, μπορούμε να μηδενίσουμε την επίδραση της μίας από τις δύο συνιστώσες, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση έχουμε ταυτόχρονα και τις δύο επιδράσεις. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η κατεύθυνση της φαινόμενης κατ' αζιμούθ κινήσεως είναι πάντοτε προς ανατολάς –για το Βόρειο ημισφαίριο, ενώ για το Νότιο ισχύει ακριβώς το αντίθετο– εκτός αν ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον πόλο. Επίσης, η φαινόμενη κατ' ύψος κίνηση μπορεί κατά περίπτωση να είναι:

- 1) Προς τα επάνω, αν ο άξονας περιστροφής βρίσκεται ανατολικά του μεσημβρινού του τόπου.
- 2) Προς τα κάτω, αν ο άξονας περιστροφής βρίσκεται δυτικά του μεσημβρινού του τόπου.
- 3) Μηδενική, στην περίπτωση που με κάποιον τρόπο ο άξονας διατηρείται ακριβώς στον μεσημβρινό.

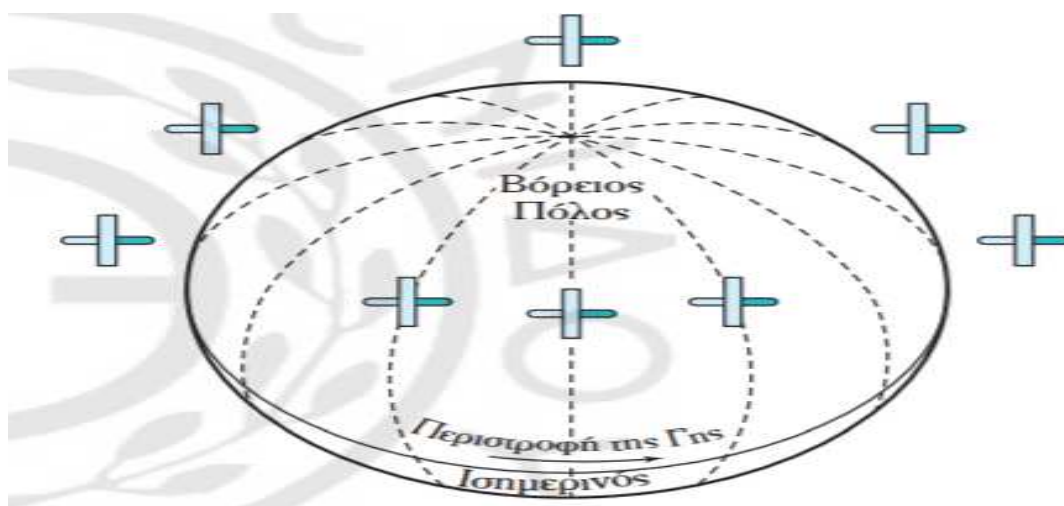
Με βάση τα προαναφερόμενα, διαπιστώνουμε ότι αν ο άξονας περιστροφής του ελεύθερου γυροσκοπίου βρεθεί σ' ένα ενδιάμεσο πλάτος, παράλληλος προς τη μεσημβρινή γραμμή, θα έχει τη φυσική τάση να αποπροσανατολιστεί. Καταλήγουμε έτσι στο συμπέρασμα ότι δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουμε το ελεύθερο γυροσκόπιο κατευθείαν για γυροπυξίδα, χωρίς την παρεμβολή καταλλήλων διορθωτικών μηχανισμών. Επισημαίνουμε ότι είναι εφικτό τεχνολογικά να χρησιμοποιήσουμε τη δύναμη της βαρύτητας, ώστε να αναγκάσουμε μια πυξίδα να αναζητεί τον αληθή (γεωγραφικό) Βορρά. Παράλληλα όμως, θα πρέπει να τοποθετηθούν κατάλληλοι μηχανισμοί (ελέγχου), ώστε ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου να προσανατολίζεται στον μεσημβρινό του τόπου που θα γίνει η εκκίνηση της πυξίδας, διατηρώντας την οριζοντιότητά του.



Εικόνα 26 Οι (διανυσματικές) συνιστώσες της κινήσεως στο ελεύθερο γυροσκόπιο.



Εικόνα 27 Βόρειο πλάτος, άξονας παράλληλος προς τη μεσημβρινή γραμμή.



Εικόνα 28 Βόρειο πλάτος, με τον άξονα τοποθετημένο στην κατεύθυνση Ανατολή-Δύση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο – ΤΟ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΟ ΜΕ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΦΩΤΟΣ ΣΕ ΔΑΚΤΥΛΙΟ (φωτογυροσκόπιο ή γυροσκόπιο laser)

### 4.1 Περιγραφή και ιδιότητες

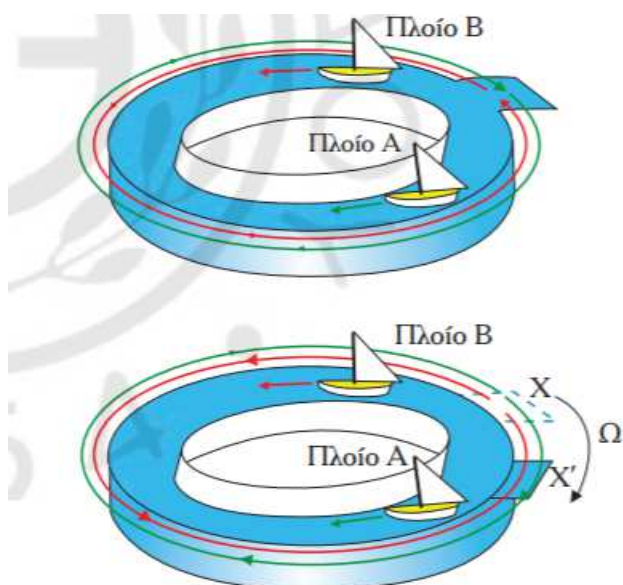
Η αλματώδης πρόοδος της τεχνολογίας καθιστά εφικτή την αξιοποίηση τεχνικών διατάξεων στα πλοία, οι οποίες ήταν αδύνατο να κατασκευαστούν χωρίς την ανάλογη ωρίμανση της επιστήμης της ηλεκτρονικής. Υπενθυμίζεται ότι τα ηλεκτρομηχανικά γυροσκόπια κατέστησαν τη μαγνητική πυξίδα επιλογή ήσσονος προτεραιότητας. Με τη σειρά τους, τα κλασικά γυροσκόπια οδηγούνται στη σταδιακή απόσυρση. Ήδη, από τη δεκαετία του '80, τα γυροσκόπια laser παρέχουν ενδείξεις προσανατολισμού εξαιρετικής ακρίβειας. Ταυτόχρονα παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, όπως η εξαιρετικά σημαντική ελάττωση του όγκου και του βάρους κατασκευής, η ελαχιστοποίηση των διαστάσεών τους σε σχέση με τα συμβατικά (ηλεκτρομηχανικά) γυροσκόπια και ο περιορισμός εμφανίσεως βλαβών. Επί πλέον, λόγω της υψηλής ακρίβειας ενδείξεων, οι μηχανισμοί αυτοί αποτελούν προσιλές λύσεις για ταχέως κινούμενους και ελισσόμενους φορείς (π.χ. ταχύπλοα πλοία, αερόπλοια, κατευθυνόμενα βλήματα), οι οποίοι απαιτούν εξοπλισμό υψηλών προδιαγραφών. Ταυτόχρονα όμως, η μείωση του κόστους με την πάροδο του χρόνου, επιτρέπει τον εξοπλισμό ακόμα και μικρών σκαφών με τις γυροπυξίδες laser λόγω των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων. Εκτός από την πλήρη απουσία κάθε μαγνητικής επιδράσεως –γεγονός που εξασφαλίζεται και από το κλασικό ηλεκτρο-μηχανικό γυροσκόπιο– ένα ακόμα πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας (φωτογυροσκόπιο) αποτελεί το γεγονός ότι το όργανο κατασκευάζεται χωρίς πολύπλοκα κινητά μέρη και επομένως δεν παρουσιάζει ροπές αντιστάσεως κατά την αλλαγή προσανατολισμού (δεν υφίστανται τριβές). Επομένως τα γυροσκόπια laser αποτελούν πλέον την προσιλότερη γυροπυξίδα για εγκατάσταση σε όλους τους τύπους πλοίων.



## 4.2 Αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία του γυροσκοπίου laser, σχετίζεται με το φαινόμενο Sagnac. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται σε δύο πανομοιότυπα κύματα φωτός, τα οποία αφού εξαναγκασθούν να διατρέξουν την περιφέρεια ενός «κυκλικού» δίσκου, επιστρέφουν στο σημείο (επάνω στον δίσκο) από το οποίο εκπέμφθηκαν. Όταν ο δίσκος δεν περιστρέφεται, τότε τα δύο κύματα διανύουν ακριβώς την ίδια απόσταση (το μήκος της περιφέρειας του δίσκου που ισούται με  $2\pi R$ ) στον ίδιο ακριβώς χρόνο:  $T = 2\pi R / C$  όπου:  $R$  η ακτίνα του κύκλου και  $C$  η ταχύτητα του φωτός. Όταν όμως ο δίσκος αυτός περιστρέφεται, τότε τα δύο κύματα φωτός επιστρέφουν στο σημείο από το οποίο εκπέμφθηκαν, έχοντας διανύσει διαφορετική απόσταση το πρώτο από το δεύτερο και σε διαφορετικό χρόνο. Στη συνέχεια και αφού αναλογισθούμε ότι το φως ουσιαστικά αποτελεί ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, διαπιστώνουμε την αντιστοιχία που υπάρχει ανάμεσα στη διαφορά διαδρομής, τη διαφορά χρόνου και τη συνεπακόλουθη διαφορά φάσεως μεταξύ των δύο κυμάτων φωτός. Στο γυροσκόπιο laser είναι εφικτό να μετρηθεί η προαναφερόμενη διαφορά φάσεως, η οποία αποτελεί, όπως θα δείξουμε στη συνέχεια, συνάρτηση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής  $\Omega$  του κυκλικού δίσκου. Μέσω της μετρήσεως της διαφοράς φάσεως, εξάγεται συνεπώς η μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του κυκλικού δίσκου  $\Omega$  (και κατ' επέκταση του πλοίου που στρέφει). Για την εκπομπή του κύματος φωτός χρησιμοποιείται συσκευή laser αντί μίας απλής φωτοδιόδου. Αυτό συμβαίνει διότι προκειμένου να υπολογιστεί διαφορά φάσεως σε κύμα φωτός απαιτείται εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια, η οποία προϋποθέτει κύμα φωτός με απόλυτα σταθερά χαρακτηριστικά πλάτους, συχνότητας και φάσεως. Οι συγκεκριμένες απαιτήσεις ακρίβειας ικανοποιούνται λοιπόν μόνο με τη χρήση συσκευής laser. Για να κατανοήσουμε τα παραπάνω, θεωρούμε στο σχήμα τον παραλληλισμό με δύο πλοία, τα οποία εισέρχονται σε μία κυκλική λεκάνη-δεξαμενή, από ένα άνοιγμα  $X$  και στη συνέχεια κινούνται με την ίδια ταχύτητα, το μεν πρώτο δεξιόστροφα (κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού), το δε δεύτερο αριστερόστροφα (κατά φορά αντίστροφη των δεικτών του ρολογιού), ώστε να επαναπλεύσουν στο σημείο  $X$ . Η ιδιομορφία της κυκλικής αυτής λεκάνης είναι ότι μπορεί να περιστρέφεται και η ίδια. Δηλαδή, το σημείο  $X$  μετακινείται και αυτό, μαζί με τη λεκάνη. Όταν η λεκάνη δεν περιστρέφεται, τότε τα δύο πλοία διανύουν ακριβώς την ίδια απόσταση  $2\pi R$  στον ίδιο χρόνο που δίδεται από τη σχέση. Εάν όμως η λεκάνη περιστραφεί προς τα δεξιά, τότε το πρώτο πλοίο (πλοίο A) θα διανύσει με γαλύτερη απόσταση για να επανέλθει στο σημείο  $X$ , αφού η λεκάνη και το σημείο απομακρύνονται από αυτό. Αντίθετα, το δεύτερο πλοίο (πλοίο B) που κινείται αντίθετα, θα διανύσει μικρότερη απόσταση για να επανέλθει στο σημείο  $X$ , διότι η λεκάνη και το σημείο κινούνται προς αυτό.





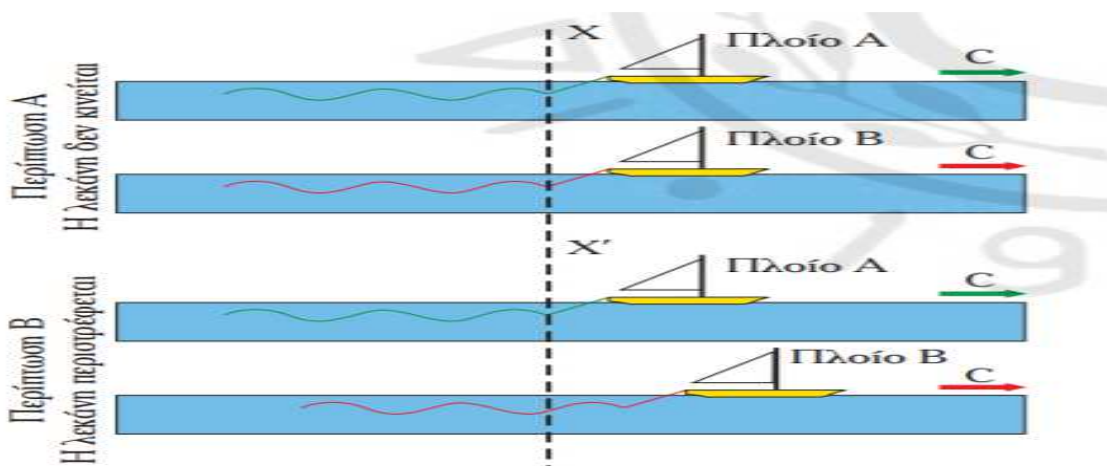
Έστω τώρα ότι καθένα από τα δύο πλοία μπορεί να παρασύρει από την πρύμνη του από έναν κάβο, στον οποίο προκαλεί και διατηρεί πανομοιότυπες ημιτονοειδείς ταλαντώσεις με το άλλο πλοίο, δηλαδή του ίδιου πλάτους, της ίδιας συχνότητας και της ίδιας φάσεως. Όταν τα δύο πλοία επιστρέφουν στο σημείο X, δεν παρατηρείται καμμία διαφορά στη φάση των κυμάτων, εάν η λεκάνη δεν έχει περιστραφεί.

Εικόνα 30 δύο πλοία που κινούνται με ίση ταχύτητα, αλλά με αντίθετη φορά σε κυκλική λεκάνη, η οποία μπορεί να περιστραφεί με γωνιακή ταχύτητα περιστροφής  $\Omega$ .

Στην αντίθετη περίπτωση όμως, και λόγω της διαφοράς διαδρομής στην οποία ταξιδεύει το κάθε πλοίο, ένας

παρατηρητής που βρίσκεται στο σημείο X, θα παρατηρήσει σε διαφορετική φάση το κύμα του κάβου του πλοίου A, από εκείνο του B. Αυτή η διαφορά φάσεως, εάν αναλυθεί, περιέχει την πληροφορία της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής  $\Omega$  της λεκάνης.

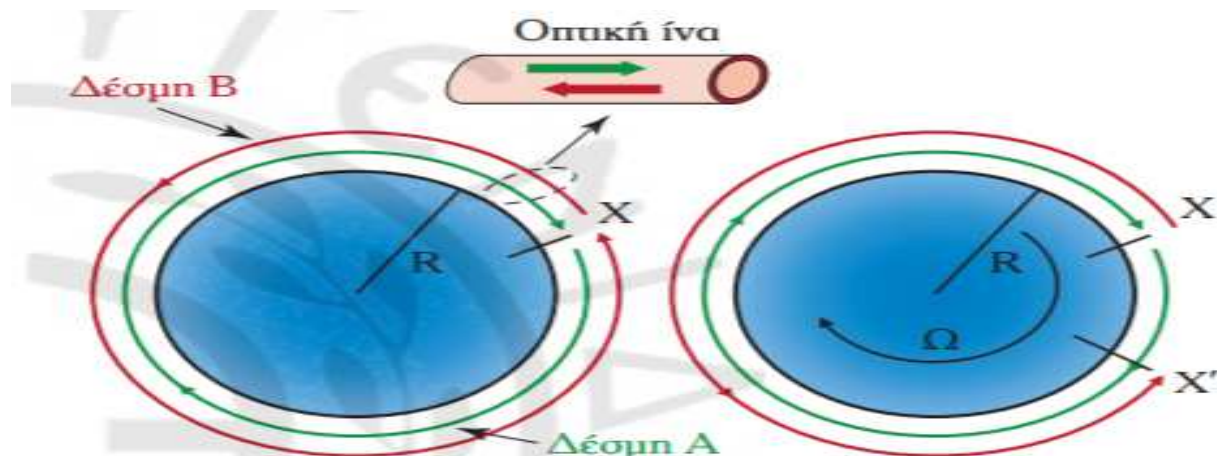
Κατ' αντιστοιχία με το προαναφερόμενο παράδειγμα, στο γυροσκόπιο laser, μία δέσμη κύματος φως διαχωρίζεται σε δύο πανομοιότυπες δέσμες. Οι δέσμες αυτές εξαναγκάζονται να ακολουθήσουν κυκλική τροχιά επί της περιφέρειας ενός δίσκου, πάνω στον οποίο είναι εγκατεστημένος όλος ο μηχανισμός του γυροσκοπίου.



Στην περίπτωση A δεν υφίσταται διαφορά φάσεως. Στη περίπτωση B, προηγείται το πλοίο B του πλοίου A και έτσι διαπιστώνεται διαφορά φάσεως στην κυμάτωση των κάβων.



Εικόνα 31 Διαφορά φάσεως μεταξύ της κυματώσεως των κάρβων των πλοίων, όταν η λεκάνη δεν κινείται και όταν περιστρέφεται.

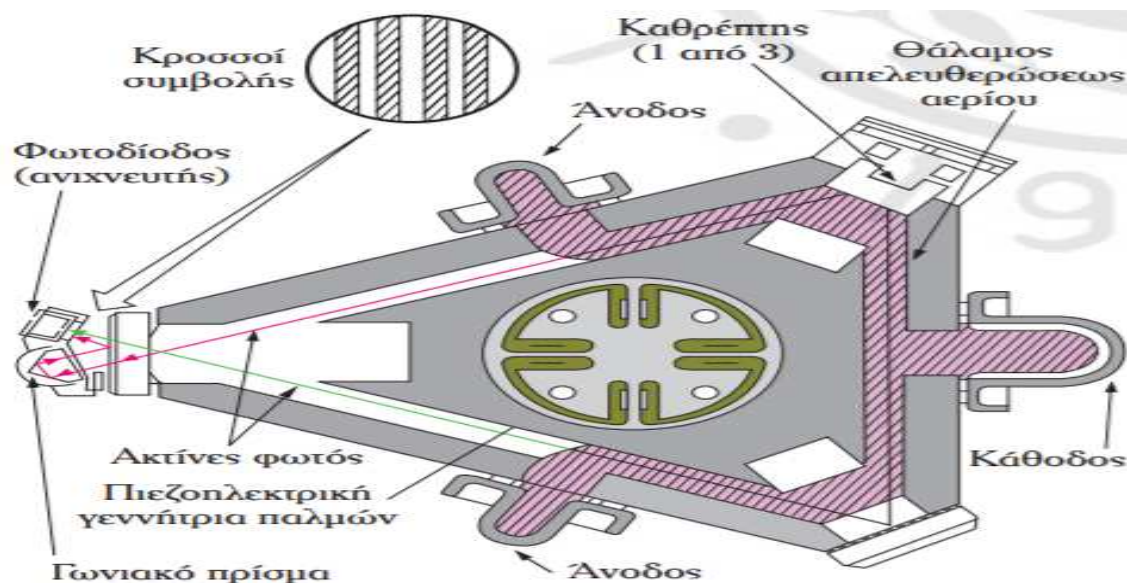


Δύο πανομοιότυπες δέσμες φωτός εξαναγκάζονται σε κυκλική τροχιά, κινούμενες μέσα σε οπτική ίνα επί κυκλικού δίσκου. Εάν ο δίσκος περιστραφεί, τότε κάθε δέσμη φωτός διανύει διαφορετική απόσταση και σε διαφορετικό χρόνο, ώστε να επανέλθει στο σημείο εισόδου, που τώρα βρίσκεται στη θέση X'.

Εικόνα 32 Διάταξη του γυροσκοπίου laser.

Ο πιο προσφιλής τρόπος «εξαναγκασμού», είναι η χρήση της οπτικής ίνας. Η οπτική ίνα ισοδυναμεί με τη «δεξαμενή», εντός της οποίας κινείται το φως με σταθερή ταχύτητα  $C$ . Παράλληλα, κινείται/περιστρέφεται και η δεξαμενή/αγωγός, χωρίς βέβαια να επηρεάζεται η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει το φως.

Στο σχήμα παρακάτω παρουσιάζεται ένας τύπος γυροσκοπίου εξαναγκασμένης εκπομπής φωτός (laser).



Εικόνα 33 Αναλυτική παρουσίαση του γυροσκοπίου με εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός.

Ένας μηχανισμός του τύπου αυτού αποτελείται από μια τριγωνική κοιλότητα που περιέχει ποσότητα αερίων ηλίου και νέου και παράγει δύο δέσμες (δύο ακτίνες laser) κινούμενες σε αντίθετες κατευθύνσεις ή μία από την άλλη. Η παραγωγή των ακτίνων φωτός λαμβάνει χώρα μέσα στην κοιλότητα του δακτυλίου. Η κοιλότητα αυτή γεμίζει με μείγμα αερίων ηλίου και νέου υπό χαμηλή πίεση, διά ιονισμού των αερίων από υψηλή τάση που εφαρμόζεται μεταξύ ανόδου και καθόδου. Οι δέσμες φωτός ενισχύονται μέσα στην κοιλότητα μέσω διαδοχικών ανακλάσεων στα κάτοπτρα που βρίσκονται σε κάθε κορυφή του τριγώνου. Το μήκος της τριγωνικής διαδρομής των δεσμών είναι με ακρίβεια ρυθμισμένο, ώστε να αποτελεί πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του παραγόμενου φωτός από την εκκένωση των αερίων (συντονισμένη κοιλότητα).

Όπως προαναφέρθηκε, όταν ο δακτύλιος μέσα στον οποίο διαδίδεται το φως είναι ακίνητος, οι συχνότητες από τις δύο αντιθέτως κινούμενες δέσμες είναι ίδιες. Όταν όμως ο δακτύλιος laser (άρα και το πλοίο) περιστραφεί γύρω από άξονα κάθετο στο επίπεδό του, τότε παράγεται μια διαφορά συχνότητας μεταξύ των δύο δεσμών φωτός. Μικρή ποσότητα φωτός από τις δύο δέσμες laser, περνάει μέσα από το ένα από τα τρία κάτοπτρα, το οποίο είναι ημιπερατό από το φως (ποσοστό λιγότερο του 0,2%). Οι συχνότητες από τις δύο δέσμες συνδυάζονται (συμβάλλουν) και παράγουν μια συχνότητα συμβολής, η οποία παρουσιάζεται με τη μορφή κροσσών συμβολής (fringe pattern). Όταν οι συχνότητες των δύο δεσμών φωτός διαφέρουν, δημιουργούνται κροσσοί συμβολής από διαδοχικές σκούρες και φωτεινές λωρίδες. Μία φωτοδίοδος (readout detector) «αισθάνεται» (δηλ. καταγράφει) τον βαθμό και την κατεύθυνση της κινήσεως των κροσσών συμβολής. Τα στοιχεία αυτά δείχνουν το μέγεθος και τη διεύθυνση της περιστροφής του δακτυλίου laser.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια πολύ χαμηλών ρυθμών περιστροφής (χαμηλών γωνιακών ταχυτήτων, δηλ. όταν για παράδειγμα διατηρούμε για μεγάλο χρονικό διάστημα την ίδια κατεύθυνση), παρατηρείται σύζευξη των δύο δεσμών φωτός, εξαιτίας της πολύ μικρής διαφοράς στις συχνότητές τους. Στην περίπτωση αυτή «κλειδώνουν» οι δύο συχνότητες σε μία συχνότητα λανθασμένης τιμής, κατά συνέπεια θα μπορούσε να πει κάποιος ότι το γυροσκόπιο μεταπίπτει σε ένα είδος «λήθαργου». Για την εξουδετέρωση του φαινομένου αυτού, τοποθετείται ένας κινητήρας ή μηχανισμός πιεζοηλεκτρικού τύπου στο κέντρο του δακτυλίου laser, με σκοπό να δονεί περιστροφικά το γυροσκόπιο, ούτως ώστε αυτό να βρίσκεται έξω από την περιοχή της συζεύξεως των δεσμών laser. Η συνολική έξοδος του συστήματος από τον περιστροφικό αυτό κραδασμό είναι μηδέν, ούτως ώστε να μην επηρεάζει την κανονική

λειτουργία του αισθητήρα. Η λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού αυτού κινητήρα γίνεται αντιληπτή σαν ένας πολύ απαλός βόμβος.

Συνοπτικά, οι γυροπυξίδες laser διαθέτουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις αντίστοιχες ηλεκτρομηχανικές:

- 1) Υψηλή ακρίβεια.
- 2) Αυξημένη σταθερότητα λειτουργίας σε συνάρτηση με τον χρόνο.
- 3) Αυξημένη σταθερότητα λειτουργίας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.
- 4) Μεγάλο μέσο χρόνο μεταξύ βλαβών.
- 5) Χαμηλή ευαισθησία σε περιβαλλοντικούς παράγοντες (κραδασμοί, δονήσεις, κλυδωνισμοί, επιταχύνσεις κ.λπ.).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

### ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΠΥΡΗΝΑ

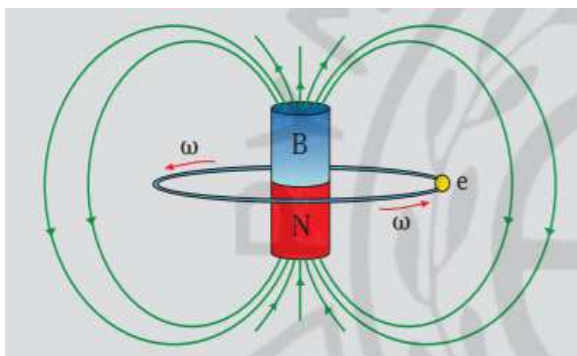
#### 5.1 Περιγραφή και ιδιότητες

Από τη μελέτη των μηχανισμών τόσο του ηλεκτρομηχανικού γυροσκοπίου, όσο και του γυροσκοπίου laser, εξάγεται το συμπέρασμα ότι όλοι οι αισθητήρες που προσδιορίζουν την κατεύθυνση ενός πλοίου προκύπτουν με βάση μια κοινή λογική. Σύμφωνα με τη λογική αυτή, ένα τμήμα εντός της συσκευής περιστρέφεται, με μια ιδιότητά του να παραμένει σταθερή. Όταν όμως περιστραφεί και το πλαίσιο εντός του οποίου βρίσκεται η συσκευή, η ιδιότητα αυτή μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την περιστροφή του πλαισίου. Η ανίχνευση της μεταβολής της ιδιότητας οδηγεί στην αποκάλυψη της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του.

Στην περίπτωση του γυροσκοπίου μαγνητικού συντονισμού πυρήνα, ο πυρήνας ενός περιστρεφόμενου ατόμου λειτουργεί ακριβώς όπως ο σφόνδυλος στο μηχανικό γυροσκόπιο. Εμφανίζοντας (λόγω της περιστροφής ηλεκτρικού φορτίου γύρω από άξονα) ιδιότητες μαγνήτη, διατηρείται με τη βοήθεια ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, προσανατολισμένος επί άξονος. Με κάθε περιστροφή του πλαισίου που περιβάλλει τη συσκευή, προκαλείται ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του περιστρεφόμενου πυρήνα και ενός πομπού ραδιοκυμάτων. Ο πυρήνας απορροφά αρχικά την ενέργεια των ραδιοκυμάτων, την οποία στη συνέχεια αποδίδει, λειτουργώντας ο ίδιος σαν πομπός ραδιοκυμάτων. Από την ανίχνευση της αποδιδόμενης ενέργειας, προκύπτει μετά και από κατάλληλη επεξεργασία σήματος η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου της συσκευής (άρα και του πλοίου).

#### 5.2 Αρχή λειτουργίας

Ξεκινώντας την επεξήγηση της αρχής λειτουργίας του γυροσκοπίου μαγνητικού συντονισμού πυρήνα, αναφερόμαστε στη σχετική αρχή της φυσικής που παρουσιάζεται στο σχήμα, η οποία αποκαλύπτει ότι ένα περιστρεφόμενο ηλεκτρικό φορτίο δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο.



Τα άτομα λοιπόν ορισμένων στοιχείων διαθέτουν την ιδιότητα να περιστρέφονται γύρω από τον εαυτό τους. Η περιστροφή αυτή αντιστοιχεί με την περιστροφή ηλεκτρικού φορτίου γύρω από άξονα και επομένως το άτομο συμπεριφέρεται σαν μαγνήτης με Βόρειο και Νότιο Πόλο. Το ίδιο συμβαίνει με όλα τα άτομα του υλικού που

Εικόνα 34 Σχηματική αναπαράσταση της δημιουργίας μαγνητικού πεδίου από την περιστροφή ηλεκτρικού φορτίου.

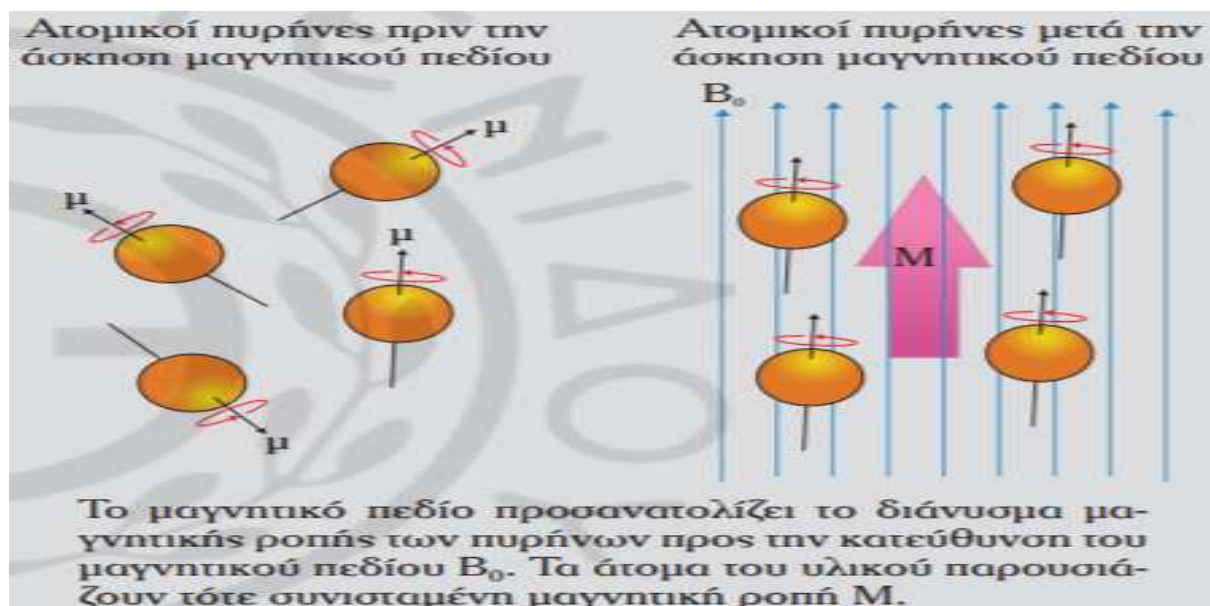
διαθέτουν την ιδιότητα της περιστροφής γύρω από τον εαυτό τους. Διαθέτουν ιδιότητες μαγνήτη, οι οποίες στη φυσική περιγράφονται με το διάνυσμα μαγνητικής ροπής  $\mu$ . Το διάνυσμα αυτό είναι προσανατολισμένο προς την κατεύθυνση του Βόρειου Πόλου του μαγνήτη και έχει μέτρο ανάλογο με το πόσο ισχυρός είναι ο μαγνητισμός του ατόμου.

Τα άτομα του υλικού όμως, είναι τυχαία προσανατολισμένα μέσα στο υλικό, δηλαδή η κατεύθυνση που υποδεικνύει ο βόρειος μαγνητικός πόλος του κάθε ατόμου είναι τυχαία. Η τοποθέτηση του υλικού εντός μαγνητικού πεδίου εντάσεως  $B_0$ , θα προσανατολίσει τα άτομα του υλικού-μαγνήτες κατά τρόπον τέτοιον, ώστε το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής τους  $\mu$  να ευθυγραμμιστεί με τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου  $B_0$ .

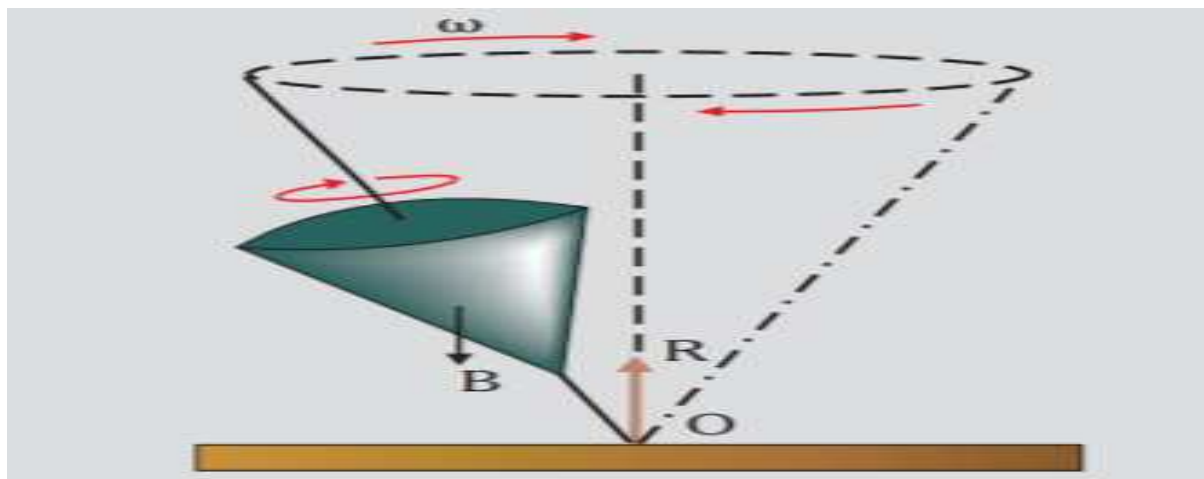
Το άτομο λοιπόν που περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του, αντιστοιχεί στον σφόνδυλο του γυροσκοπίου, ο οποίος περιστρέφεται με πολύ υψηλή ταχύτητα. Στη συνέχεια όμως, ο σφόνδυλος πρέπει να μεταπέσει σε κατά σταση μεταπτώσεως. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε το πώς θα γίνει αυτό. Για να κατανοήσουμε τις διαφορετικές δυνάμεις που ασκούνται στον ατομικό πυρήνα και οδηγούν στο φαινόμενο της μεταπτώσεως, θα χρησιμοποιήσουμε το ανάλογο παράδειγμα μίας σβούρας.

Η σβούρα αυτή περιστρεφόταν κατακόρυφα γύρω από τον άξονά της, ο οποίος ήταν κάθετος στο δάπεδο, ώσπου ασκήθηκε σ' αυτήν στιγμιαία μία δύναμη κάθετη στον άξονα περιστροφής της. Η δύναμη αυτή ήταν αρκετά μεγάλη, ώστε να εκτρέψει τον άξονα περιστροφής της σβούρας από τη θέση της κατακόρυφου στο δάπεδο, αλλά όχι τόσο μεγάλη, ώστε η σβούρα να διακόψει την περιστροφή της και να πέσει. Το αποτέλεσμα της ασκήσεως της δυνάμεως αυτής είναι να εκτραπεί ο άξονας της σβούρας από την κατακόρυφο στο δάπεδο και να εκτελεί περιστροφική κίνηση γύρω απ' αυτήν (την κατακόρυφο), όπως παρουσιάζεται στο σχήμα, διαγράφοντας την επιφάνεια ενός κώνου. Έχουμε δηλαδή δύο περιστροφικές κινήσεις. Μία της σβούρας γύρω από τον άξονά της και μία του άξονα της σβούρας γύρω από την κατακόρυφο στο δάπεδο. Η δεύτερη αυτή περιστροφή ονομάζεται μετάπτωση. Επειδή όμως η δύναμη  $F$  ασκείται στιγμιαία, το φαινόμενο της μεταπτώσεως φθίνει με την πάροδο του χρόνου. Δηλαδή, ο άξονας της σβούρας διαγράφει ολοένα κύκλους μικρότερης ακτίνας, μέχρι που τελικά ευθυγραμμίζεται και πάλι με την κατακόρυφο. Εάν όμως ασκούμε με κατάλληλο ρυθμό επαναλαμβανόμενα «σπρωξίματα» δυνάμεως  $F$  στη σβούρα, τότε μπορούμε να διατηρήσουμε επ' αόριστον το φαινόμενο της μεταπτώσεως.





Εικόνα 35 Ατομικοί πυρήνες πριν και μετά την επίδραση μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 36 Σβούρα σε κατάσταση μεταπτώσεως.

Επανερχόμενοι στο γυροσκόπιο μαγνητικού συντονισμού πυρήνα και σε πλήρη αναλογία με το παράδειγμα της σβούρας, διαπιστώνουμε ότι η επίδραση του μαγνητικού πεδίου  $B_0$  εξασφαλίζει την περιστροφή του πυρήνα (κατ' αντιστοιχία του σφονδύλου του γυροσκοπίου ή της σβούρας) γύρω από τον «κατακόρυφο» άξονα περιστροφής. Προκειμένου όμως να επιτευχθεί περαιτέρω και η μετάπτωση του ατομικού πυρήνα (δηλ. να τεθεί σε περιστροφή και ο ίδιος ο άξονας), πρέπει να βρεθεί ο κατάλληλος τρόπος της επαναλαμβανόμενης ασκήσεως του ισοδύναμου της δυνάμεως  $F$  στο παράδειγμα της σβούρας. Ο τρόπος αυτός δεν είναι άλλος από την εφαρμογή ενός δεύτερου μαγνητικού πεδίου  $B_1$ , κάθετου στο πρώτο.

Το σημαντικό εδώ είναι ότι τα χαρακτηριστικά του δεύτερου αυτού μαγνητικού πεδίου  $B_1$  δεν είναι οποιαδήποτε, αλλά συγκεκριμένα. Για να τεθεί ο πυρήνας του ατόμου σε κατάσταση



μεταπτώσεως, το μαγνητικό πεδίο  $B_1$  πρέπει να είναι ένας ραδιοπαλμός συχνότητας  $f_0$ , η οποία

$$f_0 = B_0 \cdot \frac{\gamma}{2\pi}$$

δίδεται από τη σχέση:

όπου  $\gamma$  μία παράμετρος, η οποία ονομάζεται γυρομαγνητικός λόγος.

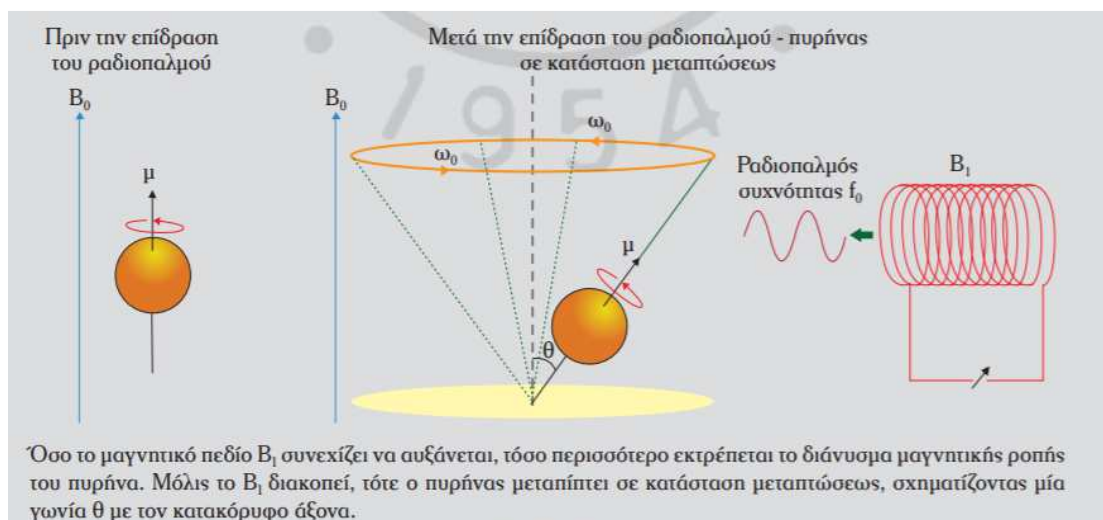
Ο γυρομαγνητικός λόγος είναι μία σταθερά που χαρακτηρίζει τον πυρήνα του ατόμου κάθε στοιχείου. Για το άτομο του υδρογόνου, η σταθερά αυτή ισούται με  $\gamma = 2,675 \cdot 10^8 \text{ sec}^{-1} \text{ Tesla}^{-1}$ . Έτσι, για μαγνητικό πεδίο  $B_0 = 1 \text{ Tesla}$ , λαμβάνομε συχνότητα μεταπτώσεως

$$f_0 = B_0 \cdot \frac{\gamma}{2\pi} = 1 \cdot \frac{2,675 \cdot 10^8}{2\pi} = 42,574 \text{ MHz.}$$

Η χρήση ραδιοπαλμού συχνότητας  $f_0$  θέτει τον πυρήνα σε κατάσταση μεταπτώσεως, της οποίας η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής είναι ακριβώς ίδια με τη γωνιακή συχνότητα του ραδιοπαλμού,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ .

Αυτό που συμβαίνει στην πράξη είναι ότι ο πυρήνας- στοιχειώδης μαγνήτης εκτρέπεται από την κατακόρυφο, διότι προσλαμβάνει ενέργεια από τον ραδιοπαλμό. Όσο περισσότερο ασκείται το μαγνητικό πεδίο-ραδιοπαλμός  $B_1$ , τόσο αυξάνεται η γωνία  $\theta$  μεταξύ της κατακόρυφου και του άξονα περιστροφής του μαγνητικού πυρήνα. Στη συνέχεια και αφού το εγκάρσιο μαγνητικό πεδίο  $B_1$  διακοπεί, το φαινόμενο της μεταπτώσεως θα φθίνει με την πάροδο του χρόνου. Το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής του πυρήνα (που ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής του), θα διαγράφει κύκλους ολοένα και μικρότερης ακτίνας, μέχρι που τελικά θα ευθυγραμμιστεί και πάλι με την κατακόρυφο. Το σημαντικό στη λειτουργία της συσκευής είναι ότι κατά τη φάση αυτή της επανόδου του άξονα περιστροφής του πυρήνα στην αρχική του θέση, ο πυρήνας αποδίδει την ενέργεια που προηγουμένως προσέλαβε, εκπέμποντας ένα σήμα ραδιοσυχνότητας και πάλι  $f_0$  (γωνιακής συχνότητας  $\omega_0=2\pi f_0$ ). Το σήμα αυτό ανιχνεύεται από τη συσκευή και μετριέται η συχνότητά του. Διότι ισχύει ότι εάν το πλαίσιο επί του οποίου βρίσκεται τοποθετημένη η συσκευή (άρα και το πλοίο) περιστραφεί με γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$ , τότε η γωνιακή συχνότητα του ραδιοκύματος που εκπέμπεται από τον πυρήνα δεν ισούται πλέον με  $\omega_0$ ,

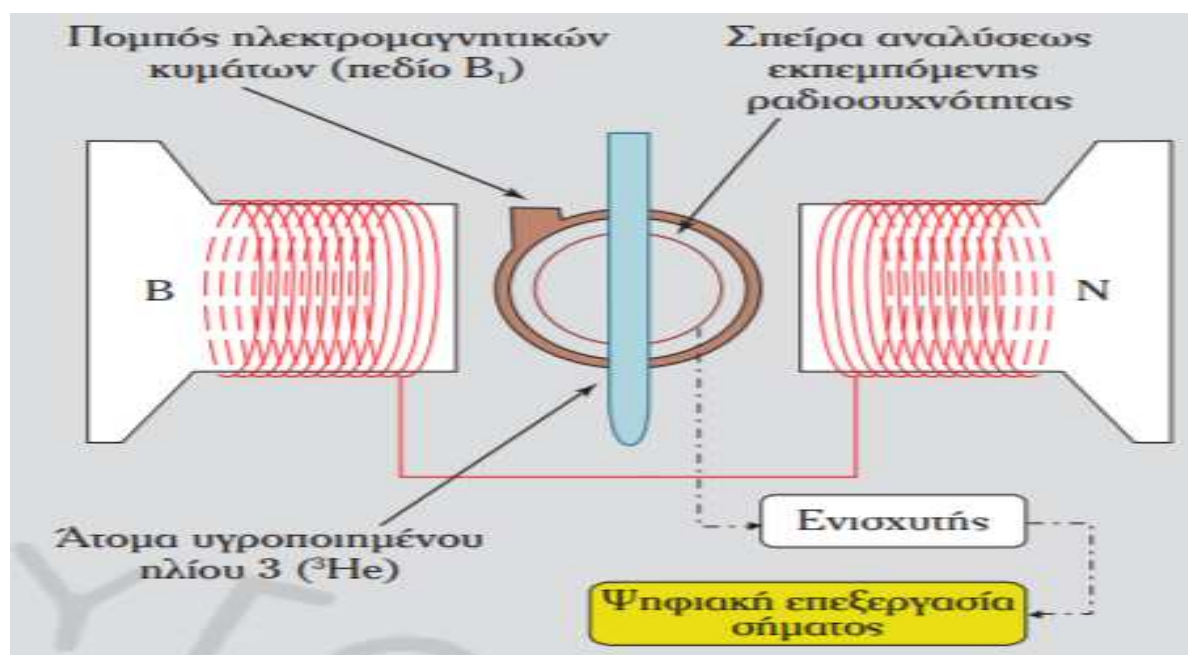
αλλά με:  $\omega_{obs} = \omega_0 \pm \Omega$ .



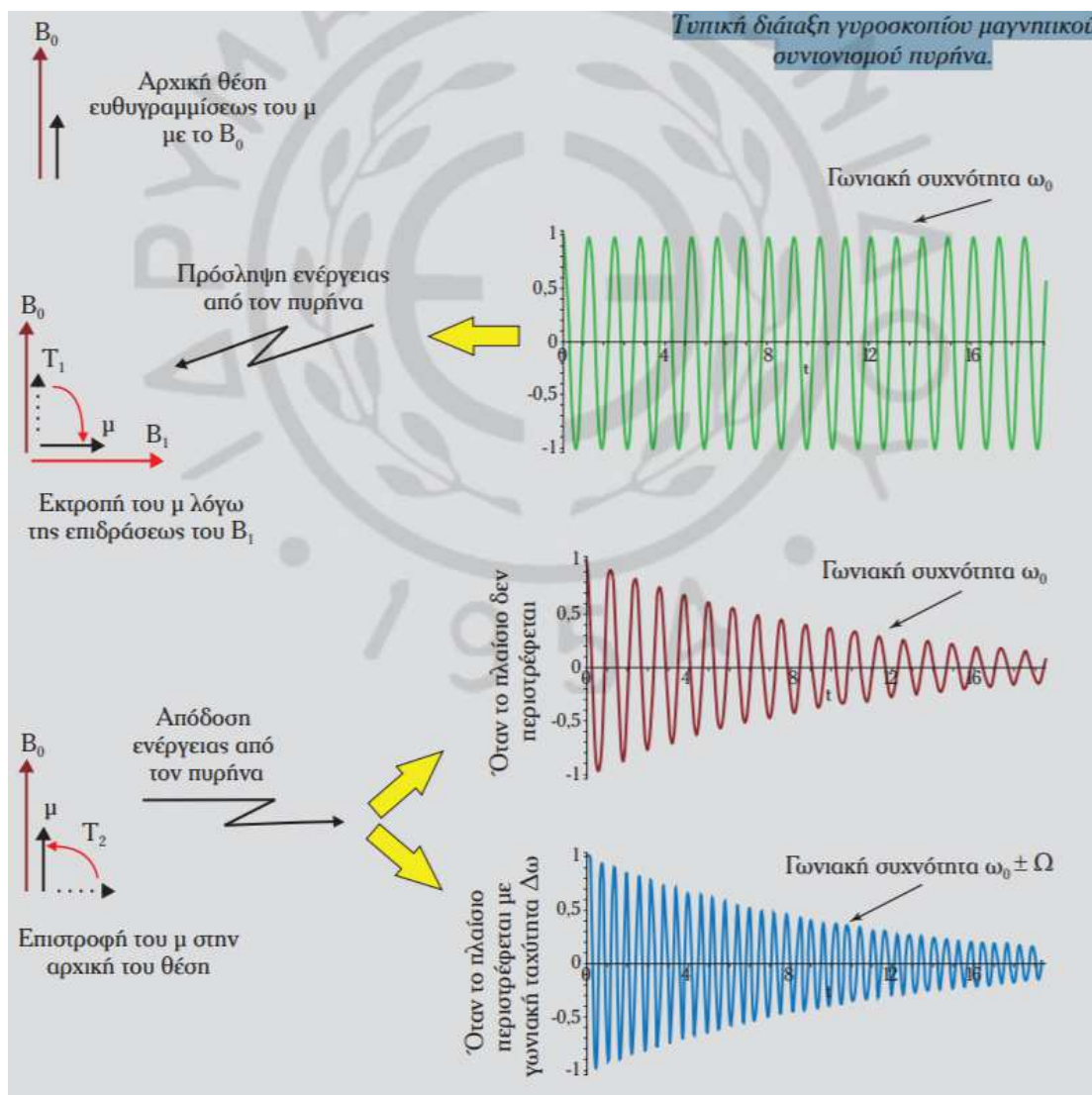
Εικόνα 37 Με την εφαρμογή του δεύτερου μαγνητικού πεδίου  $B_1$ , το διάνυσμα μαγνητικής ροπής του πυρήνα  $\mu$  (ο άξονας περιστροφής του), εκτρέπεται της κατακόρυφου.

Επομένως, γνωρίζοντας τη συχνότητα του ραδιοκύματος που εκπέμφθηκε και συγκρίνοντάς την με την αντίστοιχη που λαμβάνεται, προκύπτει η  $\Omega$ . Στον επόμενο κύκλο λειτουργίας της συσκευής, το μαγνητικό πεδίο  $B_1$  θα φέρει και πάλι τον πυρήνα σε κατάσταση μεταπτώσεως προσδίδοντάς του ενέργεια, στη συνέχεια θα διακοπεί ώστε ο πυρήνας να επανέλθει στην κατακόρυφη θέση αποδίδοντας ενέργεια, θα μετρηθεί και πάλι η γωνιακή συχνότητα του εκπεμπόμενου από τον πυρήνα σήματος κ.ο.κ..

Η τυπική διάταξη ενός σύγχρονου γυροσκοπίου μαγνητικού συντονισμού πυρήνα παρουσιάζεται στο σχήμα παρακάτω.



Εικόνα 38 Τυπική διάταξη γυροσκοπίου μαγνητικού συντονισμού πυρήνα.



Εικόνα 39 Φάσεις λειτουργίας γυροσκοπίου μαγνητικού συντονισμού πυρήνα.

Επιπλέον, απεικονίζονται οι διάφορες φάσεις της λειτουργίας του γυροσκοπίου μαγνητικού συντονισμού πυρήνα. Αρχικά και πριν την επίδραση του ραδιοπαλμού, τα διανύσματα του μαγνητικού πεδίου  $B_0$  και της μαγνητικής ροπής  $\mu$  είναι παράλληλα μεταξύ τους. Στη συνέχεια, με την επίδραση του δεύτερου μαγνητικού πεδίου  $B_1$ , που εκπέμπεται κάθετα στο πεδίο  $B_0$  με τη μορφή ραδιοπαλμού, το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής  $\mu$  του πυρήνα εκτρέπεται της κατακόρυφου. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται εκτροπή της τάξεως των  $90^\circ$ . Ο χρόνος  $T_1$  αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που απαιτείται, ώστε να γίνει αυτή η εκτροπή. Κατά το χρονικό αυτό διάστημα ο πυρήνας προσλαμβάνει ενέργεια από τον ραδιοπαλμό.

Με τη διακοπή του ραδιοπαλμού, ο πυρήνας τίθεται σε κατάσταση μεταπτώσεως. Η μετάπτωση αυτή είναι φθίνουσας μορφής, ώστε προοδευτικά και σε χρόνο  $T_2$  το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής να επιστρέφει στην αρχική του θέση. Κατά τον χρόνο αυτόν ο πυρήνας αποδίδει την ενέργεια που προηγουμένως προσέλαβε, μέσω εκπεμπόμενου ραδιοπαλμού. Διακρίνονται δύο

περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, ο εκπεμπόμενος από τον πυρήνα ραδιοπαλμός έχει ακριβώς την ίδια γωνιακή συχνότητα  $\omega_0$  με τον ραδιοπαλμό του πεδίου B1. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στην κατάσταση, κατά την οποία το πλαίσιο της συσκευής δεν περιστρέφεται (το πλοίο δεν αλλάζει πορεία). Κατά τη δεύτερη περίπτωση, ο εκπεμπόμενος από τον πυρήνα ραδιοπαλμός διαφέρει από εκείνον του πεδίου B1 κατά  $\Omega$ , δηλ. ισούται με  $\omega_0 \pm \Omega$ . Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στην κατάσταση κατά την οποία το πλαίσιο της συσκευής περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα περιστροφής  $\Omega$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο – Η ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΠΥΞΙΔΑ

### 6.1 Γενικά χαρακτηριστικά μαγνητικής πυξίδας

Όπως είναι γνωστό, η αρχή λειτουργίας της μαγνητικής πυξίδας βασίζεται στο ότι μία βελόνα, κατασκευασμένη από κατάλληλο σιδηρομαγνητικό υλικό και αναρτημένη από μία κλωστή, προσανατολίζεται παράλληλα με τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου της Γης στην περιοχή που βρίσκεται και ηρεμεί με κατεύθυνση τον μαγνητικό μεσημβρινό του τόπου. Κατ' αυτήν την έννοια, η μαγνητική πυξίδα ευθυγραμμίζεται στην κατεύθυνση του μαγνητικού Βορρά/Νότου. Είναι εξακριβωμένο ότι οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν ήδη την μαγνητική πυξίδα απ' τα μέσα του 7ου αιώνα π.Χ.. Απ' αυτούς την έμαθαν κατά σειρά οι Πέρσες, οι Άραβες και οι Ευρωπαίοι μέσω των εμπορικών συναλλαγών (περί τον 12ο αι. μ.Χ.). Είναι ακόμη σαφές ότι οι πρώτες ναυτικές πυξίδες ήταν ιδιαίτερα απλές στην κατασκευή: αποτελούνταν από μία μαγνητισμένη βελόνα, η οποία ήταν στερεωμένη σε ξύλινη σχίζα (σκλήθρα), που επέπλεε στο νερό μέσα σε μία λεκάνη. Αργότερα, η βελόνα προσαρμόστηκε σ' έναν οβελίσκο στερεωμένο στη βάση ενός δοχείου. Η απλότητα της μαγνητικής πυξίδας αποτελεί διαχρονικά το αποφασιστικό πλεονέκτημά της. Παρά τα πολλαπλά πλεονεκτήματα της γυροσκοπικής πυξίδας, η μαγνητική πυξίδα εξακολουθεί να αποτελεί μέρος του απαραίτητου εξοπλισμού για όλα τα πλοία για τους κάτωθι λόγους:

1) Η λειτουργία της δεν αποτελεί συνάρτηση της διαθεσιμότητας ηλεκτρικής ισχύος στο πλοίο. Μάλιστα, η μαγνητική πυξίδα θα σταματήσει να λειτουργεί μόνον εάν προκύψει φυσική καταστροφή του μηχανισμού της.

2) Εμφανίζει σπάνια βλάβες, ακόμα και υπό ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες πλου.

3) Αποτελεί κατασκευή απλή και μικρού κόστους σε ό,τι αφορά τόσο στο κόστος προκτήσεως, όσο και στο κόστος συντηρήσεως. Ανεξάρτητα από τα παραπάνω, κάθε γυροσκοπική πυξίδα υπερτερεί έναντι της μαγνητικής σε τρία καίρια σημεία:

1) Στην ακρίβεια της ενδείξεως πορείας.

2) Στην εξαγωγή του ρυθμού στροφής του πλοίου. Είναι δε εφικτή η μέτρηση της μεταβολής και των τριών γωνιών που συσχετίζονται με το σύστημα αξόνων καταγραφής της κινήσεώς του.

3) Στην κατευθείαν υπόδειξη του αληθούς Βορρά, αντί του μαγνητικού.

Η τεχνολογική πρόοδος συνέβαλε στην εμφάνιση δύο βασικών ειδών βελτιώσεων στις παραδοσιακές μαγνητικές πυξίδες, οι οποίες είναι:

1) Οι μηχανικές βελτιώσεις. Ειδικότερα:

α) Στον μηχανισμό αναρτήσεως (cardan), ώστε να τηρείται σε οριζόντια θέση.

β) Στην τεχνολογία της λεκάνης και του υγρού αποσβέσεως, για την βέλτιστη απόσβεση των κραδασμών που δημιουργούνται κατά τον πλου.

γ) Στις διατάξεις αντισταθμίσεως των μεταλλικών κατασκευών, απαίτηση η οποία προέκυψε μετά την εμφάνιση των μεταλλικών πλοίων στην ναυτιλία.

δ) Στο σύστημα εξουδετερώσεως συστολής/διαστολής, το οποίο χρησιμεύει ώστε να διατηρεί τη λεκάνη πάντοτε πλήρη, ανεξάρτητα της διαστολής ή συστολής, στην οποία υπόκειται το υγρό αποσβέσεως, λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας.

ε) Στην κατά το δυνατόν ελάττωση των διαστάσεων και του βάρους της χωρίς να διαταράσσεται η ακρίβεια των ενδείξεών της, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πολύ μικρά σκάφη.

2) Ηλεκτρονικές βελτιώσεις. Αυτές δεν αφορούν στην ίδια την πυξίδα, αλλά στη δυνατότητα περαιτέρω αξιοποιήσεως της παρεχόμενης πληροφορίας κατευθύνσεως με την χρήση κατάλληλης διατάξεως πηνίων, η οποία μετρώντας την ταχύτητα και τη φορά περιστροφής της λεκάνης, μετατρέπει την ένδειξη της πορείας σε κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα. Στη συνέχεια, το σήμα αυτο μετατρέπεται από αναλογικό σε ψηφιακό, με τη βοήθεια κατάλληλου μετατροπέα (βλ. Transmitting Magnetic Compass with Fluxgate στην αγγλική γλώσσα). Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται παράλληλα και διασύνδεση της μαγνητικής πυξίδας με τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά όργανα και συστήματα του σκάφους.

Η επικράτηση της όποιας τεχνολογικής καινοτομίας λειτουργεί άλλοτε συμπληρωματικά και άλλοτε ανατρεπτικά. Σε κάθε περίπτωση, η εκτίμηση του βαθμού επικρατήσεως της καινοτομίας, θα πρέπει να λάβει υπόψη της τους παράγοντες της ακρίβειας, του κόστους, της ευκολίας συντηρήσεως, της διαθεσιμότητας, της ευχρηστίας, της φιλικότητας προς τον χρήστη, της αντοχής σε βλάβες και της αντοχής σε καταπονήσεις.





Οπίσθια όψη σύγχρονης μαγνητικής πυξίδας με διάταξη αντισταθμίσεως του μόνιμου μαγνητισμού. Στο μέσον διακρίνεται θύρα επισκεψιμότητας για τη διευκόλυνση επισκευών-συντηρήσεως.

Μαγνητική πυξίδα παλαιότερης γενιάς με διάταξη αντισταθμίσεως του μόνιμου μαγνητισμού.



Εικόνα 40 Μαγνητικές πυξίδες με διάταξη αντισταθμίσεως του μόνιμου μαγνητισμού

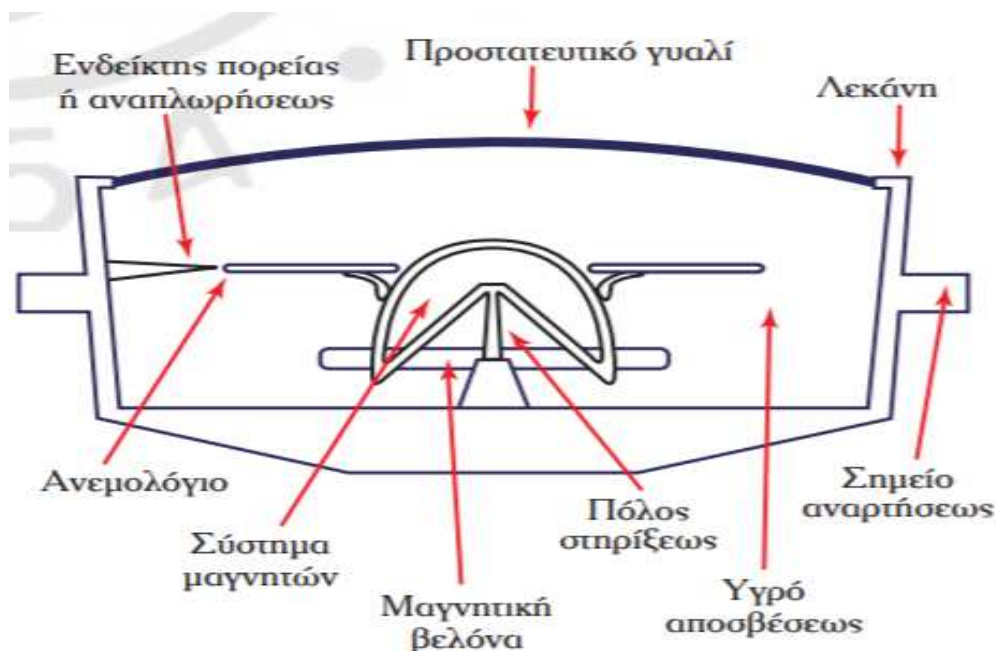


Εικόνα 41 Σύγχρονη μαγνητική πυξίδα για χρήση σε μικρά σκάφη.

## 6.2 Σύγχρονες μαγνητικές πυξίδες

Τα κύρια μέρη μιας τυπικής μαγνητικής πυξίδας είναι τα εξής:

- 1) Το σύστημα μαγνητών, που μέσω της επιδράσεως του μαγνητικού πεδίου της Γης δημιουργούν την ιθύνουσα δύναμη της πυξίδας.
- 2) Το ανεμολόγιο, το οποίο είναι τοποθετημένο επί των μαγνητών και έχει υποδιαίρεσεις σε μοίρες από 000ο (στο Βορρά) έως 360ο κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, και
- 3) η λεκάνη, η οποία περιλαμβάνει:
  - α) Τον πόλο στηρίξεως του συστήματος των μαγνητών.
  - β) Το υγρό αποσβέσεως.
  - γ) Τον ενδείκτη πορείας ή αναπλωρήσεως, ο οποίος δείχνει τη διεύθυνση της πλώρης του πλοίου.
  - δ) Τον πλωτήρα, που είναι ένας μικρός αεροθάλαμος, ο οποίος ελαττώνει ακόμα περισσότερο το βάρος του συστήματος των μαγνητών.
  - ε) Το σύστημα εξουδετερώσεως συστολής-διαστολής.



Εικόνα 42 Διάγραμμα αρχιτεκτονικής κατασκευής μαγνητικής πυξίδας νεότερης γενιάς.

Η λεκάνη είναι κατασκευασμένη από κατάλληλο (αμαγνήτιστο) υλικό και διαθέτει αρκετό βάρος, ώστε να διατηρείται σε οριζόντια θέση όταν το πλοίο λαμβάνει κλίσεις. Προκειμένου να εξασφαλίζεται η οριζόντια θέση της και παράλληλα να επιτυγχάνεται η ελευθερία κινήσεώς της σε όλους τους άξονες, η λεκάνη στηρίζεται σε ένα σύστημα δακτυλίων. Το υγρό αποσβέσεως

έχει ως σκοπό την ελάττωση του βάρους του συστήματος των μαγνητών (και επομένως την ελάττωση της τριβής στον πόλο περιστροφής), καθώς και τη μείωση των ταλαντώσεων του ανεμολογίου. Στην πλειονότητα των νεότερων μαγνητικών πυξίδων, χρησιμοποιείται ένα ειδικό λάδι που ονομάζεται varsol και του οποίου η ρευστότητα διατηρείται σταθερή, ανεξάρτητα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν μείγμα οιοπνεύματος και νερού. Σε κάθε περίπτωση, στο δέκατο τρίτο Παράρτημα (Annex 13) του πέμπτου Κεφαλαίου (Chapter 5) της Διεθνούς Συμβάσεως για την Ασφάλεια της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα (Safety of Life at Sea – SOLAS) προσδιορίζεται με απόλυτη σαφήνεια ότι οι μαγνητικές πυξίδες που εξοπλίζουν σήμερα τα πλοία πρέπει να καλύπτουν όλες τις Λειτουργικές Προδιαγραφές που έχει θεσπίσει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO Performance Standards). Ιδιαίτερα δε πρέπει να καλύπτουν τις αναλυτικές προβλέψεις του Resolution A.382(X) του IMO, καθώς και αυτές του ψηφίσματος της Επιτροπής Ναυτικής Ασφάλειας (Maritime Safety Committee) Resolution MSC.86(70)/annex 2, το οποίο αναφέρεται στις ηλεκτρονικές διατάξεις που διακινούν την πληροφορία κατευθύνσεως που προκύπτει από πυξίδα αντίστοιχου τύπου (transmitting magnetic heading devices).

Στο σχήμα παρακάτω παρουσιάζεται αντιπροσωπευτικός τύπος σύγχρονης μαγνητικής πυξίδας. Όπως προαναφέρθηκε, οι πυξίδες αυτές διαθέτουν εξαιρετική αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις, ενώ λειτουργούν ανεξάρτητα από τη διαθεσιμότητα παροχής ηλεκτρικής ισχύος στο πλοίο.



*Εικόνα 43 Σύγχρονη μαγνητική πυξίδα.*

Πέραν της διακοπής παροχής ηλεκτρικής ισχύος, σε οποιοδήποτε πλοίο, ακόμα και στο πιο σύγχρονο, μπορεί να προκύψει προσωρινή ή μόνιμη απώλεια της πληροφορίας των συγχρόνων γυροσκοπικών πυξίδων που οφείλεται σε τεχνικούς λόγους. Ένας προφανής λόγος είναι η βλάβη σε κάποιο από τα συστήματα της γυροπυξίδας. Άλλος λόγος είναι η βλάβη σε κομβική μονάδα μεταδόσεως σημάτων. Ειδικότερα και επειδή οι πληροφορίες της πορείας, της ταχύτητας και της

θέσεως, όπως αυτές προέρχονται από διάφορα όργανα, πρέπει να ενημερώνουν πολλαπλές κονσόλες (π.χ. την κονσόλα Radar/ARPA), συστήματα (π.χ. το ECDIS, τα ολοκληρωμένα συστήματα ναυτιλίας/γεφύρας και το τακτικό σύστημα στα πολεμικά πλοία) και επαναλήπτες/ενδείκτες, η συνήθης κατασκευαστική πρακτική παραπέμπει στη συγκέντρωσή τους σε μία μονάδα διανομής.

Στην περίπτωση εμφανίσεως βλάβης στη μονάδα διανομής, προκαλείται απώλεια διαθεσιμότητας των προαναφερομένων πληροφοριών στις διασυνδεδεμένες κονσόλες και ενδείκτες. Ανάλογο πρόβλημα μπορεί να προκύψει από «πληροφοριακή υπερφόρτωση» των κονσολών και των συστημάτων, τα οποία σταματούν να ανταποκρίνονται. Γενικότερα, παρά τα οφέλη που απορρέουν από τα ηλεκτρονικά ναυτικά όργανα, όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα και η συνδυαστική λειτουργία τους με άλλα παρόμοια, τόσο αυτά εμφανίζουν συμπεριφορές ανάλογες με αυτές ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή, που σταματά να λειτουργεί (κολλά) και απαιτεί επανεκκίνηση.

Σε όλες τις παραπάνω αστοχίες, οι κατασκευαστές ηλεκτρονικών ναυτικών οργάνων και συστημάτων έχουν προβλέψει την άμεση αντικατάσταση της πληροφορίας της πορείας των συγχρόνων πυξίδων, με εκείνη που προέρχεται από την μαγνητική πυξίδα. Από όλες τις διασυνδέσεις, οι κρίσιμότερες είναι η διασύνδεση με την κονσόλα Radar/ARPA και με την κονσόλα αυτόματης πηδαλιουχίσεως. Απώλεια της πληροφορίας της πορείας από την κονσόλα Radar/ARPA, καταργεί τη δυνατότητα απεικονίσεως North Up, καθόσον σε αυτή τη μέθοδο απεικονίσεως, όλη η εικόνα προσανατολίζεται με την αναφορά του αληθούς Βορρά, όπως αυτή προκύπτει από τη διασυνδεδεμένη πυξίδα. Αντίστοιχα το σύστημα αυτόματης πηδαλιουχίσεως, επειδή συνεχώς συγκρίνει την επιθυμητή πορεία με την πραγματική που τηρείται από το πλοίο, όπως αυτή παρέχεται από τη διασυνδεδεμένη πυξίδα, αδυνατεί να λειτουργήσει χωρίς την πληροφορία αυτή. Στο σχήμα φαίνεται μία σύγχρονη κονσόλα πηδαλιουχίσεως. Δίπλα από τον σύγχρονο εξοπλισμό, είναι τοποθετημένη σε κεντρική θέση, μπροστά από το πηδάλιο, η μαγνητική πυξίδα, ως ο πλέον παραδοσιακός αλλά και αξιόπιστος σύμμαχος του ναυτικού κατά την εκτέλεση του πλου.



Σύγχρονη κονσόλα πηδαλιουχίσεως με τη μαγνητική πυξίδα σε κεντρική θέση.

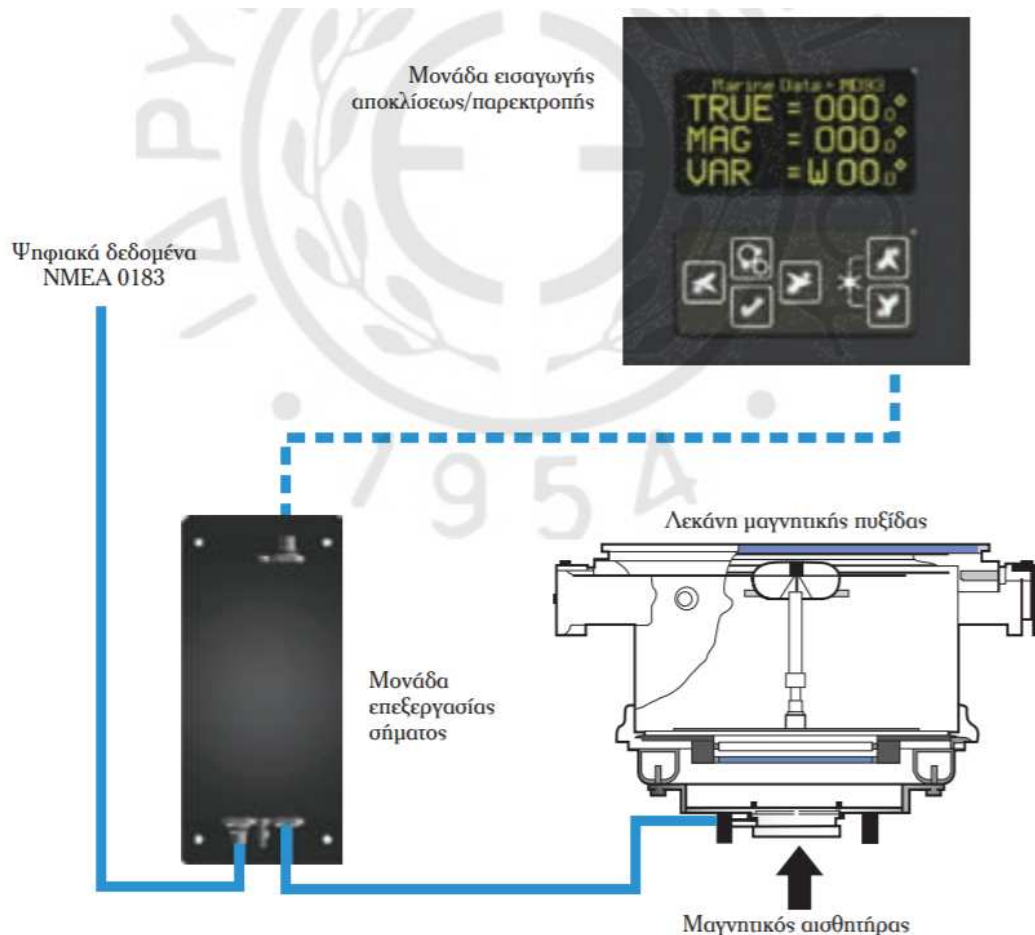
Αθανασίου Η. Παλληκάρη, Γεωργίου Θ. Κατσούλη, Δημητρίου Α. Δαλακλή (2016)

Προκειμένου να μπορεί να αξιοποιηθεί άμεσα η πληροφορία της πορείας που παρέχει η μαγνητική πυξίδα, τα σύγχρονα πλοία διαθέτουν διατάξεις. Ακριβώς κάτω από τη λεκάνη της πυξίδας, βρίσκεται τοποθετημένος ένας μαγνητικός αισθητήρας. Ο αισθητήρας αυτός αποτελείται από περιελίξεις πηνίου, πάνω στις οποίες επάγεται ηλεκτρικό ρεύμα κατά την περιστροφή του ανεμολογίου της πυξίδας. Το επαγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα θα δημιουργήσει κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα, το οποίο θα μεταδοθεί στη μονάδα επεξεργασίας σήματος. Εκεί το σήμα, αφού διορθωθεί ως προς την απόκλιση και την παρεκτροπή, όπως θα αναλυθεί αμέσως μετά, θα μετατραπεί σε ψηφιακό. Στη μορφή αυτή και ακολουθώντας την τυποποίηση του πρωτοκόλλου NMEA 0183, είναι περαιτέρω δυνατή η μετάδοσή του σε οποιοδήποτε όργανο ή σύστημα είναι συμβατό με το προαναφερόμενο πρωτόκολλο επικοινωνίας δεδομένων. Στη μονάδα επεξεργασίας σήματος είναι συνδεδεμένη και η μονάδα ει σαγωγής αποκλίσεως και παρεκτροπής. Όπως είναι φυσικό, η μαγνητική πυξίδα υποδεικνύει τον μαγνητικό αντί του αληθούς Βορρά. Η μεταξύ τους διαφορά ονομάζεται απόκλιση (variation) και είναι διαφορετική για κάθε περιοχή της Γης. Οι τιμές της αποκλίσεως είναι γνωστές και επομένως μπορούν να εισαχθούν σε βάση δεδομένων κατάλληλου λογισμικού που εξοπλίζει τη μονάδα αυτή.

Επιπλέον, οι μεταλλικές υπερκατασκευές των πλοίων επηρεάζουν τη μαγνητική πυξίδα, δημιουργώντας το σφάλμα παρεκτροπής (deviation), που αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ του μαγνητικού Βορρά και εκείνου που υποδεικνύει η μαγνητική πυξίδα. Οι τιμές της παρεκτροπής είναι διαφορετικές για κάθε πορεία του πλοίου και μπορούν να υπολογισθούν με ακρίβεια, ώστε



να εισαχθούν και αυτές στην προαναφερόμενη βάση δεδομένων. Επομένως, μετά και την παρέμβαση της μονάδας εισαγωγής αποκλίσεως/παρεκτροπής, η εξαγόμενη πληροφορία της πορείας από τη μονάδα επεξεργασίας σήματος θα είναι απαλλαγμένη σφαλμάτων και θα προσεγγίζει την ακρίβεια της αντίστοιχης που παρέχουν οι γυροπυξίδες.



Εικόνα 44 Διάταξη Σύγχρονης Μαγνητικής Πυξίδας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο

### – Η ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΥΞΙΔΑ

#### 7.1 Τεχνικές μετατροπής του ελεύθερου γυροσκοπίου σε γυροσκοπική πυξίδα

Παραπάνω προσδιορίστηκε σαφώς ότι προκειμένου να καταστεί ένα ελεύθερο γυροσκόπιο κατάλληλο για να αποτελέσει τον θεμέλιο λίθο της γενικότερης λειτουργίας μίας ηλεκτρομηχανικής γυροπυξίδας, πρέπει να γίνει πρώτα παρεμβολή κατάλληλων διορθωτικών μηχανισμών. Όλες οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή του ελεύθερου γυροσκοπίου σε γυροσκοπική πυξίδα, βασίζονται σε τέσσερα φυσικά φαινόμενα, από τα οποία δύο αφορούν στις ιδιότητες του γυροσκοπίου (γυροσκοπική αδράνεια και μετάπτωση) και τα άλλα δύο στην περιστροφή της Γης και στη δύναμη της βαρύτητας. Οι διαφορές μεταξύ των διαφόρων τύπων ηλεκτρομηχανικών γυροπυξίδων αφορούν μόνο στις κατασκευαστικές τεχνικές μεθόδους, με τις οποίες το ελεύθερο γυροσκόπιο μετατρέπεται σε γυροσκοπική πυξίδα και όχι στη βασική αρχή λειτουργίας τους. Για τη μετατροπή αυτή πρέπει να γίνουν ορισμένες αλλαγές στον μηχανισμό αναρτήσεως του γυροσκοπίου. Οι αλλαγές αυτές συνήθως αφορούν στην τοποθέτηση κάποιου πρόσθετου βάρους στον κατακόρυφο δακτύλιο αναρτήσεως. Κατασκευαστικά, διακρίνουμε δύο κύριες μεθόδους. Στην πρώτη μέθοδο το πρόσθετο βάρος  $\beta$  (βάρος ελέγχου) προσαρμόζεται στο επάνω μέρος (κορυφή) του γυροσκοπίου και ο σφόνδυλος του στρέφεται αριστερόστροφα. Στη δεύτερη μέθοδο το βάρος προσαρμόζεται στο κάτω μέρος (πυθμένα) του γυροσκοπίου και ο σφόνδυλος του στρέφεται δεξιόστροφα. Γενικότερα:

- 1) Ονομάζουμε βόρειο και νότιο άκρο του άξονα περιστροφής του σφονδύλου τα σημεία εκείνα τα οποία, αφού ο άξονας ολοκληρώσει την αναζήτηση και γίνει παράλληλος προς τη μεσημβρινή γραμμή, θα δείχνουν αντίστοιχα την κατεύθυνση του Βορρά και την κατεύθυνση του Νότου.
- 2) Όταν αναφερόμαστε στην φορά περιστροφής του σφονδύλου ή των σφονδύλων, εννοούμε τη φορά περιστροφής όπως την αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής, ο οποίος βρίσκεται στο νότιο άκρο του άξονα ή των αξόνων.

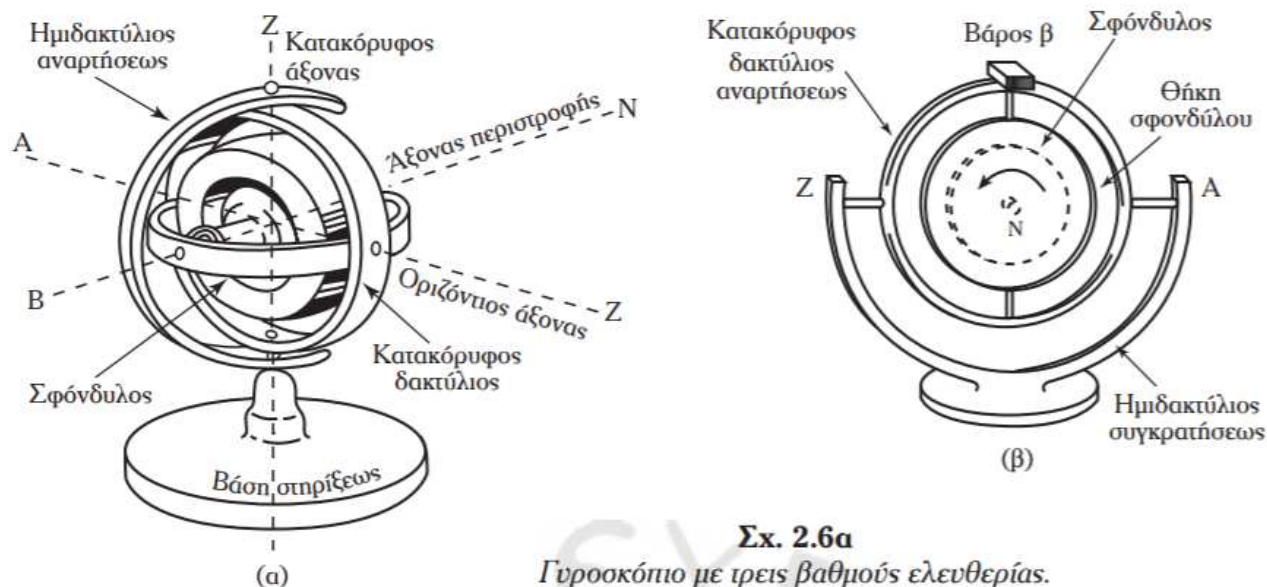
#### 7.2 Εξαναγκασμός του ελεύθερου γυροσκοπίου να αναζητεί τον Βορρά

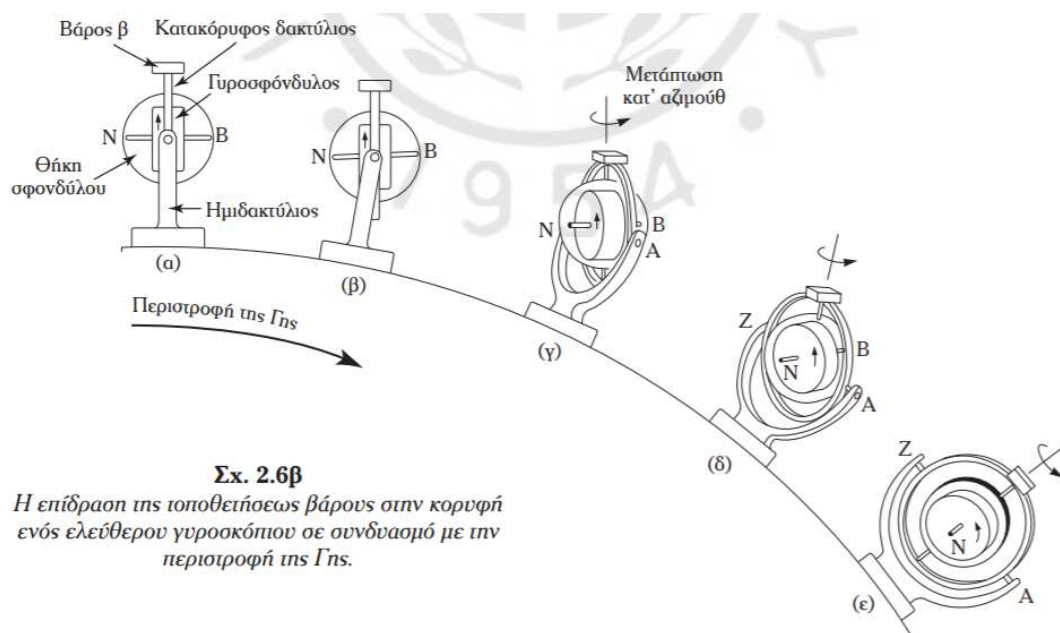
Θεωρούμε το γυροσκόπιο τριών βαθμών ελευθερίας του σχήματος, στο οποίο ο σφόνδυλος μπορεί να στρέφεται γύρω από τους ακόλουθους τρεις άξονες:

- 1) Τον άξονα περιστροφής BN (Βορράς –Νότος),
- 2) τον οριζόντιο άξονα AZ (Απηλιώτης –Ζέφυρος), και
- 3) τον κατακόρυφο άξονα Z.

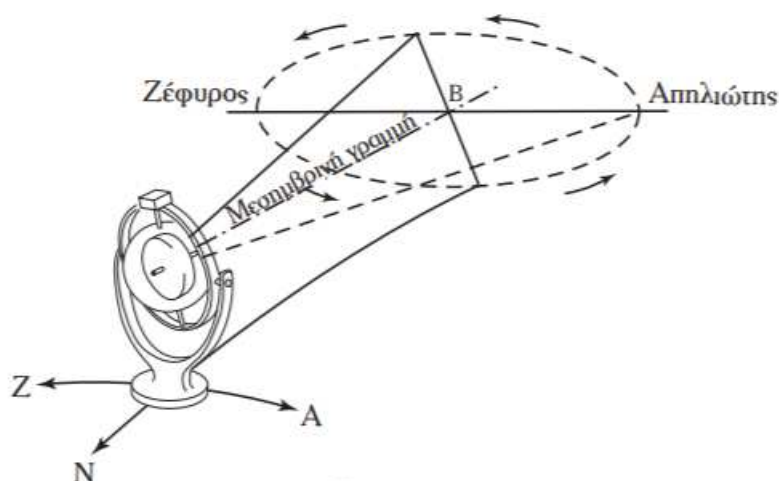
Το γυροσκόπιο του σχήματος έχει τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά με αυτό του σχήματος 2.6α(α) με τη διαφορά ότι η ανάρτησή του γίνεται σε κατακόρυφο ημιδακτύλιο αντί της σταθερής βάσεως στηρίξεως του γυροσκοπίου του σχήματος. Στην κορυφή του κατακόρυφου δακτυλίου του γυροσκοπίου του σχήματος προσαρμόζεται βάρος  $\beta$ , με τέτοιον τρόπο ώστε, όταν ο δακτύλιος είναι κατακόρυφος, να μην ασκείται από το βάρος καμιά ροπή σ' αυτόν. Αυτό συμβαίνει, όταν ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου BN είναι οριζόντιος. Ο σφόνδυλος του γυροσκοπίου αυτού περιστρέφεται αριστερόστροφα με τον ικανό αριθμό στροφών, ώστε η συγκεκριμένη διάταξη να αποτελεί ελεύθερο γυροσκόπιο. Τοποθετούμε το γυροσκόπιο στον Ισημερινό, με τον οριζόντιο άξονα AZ στη διεύθυνση Απηλιώτη- Ζεφύρου (Ανατολή – Δύση).

Καθώς ο κατακόρυφος δακτύλιος είναι στην κατακόρυφο θέση, το βάρος  $\beta$  δεν ασκεί καμιά ροπή στον κατακόρυφο δακτύλιο και το γυροσκόπιο έχει συμπεριφορά ελεύθερου γυροσκοπίου. Το άκρο Β του άξονα περιστροφής θα αρχίσει να ανυψώνεται πάνω από τον ορίζοντα, λόγω της περιστροφής της Γης. Επειδή την ίδια ακριβώς κλίση θα ακολουθήσει και ο κατακόρυφος δακτύλιος το βάρος  $\beta$  θα προκαλέσει στον δακτύλιο μία ροπή γύρω από τον οριζόντιο άξονα περιστροφής, εξαναγκάζοντάς τον σε μετάπτωση κατ' αζιμούθ.





**Σχ. 2.6β**  
 Η επίδραση της τοποθετήσεως βάρους στην κορυφή ενός ελεύθερου γυροσκοπίου σε συνδυασμό με την περιστροφή της Γης.



Εικόνα 45 Η προβολή της κινήσεως του άξονα περιστροφής σε επίπεδο δημιουργεί μια έλλειψη

Κατά συνέπεια, το γυροσκόπιο κάτω από την επίδραση του βάρους  $\beta$  παύει πλέον να είναι ελεύθερο. Το άκρο B του άξονα περιστροφής του σφονδύλου του πραγματοποιεί ταυτόχρονα δύο κινήσεις σε σχέση με το επίπεδο του ορίζοντα: Τη συνεχή ανύψωση πάνω από τον ορίζοντα με γωνιακή ταχύτητα 15ο ανά ώρα και τη μετάπτωση κατ' αζιμούθ προς δυσμάς, που προκαλεί το βάρος  $\beta$ . Καθώς η φαινόμενη καθ' ύψος κίνηση συνεχίζεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα, η κλίση του άξονα περιστροφής του κατακόρυφου δακτυλίου γίνεται και αυτή όλο και μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα να αυξάνει συνεχώς και η δύναμη που ασκεί το βάρος  $\beta$  στον κατακόρυφο δακτύλιο αναρτήσεως. Δεχόμαστε ότι με ειδικό εξωτερικό σύστημα η βάση του γυροσκοπίου και ο ημιδακτύλιος συγκρατήσεως στρέφουν συνεχώς κατ' αζιμούθ –όπως ακριβώς μεταπίπτει ο άξονας του σφονδύλου– εξασφαλίζοντας συνεχώς την καθετότητα μεταξύ τους. Ταυτόχρονα

αυξάνει –ανάλογα με την κλίση– και η προς δυσμάς γωνιακή ταχύτητα μεταπτώσεως του άκρου του άξονα περιστροφής. Η αύξηση της γωνιακής ταχύτητας συνεχίζεται μέχρι ο άξονας φθάσει στον μεσημβρινό, όπου και θα έχει λάβει τη μεγαλύτερη κλίση. Όταν ο άξονας AZ ξεπεράσει τον μεσημβρινό, αναστρέφεται η φορά της φαινόμενης καθ' ύψος κινήσεως. Το βόρειο άκρο B του άξονα περιστροφής BN –που λόγω της κινήσεως της Γης συνεχίζει την προς τα κάτω φαινόμενη κίνηση– αρχίζει να κατεβαίνει (βυθίζεται) κάτω από τον ορίζοντα, δηλαδή παίρνει αντίθετη κλίση.

Η αντίθετη αυτή κλίση συνεπάγεται και αναστροφή της φοράς της κατακόρυφης δυνάμεως (προς τα πάνω πλέον) του βάρους  $\beta$  στο άκρο N του άξονα περιστροφής του σφονδύλου, με αποτέλεσμα το άκρο B να μεταπίπτει κατ' αζιμούθ, αλλά με κατεύθυνση προς ανατολάς. Η νέα αυτή μετάπτωση (προς ανατολάς) θα συνεχισθεί μέχρι τη στιγμή που ο άξονας θα βρεθεί στην αρχική του θέση (σημείο εκκινήσεως). Αν και στη θέση αυτή παρουσιάζει στιγμιαία συμπεριφορά ελεύθερου γυροσκοπίου, αρχίζει αμέσως την ίδια ακριβώς φαινόμενη κίνηση. Θα ξεκινήσει έτσι ένας νέος κύκλος κινήσεων, όμοιος με αυτόν που αναπτύχθηκε προηγουμένως. Τα παραπάνω συνοψίζονται στο σχήμα, όπου φαίνεται ότι η μετάπτωση κατ' αζιμούθ του άξονα περιστροφής του σφονδύλου εκατέρωθεν του μεσημβρινού ισοδυναμεί με την εκτέλεση ταλαντώσεων σταθερού πλάτους γύρω από τον μεσημβρινό. Όπως δηλαδή ένα εκκρεμές ταλαντώνεται γύρω από την κατακόρυφο, έτσι ταλαντώνεται και ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου εκατέρωθεν του μεσημβρινού. Η χρονική περίοδος των ταλαντώσεων κυμαίνεται μεταξύ 70 και 90 min, ανάλογα του τύπου της κατασκευής που έχει επιλεγεί (θέση και τιμή του βάρους) –με μία συγκεκριμένη τιμή που συναντάται αρκετά συχνά στην αντίστοιχη διεθνή και εγχώρια βιβλιογραφία να είναι αυτή των 84 min.

Συνοψίζοντας την παραπάνω ανάλυση, παρατηρούμε ότι με την τοποθέτηση του βάρους  $\beta$  τροποποιήθηκε σημαντικά η συμπεριφορά του ελεύθερου γυροσκοπίου, με το τελικό αποτέλεσμα να είναι η εκτέλεση ταχέων ταλαντώσεων γύρω από τον μεσημβρινό. Με τον τρόπο αυτό μετατρέπεται σταδιακά ένα ελεύθερο γυροσκόπιο σε γυροσκοπική πυξίδα. Επομένως, με τη συγκεκριμένη κατασκευαστική μεθοδολογία που συζητήθηκε στην παρούσα παράγραφο (γνωστή και ως ενσωμάτωση βαρών ελέγχου) ξεκινά η διαδικασία μετατροπής του ελεύθερου γυροσκοπίου σε γυροσκοπική πυξίδα.

### **7.3 Προσανατολισμός στον Βορρά και απο κατάσταση του άξονα περιστροφής στον μεσημβρινό**

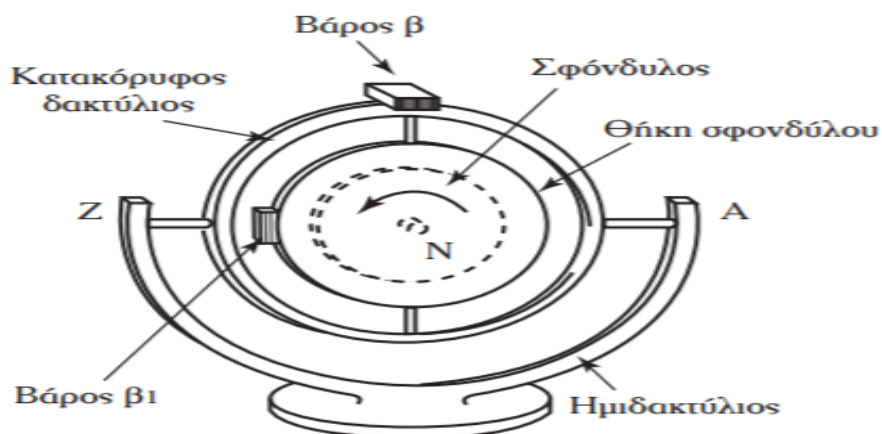
Ας θεωρήσουμε επί πλέον την περίπτωση, όπου –εκτός από το βάρος  $\beta$ – ένα δεύτερο μικρότερο βάρος  $\beta_1$  προσαρμόζεται στη δυτική πλευρά της υπό εξέταση διατάξεως και στην



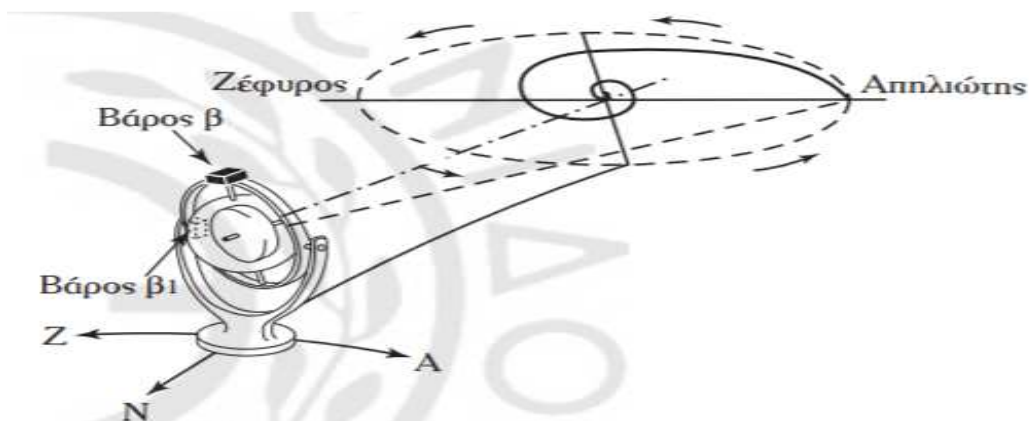
κατεύθυνση της οριζόντιας διαμέτρου της θήκης του σφονδύλου. Όταν ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου είναι οριζόντιος, η θήκη του είναι κατακόρυφη και έτσι δεν προκαλείται καμία ροπή στρέψεως. Δεν προκαλείται επομένως καμιά μετάπτωση. Όταν όμως ο άξονας περιστροφής πάρει κλίση λόγω της φαινόμενης κινήσεώς του, η θήκη του σφονδύλου παύει να είναι κατακόρυφη και επομένως το βάρος  $\beta_1$  θα εξασκήσει ροπή στρέψεως γύρω από τον κατακόρυφο άξονα.

Η ροπή αυτή ισοδυναμεί με την άσκηση οριζόντιας δυνάμεως στο νότιο άκρο του άξονα περιστροφής του σφονδύλου. Έχει δε φορά προς ανατολάς όταν το βόρειο άκρο ανεβαίνει και προς δυσμάς όταν αυτό κατεβαίνει, με τις οριζόντιες αυτές δυνάμεις να προκαλούν στον άξονα μετάπτωση κατ' αζιμούθ. Με τον κανόνα των τριών δακτύλων διαπιστώνεται ότι όταν το βόρειο άκρο ανεβαίνει, η οριζόντια και προς ανατολάς δύναμη προκαλεί σ' αυτό μετάπτωση προς τα κάτω, ενώ αντίθετα όταν κατεβαίνει, η οριζόντια και προς δυσμάς δύναμη προκαλεί μετάπτωση προς τα επάνω. Επομένως, όταν το βόρειο άκρο του άξονα περιστροφής του σφονδύλου ανεβαίνει λόγω της φαινόμενης κινήσεώς του, το βάρος  $\beta$ , στην κορυφή, προκαλεί σ' αυτό μετάπτωση προς δυσμάς, ενώ ταυτόχρονα το μικρότερο βάρος  $\beta_1$  που είναι τοποθετημένο στη θήκη του σφονδύλου προκαλεί μετάπτωση προς τα κάτω. Όταν το άκρο κατεβαίνει, η φορά των μεταπτώσεων γίνεται αντίθετη: προς ανατολάς από το βάρος  $\beta$  και προς τα επάνω από το βάρος  $\beta_1$ . Ας θεωρήσουμε ότι το γυροσκόπιο αυτό με τα δύο βάρη βρίσκεται στον Ισημερινό, με τον άξονα περιστροφής του οριζόντιο και με διεύθυνση Απηλιώτη-Ζεφύρου (το βόρειο άκρο δείχνει τον Απηλιώτη). Με βάση όσα καταγράφηκαν παραπάνω, το βόρειο άκρο του άξονα περιστροφής θα κινηθεί ακολουθώντας χαμηλότερη τροχιά που παρουσιάζεται στο σχήμα και αντιστοιχεί σε μια ελλειπτική σπείρα που συγκλίνει στη διεύθυνση του Βορρά.

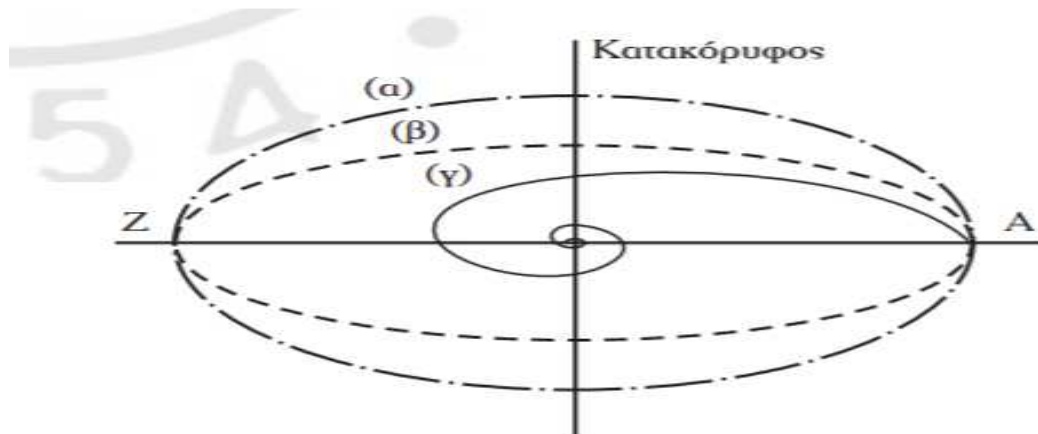
Στην κατασκευαστική μεθοδολογία ηλεκτρομηχανικών πυξίδων τα δύο βάρη υπολογίζονται, ώστε να εκτελείται σταδιακή αποκατάσταση του άξονα περιστροφής του σφονδύλου στον μεσημβρινό. Πρακτικά, κάθε φορά που ο άξονας περιστροφής διέρχεται από τον μεσημβρινό, μειώνει τη γωνιακή του απόσταση από αυτόν στο ένα τρίτο της αντίστοιχης προηγούμενης γωνιακής αποστάσεως. Ακολουθώς παρουσιάζεται η σύγκριση των κινήσεων του άξονα με και χωρίς το πρόσθετο βάρος  $\beta_1$ .



Εικόνα 46 Γυροσκόπιο με πρόσθετο βάρος αποσβέσεως ταλαντώσεων



Εικόνα 47 Απόσβεση ταλαντώσεων και σταθεροποίηση του άξονα περιστροφής στη διεύθυνση του Βορρά.



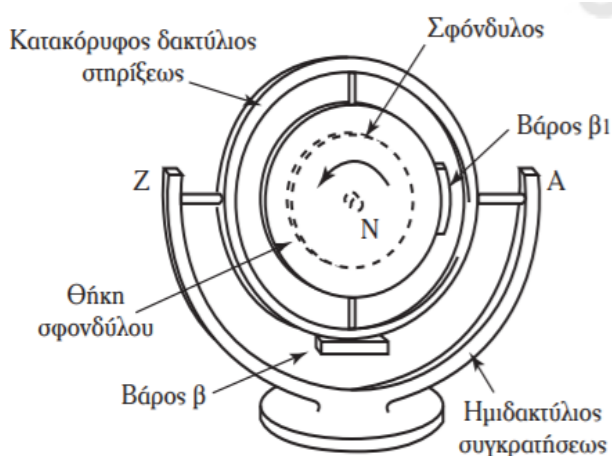
Οι διαφορετικές τροχιές αναπαριστούν τα εξής: η (α) τη φαινόμενη κίνηση, η (β) την μεικτή κίνηση κατά τις ταχείες ταλαντώσεις σταθερού πλάτους (πεπλατυσμένη έλλειψη) και η (γ) την μεικτή κίνηση κατά την απόσβεση ταλαντώσεων με το πρόσθετο βάρος β1.

Εικόνα 48 Σύνοψη των κινήσεων σε κατακόρυφο επίπεδο

Μέχρι τώρα εξηγήθηκε ότι όταν ένα γυροσκόπιο βρεθεί στον Ισημερινό, με τον άξονα περιστροφής του σφονδύλου του σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, ο άξονας αυτός εξαναγκάζεται σε

ταχείες ταλαντώσεις γύρω από τον μεσημβρινό κάτω από την επίδραση του βάρους  $\beta$  στην κορυφή του. Επιπρόσθετα αναλύθηκε ότι κάτω και από την ταυτόχρονη επίδραση του βάρους  $\beta_1$  στο αριστερό (δυτικό) της οριζόντιας διαμέτρου της θήκης του σφονδύλου, επιτυγχάνεται η απόσβεση των ταλαντώσεων, ώστε το γυροσκόπιο τελικά να προσανατολίζεται στον Βορρά. Με τα βάρη αυτά επιτυγχάνονται τα ίδια αποτελέσματα και στα ενδιάμεσα πλάτη, τόσο τα βόρεια όσο και τα νότια, γιατί όπως έχει ήδη αναλυθεί, στα ενδιάμεσα πλάτη ( $\varphi$ ) ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου εκτελεί μεικτή φαινόμενη κίνηση, καθ' ύψος (κλίση)  $15 \times \text{Cos}(\varphi)$  και κατ' αζιμούθ (στροφή)  $15 \times \text{Sin}(\varphi)$ . Δηλαδή ο συνδυασμός των δύο βαρών, είναι μια διάταξη που ελέγχει τις κινήσεις του άξονα περιστροφής του γυροσκοπίου, ώστε ο άξονας να τηρείται πρακτικά παράλληλος προς τη μεσημβρινή γραμμή (μετατρέπει το ελεύθερο γυροσκόπιο σε ελεγχόμενο). Γι' αυτό και ο συνδυασμός των βαρών αυτών ονομάζεται και διάταξη ή στοιχείο χειού ελέγχου.

Η τοποθέτηση των βαρών κατά τον τρόπο που παρουσιάστηκε παραπάνω, δηλαδή το βάρος  $\beta$  στην κορυφή του κατακόρυφου δακτυλίου και το μικρότερο βάρος  $\beta_1$  στο αριστερό (δυτικό) της οριζόντιας διαμέτρου της θήκης του σφονδύλου, μετατρέπουν σε πυξίδα μόνο ένα αριστερόστροφο ελεύθερο γυροσκόπιο. Στο δεξιόστροφο ελεύθερο γυροσκόπιο, το βάρος  $\beta$  τοποθετείται στο κάτω μέρος του κατακόρυφου δακτυλίου (bottom-heavy). Είναι μάλλον εύκολο να διαπιστωθεί με τη βοήθεια του κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού, ότι η διάταξη αυτή εξασφαλίζει τις αναγκαίες γρήγορες ταλαντώσεις του άξονα περιστροφής του γυροσφονδύλου, εξαναγκάζοντας το βόρειο άκρο του να διαγράφει σε κατακόρυφο επίπεδο πλατυσμένη έλλειψη. Με την τοποθέτηση του βάρους  $\beta_1$  στο δεξί (ανατολικό) της οριζόντιας διαμέτρου της θήκης του σφονδύλου, εξασφαλίζεται η απόσβεση των ταλαντώσεων και η αποκατάσταση του άξονα περιστροφής του γυροσφονδύλου στον μεσημβρινό. Τέλος, η απόσβεση των ταλαντώσεων, σε πυξίδες των οποίων το γυροσκόπιο διαθέτει το βάρος στον



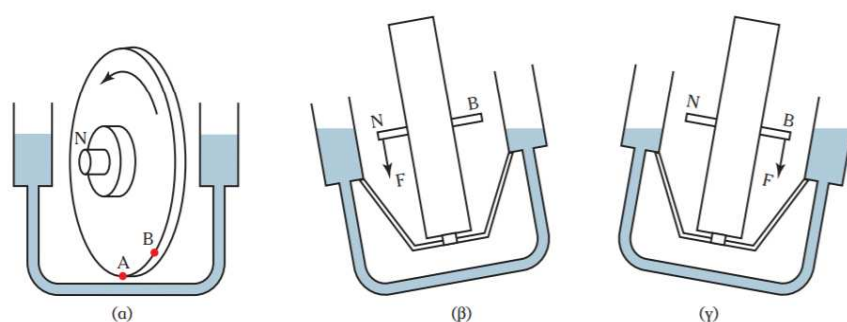
πυθμένα, μπορεί να επιτυγχάνεται και με διαφορετικό μέσο (π.χ. δοχεία υδραργύρου), που και αυτό εκμεταλλεύεται αντιστοίχως τη βαρύτητα, όπως θα επεξηγηθεί στη συνέχεια.

Εικόνα 49 Τοποθέτηση βάρους στον πυθμένα

## 7.4 Η χρήση του βαλλιστικού υγρού

Το σύστημα ελέγχου που περιγράφηκε προηγουμένως, δυστυχώς δεν έχει πρακτική εφαρμογή στα πλοία. Και τούτο διότι κατά τις απότομες μεταβολές της ταχύτητας ή της πορείας του πλοίου και κατά κύριο λόγο εξαιτίας των κλυδωνισμών του, δημιουργούνται από τα βάρη σημαντικές ροπές, που έχουν ως αποτέλεσμα την εκτροπή του άξονα περιστροφής του σφονδύλου από την κατεύθυνση του μεσημβρινού. Τη λύση στο πρόβλημα αυτό προσφέρει η αντικατάσταση των βαρών με συγκοινωνούντα δοχεία, τα οποία περιέχουν υδράργυρο, με τη μετάγγιση του οποίου επιτυγχάνονται τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα που επιτυγχάνονται με τα βάρη που συζητήθηκαν παραπάνω. Ειδικότερα, μέσω του βάρους του υγρού στα συγκοινωνούντα δοχεία, ασκείται ροπή ζεύγους δυνάμεων, η οποία τείνει να επαναφέρει τον άξονα περιστροφής του γυροσφονδύλου προς τον Βορρά. Στο σχήμα παρουσιάζεται η πρόοψη (προβολή στο κατακόρυφο προβολικό επίπεδο) της θήκης του σφονδύλου. Στο κάτω μέρος της και ειδικά στο σημείο από το οποίο περνά η κατακόρυφος από το κέντρο βάρους του σφονδύλου, στερεώνεται ζεύγος συγκοινωνούντων δοχείων, που περιέχουν ορισμένη ποσότητα υδραργύρου. Η στήριξη γίνεται κατά τρόπο, ώστε τα δοχεία να ακολουθούν τις κινήσεις του άξονα περιστροφής του σφονδύλου. Όταν ο άξονας είναι οριζόντιος, τα δοχεία βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Επειδή και τα δύο περιέχουν την ίδια ποσότητα υδραργύρου, δεν ασκούν –εξαιτίας της βαρύτητας– δύναμη στον άξονα και το γυροσκόπιο είναι ελεύθερο.

Όταν το βόρειο άκρο βρίσκεται ανατολικότερα από τον μεσημβρινό και ανεβαίνει από τον ορίζοντα, λόγω της φαινόμενης κινήσεως ανεβαίνει και το βόρειο δοχείο, ενώ το νότιο κατεβαίνει.



Εικόνα 50 Η χρήση του βαλλιστικού υγρού (το υδραργυρικό σύστημα του σφονδύλου).

Έτσι μεταγγίζεται υδράργυρος από το βόρειο στο νότιο δοχείο και το νότιο αρχίζει να περιέχει όλο και μεγαλύτερη ποσότητα υδραργύρου. Η μεγαλύτερη ποσότητα υδραργύρου στο νότιο δοχείο, δρα ως κατακόρυφη δύναμη με φορά προς τα κάτω, όπως στην περίπτωση του βάρους β στην κορυφή, και προκαλεί μετάπτωση του βόρειου άκρου του άξονα περιστροφής προς δυσμάς. Όταν το βόρειο άκρο του άξονα βρίσκεται δυτικότερα από τον μεσημβρινό και κατεβαίνει από

τον ορίζοντα, λόγω της φαινόμενης κινήσεως κατεβαίνει και το βόρειο δοχείο, ενώ το νότιο ανεβαίνει. Έτσι ο υδράργυρος μεταγγίζεται στο βόρειο δοχείο και δρα ως κατακόρυφη δύναμη στο νότιο άκρο, αλλά με φορά προς τα πάνω. Η αντίθετης φοράς δύναμη προς τα πάνω προκαλεί μετάπτωση του ίδιου βόρειου άκρου του άξονα προς ανατολάς, κατά αναλογία με την περίπτωση του βάρους  $\beta$  στην κορυφή. Η δύναμη, την οποία και στις δύο περιπτώσεις ασκεί ο μεταγγιζόμενος υδράργυρος, είναι ανάλογη με την κλίση που έχει κάθε φορά ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου, επειδή ανάλογη θα είναι και η διαφορά ποσότητας υδραργύρου στα δύο δοχεία. Έτσι, κάτω από την επίδραση του μεταγγιζόμενου υδραργύρου, το βόρειο άκρο του άξονα μεταπίπτει κατ' αζιμούθ, με γωνιακή ταχύτητα που αυξάνει συνεχώς, μέχρι να φθάσει στον μεσημβρινό. Η γωνιακή ταχύτητα ελαττώνεται συνεχώς κατά την απομάκρυνση του βόρειου άκρου του άξονα από τον μεσημβρινό, μέχρι να οριζοντιωθεί στην άλλη πλευρά του μεσημβρινού, σε ίση γωνιακή απόσταση με εκείνη που βρέθηκε οριζόντιος αρχικά. Το βόρειο άκρο εκτελεί δηλαδή ταχείες ταλαντώσεις σταθερού πλάτους γύρω από τον μεσημβρινό, όπως στην περίπτωση της κατασκευής με το βάρος  $\beta$  στην κορυφή, ενώ η περίοδος των ταλαντώσεων είναι αντίστοιχη με αυτή που συζητήθηκε παραπάνω (π.χ. 84 min).

Για να προκύψει και η απαραίτητη οριζόντια δύναμη –για την απόσβεση ταλαντώσεων κατά τα ανάλογα με το βάρος  $\beta_1$ – το ζεύγος των παραπάνω δοχείων δεν στηρίζεται ακριβώς στο κάτω μέρος της θήκης του γυροσφονδύλου [σημείο Α του σχήματος, όπως μέχρι τώρα αναφέρθηκε, αλλά έκκεντρα [σημείο Β]. Έτσι, όταν το βόρειο άκρο του άξονα περιστροφής βρίσκεται ανατολικότερα από τον μεσημβρινό και αρχίζει να ανεβαίνει από τον ορίζοντα, λόγω της φαινόμενης καθ' ύψος κινήσεώς του, ο μεταγγιζόμενος στο νότιο δοχείο υδράργυρος θα ασκεί στο νότιο άκρο του άξονα ταυτόχρονα δύο δυνάμεις: μία κατακόρυφη, που τον εξαναγκάζει να μεταπίπτει προς δυσμάς με αυξανόμενη γωνιακή ταχύτητα μέχρι τον μεσημβρινό και μία μικρότερη οριζόντια με φορά προς τα δεξιά. Η μικρότερη οριζόντια δύναμη εξαναγκάζει τον άξονα να μεταπίπτει κατακόρυφα προς τα κάτω, οπότε κατά την κίνησή του μέχρι τον μεσημβρινό, το βόρειο άκρο κινείται σε χαμηλότερη τροχιά.

Όταν το βόρειο άκρο του άξονα περιστροφής του γυροσφονδύλου κατεβεί από τον ορίζοντα, ο υδράργυρος που μεταγγίζεται στο βόρειο δοχείο, ασκεί αντίθετες δυνάμεις στο νότιο άκρο του άξονα: κατακόρυφη προς τα επάνω και οριζόντια προς τα αριστερά. Οι δυνάμεις αυτές με τις μεταπτώσεις που θα προκαλέσουν, θα εξαναγκάσουν τον άξονα να οριζοντιωθεί ανατολικότερα από τον μεσημβρινό, αλλά και πάλι σε γωνιακή απόσταση μικρότερη κατά τα δύο τρίτα ( $2/3$ ) από την προηγούμενη. Με την έκκεντρη στήριξη του ζεύγους των δοχείων υδραργύρου, επιτυγχάνεται η απόσβεση του πλάτους των ταλαντώσεων του άξονα περιστροφής του



σφονδύλου γύρω από τον μεσημβρινό σε ποσοστό 66% και σε χρόνο της τάξεως των 42 min. Διευκρινίζεται ότι ο αριθμός που προαναφέρθηκε δεν είναι απόλυτος, αλλά διαφοροποιείται με βάση κατασκευαστικές επιλογές. Μάλιστα, η αύξησή του θα επιφέρει την αντίστοιχη αύξηση του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την ενεργοποίηση της πυξίδας (για τις παλαιότερες ηλεκτρομηχανικές πυξίδες είναι χαρακτηριστικό ότι κυμαινόταν σε περίπου 4 με 5 ώρες).

## 7.5 Η σταθεροποίηση του άξονα περιστροφής στον μεσημβρινό

Η μέθοδος αποσβέσεως ταλαντώσεων προκειμένου να μετατραπεί ένα ελεύθερο γυροσκόπιο σε γυροπυξίδα, όπως αναλυτικά συζητήθηκε προηγουμένως, καθιστά αναγκαία την παρέλευση ενός ικανού χρονικού διαστήματος από την (ηλεκτρική) ενεργοποίηση του συστήματος της γυροπυξίδας μέχρι να είναι τελικά πλήρως επιχειρησιακά αξιοποιήσιμο. Υπενθυμίζεται ότι τα βάρη  $\beta$  και  $\beta_1$  υπολογίζονται έτσι, ώστε η αποσβενόμενη ταλάντωση να ολοκληρώνεται σε ένα ενδεικτικό χρονικό διάστημα της τάξεως των 84 min. Μετά την ενεργοποίηση της πυξίδας (παροχή ηλεκτρικής τροφοδοτήσεως), ο γυροσκοπικός μηχανισμός θεωρείται εκμεταλλεύσιμος, όταν έχει ολοκληρωθεί η απόσβεση των ταλαντώσεων που εξασφαλίζεται με την έκκεντρη στήριξη του συστήματος ελέγχου. Τότε, ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου παίρνει την κατεύθυνση της μεσημβρινής γραμμής. Δηλαδή, είναι οριζόντιος και το βόρειο άκρο του δείχνει την κατεύθυνση του Βορρά με ικανοποιητική για τη ναυσιπλοΐα ακρίβεια. Για να λειτουργήσει ωστόσο αποτελεσματικά ο μηχανισμός αυτός ως πυξίδα, πρέπει ο άξονας του σφονδύλου να παραμένει συνεχώς στη θέση αυτή. Από τη στιγμή που θα λάβει τη θέση αυτή και θα γίνει οριζόντιος, τα δοχεία του στοιχείου ελέγχου βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο και περιέχουν την ίδια ποσότητα υδραργύρου. Έτσι, δεν ασκείται καμιά δύναμη στον άξονα περιστροφής του σφονδύλου και ο γυροσκοπικός μηχανισμός μετατρέπεται (πάλι) σε ελεύθερο γυροσκόπιο.

Γνωρίζουμε όμως ότι, αν ο άξονας του σφονδύλου βρεθεί για μία στιγμή παράλληλος προς τη μεσημβρινή γραμμή, συνεχίζει να παραμένει στη θέση αυτή μόνο σε τόπο του Ισημερινού, επειδή και η μεσημβρινή γραμμή και ο άξονας περιστροφής διατηρούν σταθερή τη διεύθυνσή τους στον χώρο. Σε ενδιάμεσους τόπους βορείων πλατών, το βόρειο άκρο του άξονα αρχίζει αμέσως να κινείται φαινομενικά προς ανατολάς (στροφή) και προς τα πάνω (κλίση). Αντίθετα, σε ενδιάμεσους τόπους νοτίων πλατών, το ίδιο βόρειο άκρο αρχίζει να κινείται προς δυσμάς (στροφή) και προς τα κάτω (κλίση). Για να συνεχίσει ο άξονας του σφονδύλου να είναι παράλληλος προς τη μεσημβρινή γραμμή θα πρέπει, από τη στιγμή που θα ολοκληρωθεί η

---

απόσβεση των ταλαντώσεων και θα βρεθεί παράλληλος προς τη μεσημβρινή γραμμή, να ασκούνται σ' αυτόν μια κατακόρυφη και μια οριζόντια δύναμη.

Οι δυνάμεις αυτές θα τον εξαναγκάζουν να μεταπίπτει στον χώρο αντίστοιχα κατ' αζιμούθ (στροφή) και καθ' ύψος (κλίση), όπως στην πραγματικότητα κινείται στον χώρο η μεσημβρινή γραμμή. Όπως είδαμε, για να ασκηθεί δύναμη από το στοιχείο ελέγχου, πρέπει να λάβει κλίση ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου, την οποία κλίση θα ακολουθήσουν ανάλογα και τα δοχεία, για να μεταγγισθεί υδράργυρος. Σ' ένα βόρειο ενδιάμεσο πλάτος, κατά τη διαδικασία της αναζητήσεως του Βορρά από το γυροσκόπιο, το βόρειο άκρο του άξονα περιστροφής αρχίζει να στρέφει φαινομενικά προς ανατολάς και να παίρνει κλίση προς τα πάνω. Καθώς την αντίστοιχη κλίση παίρνουν και τα δοχεία που χρησιμοποιούμε πλέον ως στοιχείο ελέγχου, αρχίζει να μεταγγίζεται υδράργυρος από τα βόρεια στα νότια δοχεία. Με την έκκεντρη στήριξη των δοχείων, ο μεταγγιζόμενος υδράργυρος ασκεί την κατακόρυφη και προς τα κάτω, καθώς και την οριζόντια και προς τα δεξιά (ανατολάς) δύναμη. Οι δυνάμεις αυτές εξαναγκάζουν τον άξονα του σφονδύλου να μεταπίπτει στον χώρο προς δυσμάς και προς τα κάτω, δηλαδή προς τις κατευθύνσεις των πραγματικών κινήσεων της μεσημβρινής γραμμής στον χώρο. Σε κάποια στιγμή, όσο συνεχίζεται η παραπάνω φαινόμενη στροφή και κλίση στον χώρο του άξονα, συνεπώς και η μετάγγιση υδραργύρου στα νότια δοχεία, οι μεταπτώσεις που προκαλεί στον άξονα ο μεταγγιζόμενος υδράργυρος θα έχουν τις ίδιες γωνιακές ταχύτητες με τις πραγματικές κινήσεις της μεσημβρινής γραμμής στον χώρο. Αφού λοιπόν η μεσημβρινή γραμμή και ο άξονας πραγματοποιούν τις ίδιες κινήσεις στον χώρο, συνεπάγεται ότι και το βόρειο άκρο του άξονα σταματά την περαιτέρω –προς ανατολάς και προς τα πάνω– φαινόμενη κίνησή του και σταθεροποιείται σε σχέση με το επίπεδο του ορίζοντα. Στη νέα αυτή θέση που σταθεροποιείται, ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου δεν είναι παράλληλος προς τη μεσημβρινή γραμμή. Το βόρειο άκρο του σχηματίζει τότε με την κατεύθυνση του Βορρά μια μικρή γωνία κατ' αζιμούθ και προς ανατολάς και μια μικρή γωνία καθ' ύψος και πάνω από τον ορίζοντα. Αυτή η μικρή γωνία, κατά την οποία ο άξονας περιστροφής του γυροσφονδύλου σε βόρειο πλάτος τάσσεται ανατολικότερα από την κατεύθυνση του Βορρά αποτελεί ένα σφάλμα ανατολικής έννοιας. Επειδή σε νότιο πλάτος οι κινήσεις της μεσημβρινής γραμμής είναι αντίθετης φοράς, το βόρειο άκρο του άξονα περιστροφής του γυροσφονδύλου αρχίζει να κινείται φαινομενικά κατ' αζιμούθ προς δυσμάς και καθ' ύψος κάτω από τον ορίζοντα, σταθεροποιείται δυτικότερα από την κατεύθυνση του Βορρά και κάτω από τον ορίζοντα και το αντίστοιχο σφάλμα είναι δυτικής έννοιας.

Η τιμή του σφάλματος είναι:

$$a = \theta \cdot \text{Tan}(\varphi)$$

όπου:  $a$  το σφάλμα σε μοίρες,  $\theta$  η γωνία της έκκεντρης στηρίξεως του στοιχείου ελέγχου που εξασφαλίζει την απόσβεση των ταλαντώσεων,  $\varphi$  το πλάτος στο οποίο βρίσκεται κάθε φορά η πυξίδα (το πλοίο) και  $\text{Tan}$  η εφαπτομένη (tangent) της γωνίας. Για τον λόγο αυτόν ονομάζεται και σφάλμα πλάτους ή σφάλμα απο σβέσεως (latitude or damping error).

## 7.6 Χρόνος ενεργοποίησης των ηλεκτρομηχανικών γυροσκοπικών πυξίδων

Έχει ήδη επισημανθεί ότι η μέθοδος αποσβέσεως των ταλαντώσεων ευθύνεται για την ανάγκη παρελεύσεως ικανού χρόνου μέχρι τελικά να καταστεί μία ηλεκτρομηχανική γυροπυξίδα επιχειρησιακά διαθέσιμη. Υπενθυμίζεται ότι τα βάρη  $\beta$  και  $\beta_1$  υπολογίζονται έτσι, ώστε η αποσβενόμενη ταλάντωση να ολοκληρώνεται ενδεικτικά σε 84 min, οπότε η απόσβεση του πλάτους κατά τα  $2/3$  (ή σε ποσοστό 66%) πραγματοποιείται αντίστοιχα σε 42 min. Η κατά τον παραπάνω τρόπο απόσβεση των ταλαντώσεων, σε ποσοστό 66% και σε χρόνο 42 min, θα συνεχίζεται μέχρι τη στιγμή που ο άξονας περιστροφής του γυροσφονδύλου θα βρεθεί πρακτικά παράλληλος προς τον μεσημβρινό, δηλαδή οριζόντιος και με διεύθυνση Βορρά-Νότου, διαγράφοντας την κλειστή σπείρα. Έτσι, αν υποθέσουμε ότι τη στιγμή της εκκινήσεως της πυξίδας, ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου βρέθηκε οριζόντιος και με το βόρειο άκρο του στην κατεύθυνση Απηνιώτη, τότε απαιτούνται 4 h και 12 min, ώστε να βρεθεί οριζόντιος και με το βόρειο άκρο στην κατεύθυνση του Βορρά, καθόσον στο χρονικό αυτό διάστημα θα διέλθει από τις ακόλουθες φάσεις:

- 1) Αρχική θέση του βόρειου άκρου  $90^\circ$  ανατολικότερα.
- 2) Μετά από 42' θα βρίσκεται  $30^\circ$  δυτικότερα.
- 3) Μετά από 42' θα βρίσκεται  $10^\circ$  ανατολικότερα.
- 4) Μετά από 42' θα βρίσκεται  $3,3^\circ$  δυτικότερα.
- 5) Μετά από 42' θα βρίσκεται  $1,1^\circ$  ανατολικότερα.
- 6) Μετά από 42' θα βρίσκεται  $0,4^\circ$  δυτικότερα.
- 7) Μετά από 42' θα βρίσκεται  $0,13^\circ$  ανατολικότερα, δηλαδή πρακτικά θα έχει προσανατολιστεί στην κατεύθυνση του Βορρά.

Με βάση τη συγκεκριμένη μέθοδο αποσβέσεως των ταλαντώσεων και με τη βοήθεια του παραπάνω αριθμητικού παραδείγματος, κατανοούμε λοιπόν ότι η συγκεκριμένη γυροπυξίδα

είναι επιχειρησιακά διαθέσιμη μετά από χρονικό διάστημα της τάξεως των 4 με 5 h από τη στιγμή της εκκίνησης του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι για τη δυσμενέστερη περίπτωση που ο άξονας θα βρεθεί οριζόντιος με το βόρειο άκρο του κατευθυνόμενο προς τον νότο (θα βρεθεί δηλ. 180ο ανατολικότερα από την κατεύθυνση του Βορρά, μετά την έκτη αποσβενόμενη ταλάντωση, δηλ. σε 4 h και 12 min.), το βόρειο άκρο θα βρεθεί ανατολικότερα κατά 0,23ο περίπου. Επομένως, ακόμα και σ' αυτήν την ακραία περίπτωση η πυξίδα θα προσανατολιστεί ορθά και σε δεδομένο χρόνο. Τονίζεται ότι σε νεότερα μοντέλα ηλεκτρομηχανικών γυροπυξίδων μπορεί να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος ενεργοποίησης, καθόσον μπορούμε να επέμβουμε στη διαδικασία ενεργοποίησης του γυροσκοπίου, συντομευοντάς τον στην τάξη της μίας ώρας μόνο. Μάλιστα, στις ψηφιακές γυροσκοπικές πυξίδες που συζητούνται ακολούθως η επιλογή αυτή έχει υιοθετηθεί πολλές φορές και ως βασική κατασκευαστική επιλογή, χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση. Έτσι, η διαθεσιμότητα των συστημάτων αυτών λαμβάνει πάντα χώρα σε χρονικό διάστημα περίπου μίας ώρας από την ενεργοποίησή τους.

## 7.7 Σφάλματα των γυροσκοπικών πυξίδων

Κάθε γυροσκοπική πυξίδα, από τη σταθεροποίησή της παράλληλα με τον μεσημβρινό του τόπου και έπειτα, υποδεικνύει με ακρίβεια την κατεύθυνση του αληθούς Βορρά. Λόγω της κινήσεως του πλοίου και επειδή υπόκειται διαρκώς σε μηχανικές καταπονήσεις, η ακρίβεια του προσανατολισμού μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Αυτά τα εμφανιζόμενα σφάλματα παίρνουν την ονομασία τους από τον παράγοντα ή τους παράγοντες που τα προκαλούν και είναι αντίστοιχα τα εξής:

1) Σφάλμα πλάτους ή αποσβέσεως, το οποίο έχει ήδη αναλυθεί και δεν θα συζητηθεί επί πλέον.

2) Σφάλμα πλάτους, ταχύτητας και πορείας (latitude, speed and course error).

3) Σφάλμα βαλλιστικής εκτροπής ballistic deflection error).

4) Σφάλμα διατοιχισμών του πλοίου.

Με δεδομένο ότι τα αίτια των σφαλμάτων είναι γνωστά, είναι δυνατό να προϋπολογίζονται, ώστε να απαλείφονται είτε με διόρθωση κατά τη χρησιμοποίηση των ενδείξεων της πυξίδας, είτε με αντιστάθμιση μέσω ειδικών κατασκευαστικών διατάξεων. Το σφάλμα πλάτους ή αποσβέσεως εμφανίζεται μόνο στις πυξίδες που χρησιμοποιούν έναν γυροσφόνδυλο και έκκεντρη στήριξη του στοιχείου ελέγχου. Τα υπόλοιπα σφάλματα εμφανίζονται σε όλους τους τύπους των γυροσκοπικών πυξίδων.

### 1) Σφάλμα πλάτους, ταχύτητας και πορείας.

Το σφάλμα αυτό εμφανίζεται επειδή ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου της γυροσκοπικής πυξίδας έχει την ιδιότητα να σταθεροποιείται σε διεύθυνση κάθετη προς τη συνισταμένη των

κινήσεών του στον χώρο. Εξαιτίας αυτών των κινήσεων ο άξονας εκτρέπεται από την κατεύθυνση της μεσημβρινής γραμμής κατά μία μικρή γωνία. Ας θεωρήσουμε ότι το πλοίο με τη γυροσκοπική του πυξίδα βρίσκεται ακίνητο σε τόπο Α στον Ισημερινό. Τότε, λόγω της περιστροφής της Γης, το πλοίο (μαζί του και η πυξίδα) κινείται στον χώρο με γωνιακή ταχύτητα  $15^{\circ} 2,5'$  ή  $902,5'$ , οπότε η γραμμική του ταχύτητα ΑΒ είναι  $902,5$  ν.μ. ανά ώρα και έχει φορά προς ανατολάς. Αφού το πλοίο είναι κρατημένο, δεν υπόκειται σε άλλη κίνηση, εκτός από την παραπάνω. Έτσι, ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου σταθεροποιείται κάθετα προς την κίνηση αυτή, δηλαδή την κατεύθυνση Απηνλιώτη, επομένως και παράλληλα προς τη μεσημβρινή γραμμή. Επομένως, δεν υπάρχει σφάλμα. Αν όμως το πλοίο, ενώ βρίσκεται στον Ισημερινό, κινείται με πορεία προς Βορρά και ταχύτητα ΑΓ, τότε αυτό θα κινείται στον χώρο με τη γραμμική ταχύτητα ΑΔ, δηλαδή τη συνισταμένη των γραμμικών ταχυτήτων ΑΒ λόγω της περιστροφής της Γης και ΑΓ λόγω της δικής του κινήσεως. Έτσι, ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου, που θα σταθεροποιηθεί κάθετα προς τη συνισταμένη ΑΔ και συνεπώς παράλληλα προς την ΑΕ, θα σχηματίσει με τη μεσημβρινή γραμμή τη γωνία ΕΑΓ, που είναι το σφάλμα δ. Το σφάλμα έχει δυτική έννοια. Δηλαδή το σφάλμα  $\delta = \text{ΕΑΓ} = \Delta \text{ΑΒ}$ , επειδή οι συγκεκριμένες γωνίες έχουν τις πλευρές τους κάθετες. Από το ορθογώνιο τρίγωνο ΔΑΒ, έχουμε:

$$\begin{aligned} \text{Tan}(\delta) &= \text{ΒΔ}/\text{ΑΒ} = \text{ΑΓ}/\text{ΑΒ} = \\ &= \text{ταχύτητα πλοίου}/902,5. \end{aligned}$$

Αν όμως το πλοίο κινείται σ' ένα βόρειο ή νότιο πλάτος φ, με την ίδια πορεία προς Βορρά και την ίδια ταχύτητα ΑΓ, το σφάλμα δ θα είναι μεγαλύτερο. Αυτό συμβαίνει διότι η γραμμική ταχύτητα λόγω της περιστροφής της Γης είναι μικρότερη από την περίπτωση στον Ισημερινό και είναι πάντα ίση με  $902,5 \times \text{Cos}\phi$  μίλια ανά ώρα, όπου φ είναι το πλάτος όπου βρίσκεται το πλοίο. Έτσι, η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\text{Tan}(\delta) = \text{ταχύτητα πλοίου}/902,5 \square \text{Cos}(\phi)$$

και ισχύει για οποιοδήποτε πλάτος.

Στο σχήμα είναι επίσης εμφανές ότι, όταν το πλοίο κινείται με πορεία προς Βορρά, το σφάλμα δ είναι δυτικής έννοιας τόσο σε βόρειο, όσο και σε νότιο πλάτος, ενώ όταν κινείται με πορεία προς Νότιο το σφάλμα δ είναι ανατολικής έννοιας. Βέβαια, αν το πλοίο κινείται με πορείες προς Απηνλιώτη ( $90^{\circ}$ ) ή Ζέφυρο ( $270^{\circ}$ ), δηλαδή επί παραλλήλου, η συνισταμένη των δύο γραμμικών ταχυτήτων, που θα είναι συγγραμμικές, έχει την κατεύθυνση Απηνλιώτη. Δεν υπάρχει σφάλμα ταχύτητας, αφού ο άξονας περιστροφής του σφονδύλου σταθεροποιείται κάθετα σ' αυτήν. Σε οποιαδήποτε ενδιάμεση πορεία το σφάλμα υπάρχει, αλλά η τιμή του γίνεται μικρότερη από τις



δύο περιπτώσεις που το πλοίο κινείται με πορεία προς Βορρά (0ο ) ή προς Νότο (180ο ), ενώ ελαττώνεται συνεχώς όσο η πορεία του πλοίου πλησιάζει τις 90ο ή τις 270ο .

Για να συμπληρωθεί η παραπάνω μαθηματική σχέση, ώστε να ισχύει και για οποιαδήποτε πορεία, σκεπτόμαστε ως εξής: Η ταχύτητα του πλοίου, ανάλογα με την πορεία που αυτό ακολουθεί, αναλύεται σε μια συνιστώσα προς Βορρά ή Νότο, που είναι και η βασική αιτία σφάλματος και σε μία άλλη συνιστώσα προς Απηλιώτη ή Ζέφυρο, που ελάχιστα επηρεάζει την τιμή του σφάλματος. Έτσι, η προς Απηλιώτη ωριαία μετακίνηση του πλοίου είναι:

$$AB=902,5 \square \text{Cos}(\varphi) \pm \text{ταχύτητα πλοίου} \square \text{Sin}(Z\lambda)$$

όπου ο όρος  $Z\lambda$  αναπαριστά την αληθή πορεία του πλοίου.

Ο όρος ταχύτητα πλοίου  $\square \text{Sin}(Z\lambda)$  είναι θετικός για ανατολικές πορείες και αρνητικός για δυτικές, οπότε η προηγούμενη σχέση παίρνει τη μορφή:

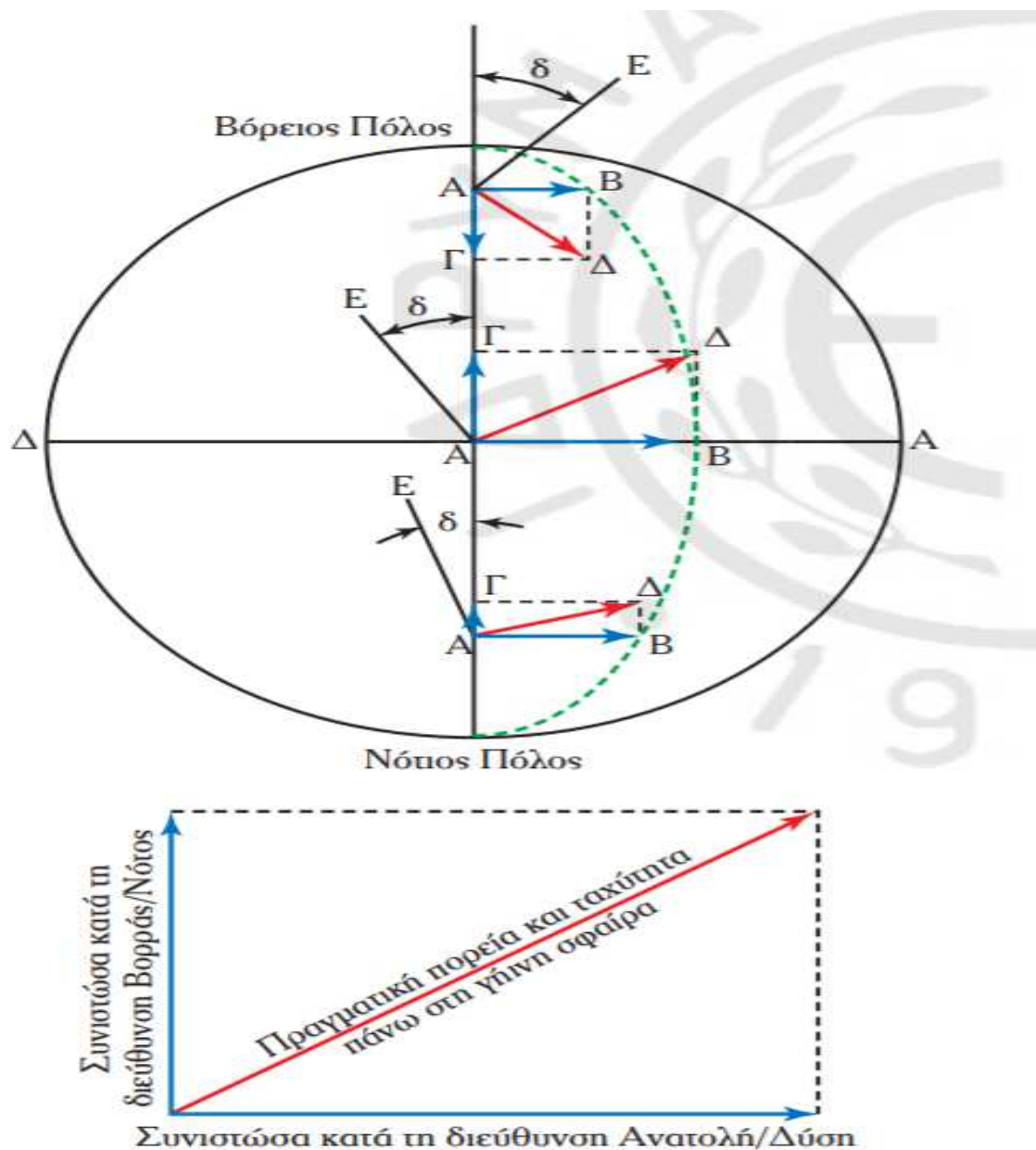
$$\text{Tan}(\delta)=\text{ταχύτητα πλοίου} \square \text{Cos}(Z\lambda)/902,5 \square$$

$$\text{Cos}(\varphi) \pm \text{ταχύτητα πλοίου} \square \text{Sin}(Z\lambda).$$

Επειδή ο όρος ταχύτητα πλοίου  $\square \text{Sin}(Z\lambda)$  είναι αμελητέος σε σχέση με τον όρο  $902,5 \square \text{Cos}(\varphi)$  για πλάτη μικρότερα από 70ο , παραλείπεται χωρίς να αλλοιώνεται αισθητά η τιμή του σφάλματος [τιμή της  $\text{Tan}(\delta)$ ], οπότε τελικά έχουμε:

$$\text{Tan}(\delta)=\text{ταχύτητα πλοίου} \square$$

$$\text{Cos}(Z\lambda)/902,5 \square \text{Cos}(\varphi).$$



Εικόνα 51 Ο άξονας σταθεροποιείται κάθετα στη συνισταμένη των κινήσεων του γυροσκοπίου στον χώρο. Στις συνηθισμένες ταχύτητες των εμπορικών πλοίων, το σφάλμα  $\delta$  παίρνει πολύ μικρές τιμές. Για την περίπτωση αυτή ισχύει ότι η εφαπτομένη μικρής γωνίας είναι περίπου ίση με το αντίστοιχο τόξο. Οπότε διαιρώντας την εφαπτομένη με τον όρο  $57,3 \square \text{ Τα- η}(\delta)$  μετατρέπεται σε μοίρες ( $\delta_0$ ) και έχουμε:

$$\delta_0 = 57,3 \square \text{ ταχύτητα πλοίου} \square$$

$$\text{Cos}(Z\lambda) / 902,5 \square \text{ Cos}(\varphi)$$

$$\text{ή } \delta = 0,0635 \square \text{ ταχύτητα πλοίου} \square \text{ Cos}(Z\lambda) \square \text{ Cos}^{-1}(\varphi).$$

Με τη βοήθεια της σχέσεως αυτής συμπεραίνομε ότι το σφάλμα μηδενίζεται όταν:

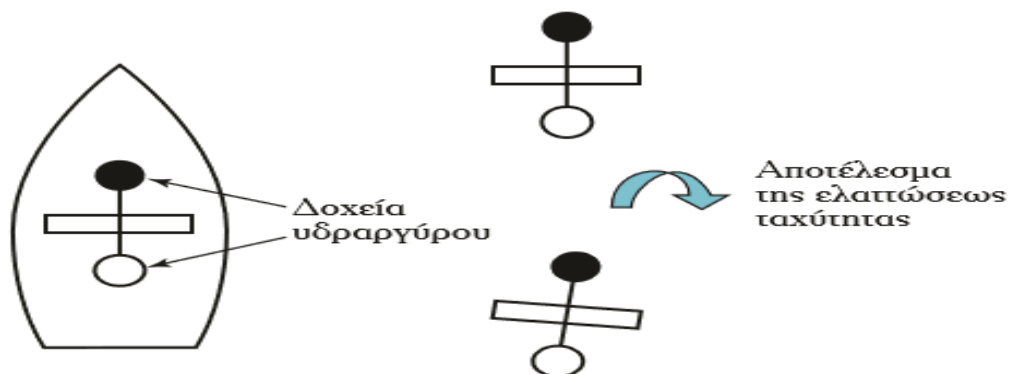
1) Το πλοίο είναι ακίνητο.

2) Το πλοίο πλέει με πορεία Απηλιώτης (90ο ) ή Ζέφυρο (2.700ο ) [γιατί μηδενίζεται ο συντελεστής  $\text{Cos}(Z\lambda)$ ]. Τέλος, όσον αφορά στην έννοια του σφάλματος, αυτή, ανεξάρτητα από το πλάτος στο οποίο πλέει το πλοίο, για βόρειες πορείες (πρώτο και τέταρτο τεταρτοκύκλιο) είναι δυτική, ενώ για νότιες (δεύτερο και τρίτο τεταρτοκύκλιο) είναι ανατολική.

## 2) Σφάλματα βαλλιστικής εκτροπής.

Το σφάλμα αυτό παρατηρείται όταν το πλοίο εκτελεί ταχείες αλλαγές πορείας/ταχύτητας. Η μεταβολή της συνιστώσας της ταχύτητας του πλοίου κατά τη διεύθυνση Βορρά-Νότου, έχει ως αποτέλεσμα τη μετάγγιση υδραργύρου στα συγκοινωνούντα δοχεία του στοιχείου ελέγχου των γυροπυξίδων τύπου Sperry, λόγω αδράνειας. Για τον ίδιο λόγο, μετατοπίζεται κατά μήκος του Μεσημβρινού και το βαρύτερο κάτω ημισφαίριο της γυρόσφαιρας της γυροπυξίδας τύπου Anschutz, που συμπεριφέρεται ως αιωρούμενο βάρος. Στο σχήμα παρουσιάζεται το ανατολικό σφάλμα που δημιουργείται όταν έχουμε ελάττωση της ταχύτητας. Τόσο η μετάγγιση υδραργύρου, όσο και η μετατόπιση του αιωρούμενου βάρους, προκαλούν μια πρόσκαιρη μετάπτωση, με τον άξονα περιστροφής του σφονδύλου να εκτρέπεται κατά μία μικρή γωνία από την αρχική κατεύθυνση που είχε σταθεροποιηθεί σε σχέση με τον Βορρά. Η μικρή αυτή γωνία ονομάζεται σφάλμα βαλλιστικής εκτροπής. Το σφάλμα αυτό εμφανίζεται στις ενδείξεις της πυξίδας και ελαττώνεται σιγά-σιγά με τη μορφή αποσβενουμένων ταλαντώσεων, από τη στιγμή που θα αποκατασταθεί η νέα ταχύτητα ή η πορεία του πλοίου. Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, αμέσως μετά την αλλαγή της ταχύτητας ή της πορείας πρέπει να ρυθμίζεται κατάλληλα και ο διορθωτής πλάτους ταχύτητας και πορείας –στις πυξίδες που υπάρχει τέτοιος– στη νέα ένδειξη αυτών. Είναι ευνόητο ότι χειροκίνητα η συγκεκριμένη διαδικασία είναι αρκετά επίπονη. Σε κάθε περίπτωση, στα νεότερα μοντέλα του τύπου και ειδικά τις ψηφιακές γυροσκοπικές πυξίδες η λύση της κατευθείαν διασυνδέσεως με τα άλλα ηλεκτρονικά συστήματα υποστηρίξεως της εκτελέσεως της ναυσιπλοΐας (π.χ. το δρομόμετρο ή το GPS) επιτρέπει την εκτέλεση αυτών των διορθώσεων χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Πρέπει να αναδειχθεί ότι τα δύο προαναφερόμενα σφάλματα της βαλλιστικής εκτροπής και της διαφοράς σφάλματος πλάτους, ταχύτητας και πορείας, έχουν αντίθετο πρόσημο και το ένα τείνει να εξουδετερώσει το άλλο. Επειδή αυτά έχουν ίδια περίπου τιμή και διάρκεια, παρατηρείται ικανοποιητική αλληλεξουδετέρωσή τους και οι ενδείξεις της πυξίδας είναι στην πράξη ικανοποιητικά σωστές, ακόμα και γι' αυτές που είναι αρκετά παρωχημένης κατασκευής. Τέλος, ο περιορισμός του σφάλματος βαλλιστικής εκτροπής μπορεί να επιτευχθεί και μέσω των ειδικών κατασκευαστικών διατάξεων των πυξίδων. Αυτές

περιορίζουν τη δραστηριότητα του μεταγγιζόμενου υδραργύρου ή του μετακινούμενου κατά μήκος του μεσημβρινού αιωρούμενου βάρους.



Εικόνα 52 Το σφάλμα της βαλλιστικής εκτροπής.

### 3) Σφάλματα που δημιουργούνται από τον προνευστασμό και διατοιχισμό του πλοίου.

Στην περίπτωση εντόνων προνευστασμών και διατοιχισμών, αρχίζει να αιωρείται και το ευαίσθητο στοιχείο (γυροσκόπιο ή γυροσφαίρα) της γυροσκοπικής πυξίδας. Οι αιωρήσεις αυτές καθίστανται η αιτία δημιουργίας δύο σφαλμάτων. Το πρώτο σφάλμα παρουσιάζεται επειδή το αιωρούμενο ευαίσθητο στοιχείο μετατρέπεται σε εκκρεμές και τείνει να ταυτίσει το κατακόρυφο επίπεδο της μάζας του με το επίπεδο αιωρήσεως (νόμος του εκκρεμούς). Επειδή στο γυροσκόπιο το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο του γυροσφονδύλου του, που είναι κάθετο στη διεύθυνση του άξονα περιστροφής, οι αιωρήσεις του πλοίου εκτρέπουν τον άξονα από τη διεύθυνση σταθεροποίησής του. Η εκτροπή αυτή μηδενίζεται στις πορείες προς Βορρά, Νότο, Απληιώτη και Ζέφυρο, γιατί σ' αυτές το επίπεδο της μάζας του γυροσφονδύλου είναι παράλληλο ή κάθετο με το επίπεδο αιωρήσεως. Στις ενδιάμεσες πορείες 45ο, 135ο, 225ο και 315ο το σφάλμα παίρνει τη μέγιστη τιμή του και το πρόσημό του εναλλάσσεται από τεταρτοκύκλιο σε τεταρτοκύκλιο. Για αυτό το σφάλμα ονομάζεται και σφάλμα διατοιχισμών ενδιάμεσων πορειών (intercardinal rolling error) ή τεταρτοκυκλικό σφάλμα (quadrantal error).

Για να περιορισθεί το σφάλμα αυτό στο ελάχιστο δυνατό, κατά την κατασκευή της πυξίδας λαμβάνονται τα εξής μέτρα:

1) Στα γυροσκόπια των πυξίδων τοποθετούνται τα λεγόμενα αντισταθμιστικά βάρη κατά τρόπο, ώστε αυτό να διαθέτει την ίδια μάζα σε όλα τα κατακόρυφα επίπεδά του (να μοιάζει σαν σφαίρα). Έτσι, και αν ακόμα το πλοίο αιωρείται, δεν υπάρχει κατακόρυφο επίπεδο με μεγαλύτερη μάζα, που να τείνει να ταυτιστεί με το επίπεδο αιωρήσεως.

2) Οι πυξίδες αναρτώνται στη θήκη τους με ανάρτηση (διπλή εξάρτηση), ώστε οι αιωρήσεις του πλοίου να μην φθάνουν στην πυξίδα.

3) Οι πυξίδες φέρουν αποσβεστήρες προνευστασμών και διατοιχισμών, οι οποίοι δεν επιτρέπουν στις αιωρήσεις να πάρουν μεγάλο πλάτος, λόγω των ατελειών των τριβέων της καρντάνιας αναρτήσεως.

4) Το σημείο εγκατάστασης της πυξίδας στο πλοίο επιλέγεται, ώστε οι αιωρήσεις του Cardan να παίρνουν το μικρότερο δυνατό πλάτος. Αυτός είναι ο λόγος που η κύρια μονάδα της γυροπυξίδας μας βρίσκεται σ' ένα από τα κατώτερα καταστρώματα του πλοίου.

Το δεύτερο σφάλμα οφείλεται στη μετάγγιση υδραργύρου στα συγκοινωνούντα δοχεία του στοιχείου ελέγχου. Σε πορείες προς Βορρά ή Νότο, η μετάγγιση υδραργύρου είναι ασήμαντη, επειδή το επίπεδο αιωρήσεως είναι κάθετο στους σωληνίσκους των συγκοινωνούντων δοχείων. Έτσι και το σφάλμα είναι ασήμαντο. Σε πορείες προς Απηλιώτη ή Ζέφυρο υπάρχει ένα μικρό σφάλμα, αν η περίοδος αιωρήσεως είναι μικρή, αλλά και αυτό εξουδετερώνεται, επειδή σε κάθε αιώρηση παρουσιάζεται σφάλμα ίσων τιμών και αντίθετης έννοιας. Στις ενδιάμεσες όμως πορείες και ειδικά όταν οι αιωρήσεις δεν είναι συμμετρικές, η μετάγγιση υδραργύρου δεν είναι ισομερής και προκαλείται σφάλμα. Στις πυξίδες που χρησιμοποιούν έναν σφόνδυλο, το σφάλμα περιορίζεται με την προσθήκη βαρών στο επάνω μέρος των δοχείων του υδραργύρου. Έτσι, όταν μεταγγίζεται υδράργυρος κατά τους διατοιχισμούς, χωρίς να έχει πάρει κλίση ο άξονας περιστροφής του γυροσφονδύλου, τα δοχεία που περιέχουν μικρότερη ποσότητα υδραργύρου γίνονται βαρύτερα στο επάνω μέρος και προκαλούν δύναμη αντίθετης φοράς, από εκείνη που προκαλεί ο μεταγγιζόμενος υδράργυρος.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο

### – ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΠΥΞΙΔΕΣ ΚΑΙ ΠΥΞΙΔΕΣ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΦΩΤΩΣ (LASER) ΜΕ ΟΠΤΙΚΟ ΔΑΚΤΥΛΙΟ Ή ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ

Η αρχή λειτουργίας των γυροσκοπικών πυξίδων αναλύθηκε παραπάνω. Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε εκτενέστερα σε δύο σύγχρονους τύπους γυροπυξίδων, την ψηφιακή γυροσκοπική πυξίδα και την πυξίδα εξαναγκασμένης εκπομπής φωτός. Η πρώτη διαθέτει ηλεκτρομηχανικό γυροσκόπιο, ενώ η δεύτερη γυροσκόπιο laser. Και στις δύο περιπτώσεις, ο ευαίσθητος γυροσκοπικός μηχανισμός είναι τοποθετημένος μέσα σε κλειστό μεταλλικό κλωβό. Η διάταξη αυτή διαθέτει επί πλέον εξωτερικό ανεμολόγιο και αποτελεί την κύρια μονάδα πυξίδας.

Εκτός από την κύρια μονάδα πυξίδας, οι συσκευές αυτές διαθέτουν τις ακόλουθες μονάδες:

α) Έναν ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή, ο οποίος ελέγχει τη λειτουργία της πυξίδας, εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς, αποθηκεύει τα αποτελέσματά τους και διαχειρίζεται τα σήματα εισόδου και εξόδου της πυξίδας.

β) Μία ή περισσότερες κονσόλες χειρισμού και ελέγχου (operator unit), μέσω των οποίων είναι δυνατή η αλληλεπίδραση με τον χρήστη.

γ) Μία μονάδα διασυνδέσεων (distribution unit), μέσω της οποίας εκτελείται η διακίνηση του συνόλου των δεδομένων από και προς την πυξίδα. Παρέχεται έτσι η δυνατότητα ζεύξεως δεδομένων της πυξίδας με πλήθος συσκευών ή συστημάτων, όπως οι επαναλήπτες γυροπυξίδας (compass repeaters), τα αυτόματα πηδάκια, οι πορειογράφοι, οι κονσόλες Radar/ARPA, το

ECDIS, το AIS, καθώς και τα τακτικά συστήματα και συστήματα διευθύνσεως βολής των πολεμικών πλοίων.



Διακρίνεται η (εγκιβωτισμένη) κύρια μονάδα πυξίδας μαζί με το εξωτερικό ανεμολόγιό της. Δεν απεικονίζεται η κονσόλα ελέγχου με την ψηφιακή της οθόνη.

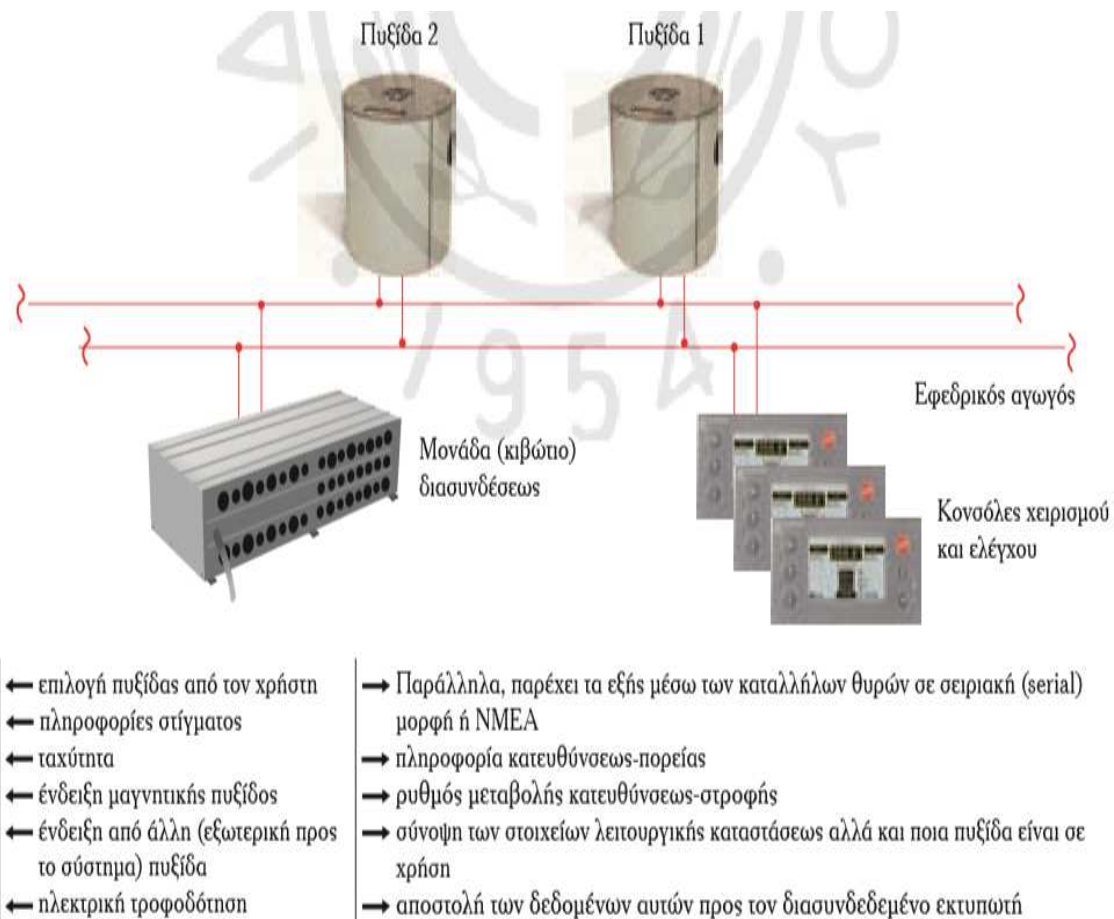


(α) Κονσόλα χειρισμού και ελέγχου (β) μονάδα διασυνδέσεως και (γ) επαναλήπτης.

## 8.1 Οι ψηφιακές γυροσκοπικές πυξίδες

Η αρχή λειτουργίας της πυξίδας αυτής είναι εκείνη του ηλεκτρομηχανικού γυροσκοπίου. Από εκεί και πέρα η πυξίδα αυτή διαφοροποιείται πλήρως από την κλασική αναλογική γυροπυξίδα, χάρη στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα που διαθέτει, με κυριότερα τον μικροεπεξεργαστή και την κονσόλα ελέγχου χειρισμού. Με τη βοήθεια των συγχρόνων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που διαθέτει, η πληροφορία της πορείας είναι εξαιρετικά ακριβής, η ανανέωσή της ταχύτατη και η διαθεσιμότητά της διαρκής στα διασυνδεδεμένα με αυτήν ηλεκτρονικά όργανα ή συστήματα.

Η μέγιστη αξιοποίηση της ψηφιακής τεχνολογίας επιτυγχάνεται όμως εάν αντί του ενός γυροσκοπικού μηχανισμού, χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα τρεις. Στην περίπτωση αυτή, εξάγεται η πληροφορία της πορείας σε τριαξονικό σύστημα συντεταγμένων, ενώ μέσω του μικροεπεξεργαστή υπολογίζεται άμεσα και ο ρυθμός μεταβολής της πορείας (δηλαδή της πρώτης παραγώγου) σε κάθε άξονα. Η πληροφορία του ρυθμού μεταβολής της πορείας είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι παραπέμπει στο πόσο γρήγορα αλλάζει πορεία (στρέφει) ένα πλοίο που χειρίζεται. Για τον λόγο αυτόν αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένο στα συστήματα AIS και ECDIS, καθώς και σε κάθε σύστημα που επιχειρεί την πρόβλεψη της τροχιάς ενός κινούμενου πλοίου. Η ευχέρεια διασυνδέσεως της ψηφιακής γυροσκοπικής πυξίδας με έτερες συσκευές ή συστήματα, προάγεται περαιτέρω με τη χρήση τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων ζεύξεως δεδομένων, όπως τα πρωτόκολλα 0183 και το 2000 του Εθνικού Οργανισμού Ναυτικών Ηλεκτρονικών (National Marine Electronics Association 0183 και 2000–NMEA 0183 και NMEA 2000). Πέραν της ενσύρματης – καλωδιακής ζεύξεως, αρκετοί τύποι πυξίδων παρέχουν και τη δυνατότητα ασύρματης ζεύξεως δεδομένων με πρωτόκολλα όπως το Wi – fi και το bluetooth. Καθίσταται έτσι εφικτή η μετάδοση των στοιχείων της πορείας και του ρυθμού στροφής σε φορητούς υπολογιστές ή tablets. Πέραν των πλεονεκτημάτων που προαναφέρθηκαν, οι ψηφιακές γυροπυξίδες διαθέτουν αυτοματοποιημένη διαδικασία εντοπισμού και αποκαταστάσεως βλαβών. Στο σχήμα, παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό μοντέλο ψηφιακής γυροσκοπικής πυξίδας. Στη μονάδα διασυνδέσεως διακρίνονται με βέλη τόσο τα δεδομένα εισόδου όσο και τα δεδομένα εξόδου στην πυξίδα. Στο εικονιζόμενο μοντέλο χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα δύο κύριες μονάδες πυξίδας, ώστε το σύστημα που προκύπτει να διαθέτει αυξημένη αντοχή σε βλάβες. Επιπλέον, το σύστημα αυτό είναι συζευγμένο ταυτόχρονα σε δύο δίκτυα ανταλλαγής δεδομένων.



Εικόνα 54 Σύστημα ψηφιακής γυροπυξίδας.

## 8.2 Γυροσκοπικές πυξίδες laser με οπτικό δακτύλιο ή περιέλιξη οπτικής ίνας

Οι γυροπυξίδες αυτές διαθέτουν φωτογυροσκόπιο. Κατ' αναλογία με τις ψηφιακές γυροσκοπικές πυξίδες, με την ταυτόχρονη χρήση τριών φωτογυροσκοπίων, εξάγεται η πληροφορία της πορείας σε τριαξονικό σύστημα συντεταγμένων, ενώ μέσω του μικροεπεξεργαστή υπολογίζεται άμεσα και ο ρυθμός μεταβολής της πορείας σε κάθε άξονα. Στο



Εικόνα 55 Ενσωμάτωση τριών φωτογυροσκοπίων σε σύστημα αξόνων.

σχήμα απεικονίζεται ένα σύγχρονο σύστημα γυροπυξίδας laser. Οι υπομονάδες της πυξίδας αυτής έχουν παρόμοιες ονομασίες και εκτελούν κοινές λειτουργίες με τις αντίστοιχες της ψηφιακής γυροπυξίδας. Δηλαδή, η κονσόλα χειρισμού και ελέγχου αναφέρεται στο σχήμα ως οθόνη απεικόνισης και μονάδα ελέγχου, ενώ η μονάδα διασυνδέσεως αναφέρεται στο σχήμα ως κιβώτιο (μονάδα) διασυνδέσεως και ηλεκτρικής τροφοδοτήσεως. Στο σχήμα αυτό φαίνεται επίσης η ευχέρεια διασυνδέσεως που παρέχει στην πυξίδα η ψηφιακή τεχνολογία. Αριστερά της μονάδας διασυνδέσεως διακρίνονται με βέλη τα δεδομένα εισόδου, ενώ στα δεξιά της τα δεδομένα εξόδου από την πυξίδα.

Παρά την κοινή ψηφιακή τεχνολογία, η διαφορά στην αρχή λειτουργίας του φωτογυροσκοπίου κάνει τις γυροπυξίδες laser να υπερέχουν των αντιστοίχων ηλεκτρομηχανικών γυροσκοπικών, στα ακόλουθα σημεία:

- 1) Αποτελούν στιβαρές κατασκευές, απαλλαγμένες από τις αστάθειες των μηχανικών μερών των ηλεκτρομηχανικών γυροσκοπικών πυξίδων.
- 2) Διαθέτουν μικρό βάρος, διαστάσεις και όγκο. Έτσι, μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε τύπο πλοίου, ειδικά σε σκάφη που αναπτύσσουν εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες (high speed vessels).
- 3) Παρέχουν στοιχεία πορείας, ταχύτητας και επιταχύνσεως μεγάλης ακρίβειας.
- 4) Είναι σχεδόν άμεσα επιχειρησιακά διαθέσιμες, με πάρα πολύ μικρό χρόνο ενεργοποίησης, και
- 5) συνδυάζονται με αδρανειακά συστήματα ναυτιλίας, που επιτρέπουν την παροχή και ακριβούς πληροφορίας στίγματος, μέσω αναμετρήσεως.

Οι παραπάνω λόγοι επεξηγούν την αύξουσα δημοφιλία τους, που έχει ήδη οδηγήσει στην αυξημένη παρουσία τους στις γέφυρες των συγχρόνων πλοίων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο

### – ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΠΥΞΙΔΕΣ

Οι δορυφορικές πυξίδες αποτελούν συστήματα προσδιορισμού της κατεύθυνσεως του πλοίου με την αξιοποίηση των δυνατοτήτων των δορυφορικών συστημάτων προσδιορισμού θέσεως GNSS. Η βασική γενική αρχή λειτουργίας των δορυφορικών πυξίδων είναι καταρχάς πολύ απλή: Αν σε δύο σημεία του σκάφους τοποθετηθούν δύο κεραίες/δέκτες GPS/ GNSS και προσδιοριστεί η θέση τους με πολύ μεγάλη ακρίβεια, τότε μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η διεύθυνση της γραμμής που ορίζεται από τα δύο αυτά σημεία. Στην πράξη, η παραπάνω βασική γενική αρχή λειτουργίας των δορυφορικών πυξίδων υλοποιείται με τη χρησιμοποίηση εξελιγμένων και πολυπλόκων τεχνικών επεξεργασίας σήματος, η αναλυτική περιγραφή των οποίων είναι εκτός του σκοπού του παρόντος εγχειριδίου. Η βασική τεχνική που χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτό είναι η μέθοδος δορυφορικού προσδιορισμού θέσεως εκατοστομετρικής ακρίβειας GNSS/RTK (Real-Time Kinematics).



Η διεύθυνση της γραμμής ΑΒ προκύπτει από τον ακριβή προσδιορισμό των θέσεων των σημείων Α και Β με τη λήψη και επεξεργασία δορυφορικών σημάτων.

*Εικόνα 56 Βασική αρχή προσδιορισμού διευσθύνσεως με δορυφορική πυξίδα.*

Για τον προσδιορισμό της κατευθύνσεως του σκάφους με μία δορυφορική πυξίδα χρησιμοποιείται σύνθετη διάταξη, δύο ή τριών συνήθως κεραιών λήψεως δορυφορικών σημάτων GPS/GNSS. Η διάταξη των τριών

κεραιών-δεκτών GPS/, εξασφαλίζει ακρίβεια μετρήσεως της πορείας στους τρεις άξονες του χώρου, της τάξεως των εκατοστών της

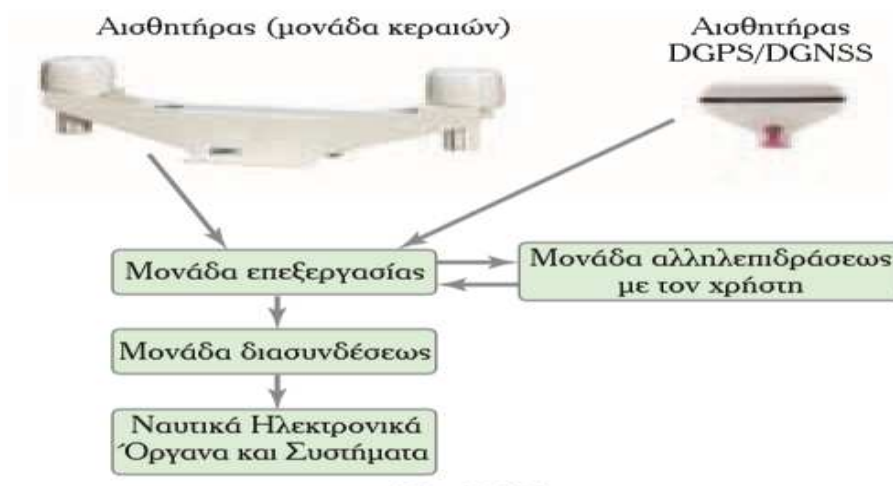
μοίρας. Με τη βοήθεια του ενσωματωμένου μικροεπεξεργαστή, εκτελείται επίσης άμεσος υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής της πορείας σε κάθε άξονα. Αναφορικά με τον ρυθμό στροφής ως προς τον κατακόρυφο άξονα, δηλαδή τον ρυθμό μεταβολής της πορείας, η δορυφορική πυξίδα μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια ρυθμούς που υπερβαίνουν τις 20°/s.

Οι βασικότερες μονάδες από τις οποίες αποτελείται ένα τυπικό σύστημα δορυφορικής πυξίδας είναι η μονάδα (αισθητήρας) των κεραιών λήψεως των δορυφορικών σημάτων GPS/GNSS, η μονάδα επεξεργασίας, η μονάδα αλληλεπιδράσεως με τον χρήστη, και η μονάδα διασυνδέσεως με άλλα Ναυτικά Ηλεκτρονικά Όργανα και Συστήματα (π.χ. ECDIS και AIS, το Radar/ARPA, το δρομόμετρο, διάφορους ψηφιακούς ενδείκτες και κονσόλες Ολοκληρωμένων Συστημάτων Γέφυρας).





Εικόνα 57 Τυπικοί αισθητήρες (μονάδες κεραιών) δορυφορικής πυξίδας.



Εικόνα 58 Τυπική σύνθεση-διασύνδεση συστήματος δορυφορικής κεραίας.

Στο σχήμα φαίνεται μία τυπική μονάδα αλληλεπίδρασης με τον χρήστη (μονάδα απεικόνισης και χειρισμού σύγχρονης δορυφορικής πυξίδας).



Εικόνα 59 Τυπική μονάδα απεικόνισης και χειρισμού δορυφορικής πυξίδας (μονάδα αλληλεπίδρασης με τον χρήστη).



Ο περιορισμός για τη λειτουργία της δορυφορικής πυξίδας είναι ότι απαιτεί εύλογα την απρόσκοπτη διαθεσιμότητα ενός ΔΣΠΣ και μάλιστα την διαθεσιμότητα τουλάχιστον πέντε διαφορετικών δορυφορικών σημάτων. Εν τούτοις, στην περίπτωση προσωρινής απώλειας των σημάτων αυτών, η δορυφορική πυξίδα εξακολουθεί να παρέχει ακριβείς τιμές πορείας για αρκετά δευτερόλεπτα, με τη βοήθεια γυροσκοπικών αδρανειακών μηχανισμών που διαθέτει. Οι μηχανισμοί αυτοί αποδεικνύονται ιδιαίτερα ωφέλιμοι διότι συνδυάζοντάς τους με την κεραία A3, επιτυγχάνεται απαλοιφή από το σύστημα εξισώσεων, των μεταβλητών του προνευστασμού και του διατοιχισμού. Με δεδομένη όμως τη διαθεσιμότητα των δορυφορικών συστημάτων προσδιορισμού θέσεως GNSS, οι δορυφορικές πυξίδες υπερτερούν έναντι των άλλων ναυτικών πυξίδων που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο, για τους παρακάτω λόγους: 1) Δεν επηρεάζονται από μαγνητικά πεδία ή μεταλλικά αντικείμενα, όπως οι μαγνητικές πυξίδες. 2) Δεν διαθέτουν κινούμενα ηλεκτρομηχανικά μέρη, όπως οι γυροσκοπικές πυξίδες, τα οποία είναι επιρρεπή σε βλάβες. 3) Αποτελούν κατασκευές μικρού βάρους και εξαιρετικής αντοχής, και 4) παρέχουν σε δευτερόλεπτα από την ενεργοποίησή τους εξαιρετική ακρίβεια μετρήσεων και ταχύτατη απόκριση στις μεταβολές πορείας.

Επισημαίνεται ότι η επικρατέστερη πρακτική για τον αξιόπιστο εξοπλισμό των συγχρόνων πλοίων με ηλεκτρονικά ναυτικά όργανα και συστήματα είναι η εγκατάσταση διαφορετικών τύπων πυξίδων και η κατά περίπτωση χρησιμοποίηση της πλέον αξιόπιστης πληροφορίας.

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έπειτα από τόσα χρόνια εξέλιξης οι πυξίδες έχουν φτάσει σε τρομερό επίπεδο ακρίβειας. Ο ναυτικός όμως παρόλα αυτά δεν έχει το περιθώριο να επαναπαύεται, θα πρέπει να πραγματοποιούνται συστηματικοί έλεγχοι ανεξάρτητα με τον τύπο πυξίδας που φέρει το πλοίο του. Επίσης είναι πολύ σημαντικό να μην αγνοούνται οι οδηγίες των κατασκευαστών περί ασφαλούς χρήσης, ελέγχου και συντήρησης. Πολλές φορές αυτές οι οδηγίες αγνοούνται τελείως λόγω έλλειψης εκπαίδευσης ή άγνοιας, στην χειρότερη περίπτωση όμως παραμελούνται λόγω υψηλού κόστους ανταλλακτικών και έτσι τίθεται σε κίνδυνο η ανθρώπινη ζωή στη θάλασσα.

Θα ήταν λοιπόν φρόνιμο να πραγματοποιεί ο ναυτικός πάντοτε μια διασταύρωση στοιχείων (μια σύγκριση δηλαδή των ψηφιακών πληροφοριών με αυτές που βλέπει με το μάτι) καθώς και να υπάρχει πάντοτε μια εναλλακτική λύση. Οι εναλλακτικές λύσεις μπορούν να είναι είτε:

α) μέθοδοι εφεδρικής παροχής ενέργειας ( για αποφυγή απώλειας πορείας λόγω blackout) ,

β) Ύπαρξη ανταλλακτικών σε ετοιμότητα πάνω στο πλοίο για γρήγορη επισκευή από τον ηλεκτρολόγο του πλοίου

γ) Ύπαρξη δεύτερης πυξίδας.

δ) Συνδυασμός των παραπάνω.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[http://captain-christos.blogspot.gr/2013/03/blog-post\\_29.html#.WucrA4huY2w](http://captain-christos.blogspot.gr/2013/03/blog-post_29.html#.WucrA4huY2w)

Επισκέφθηκε Μάρτιο 2018

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%85%CE%BE%CE%AF%CE%B4%CE%B1>

Επισκέφθηκε, Μάρτιο 2018

[http://www.eugenfound.edu.gr/appdata/documents/books\\_pdf/e\\_j00086.pdf](http://www.eugenfound.edu.gr/appdata/documents/books_pdf/e_j00086.pdf)

Επισκέφθηκε, Μάρτιο 2018

Αθανασίου Η. Παλληκάρη, Γεωργίου Θ. Κατσούλη, Δημητρίου Α. Δαλακλή (2016) –

‘Ναυτικά Ηλεκτρονικά Όργανα Και Συστήματα Ηλεκτρονικού Χάρτη ECDIS’

Αθανασίου Η. Παλληκάρη, Γεωργίου Θ. Κατσούλη, Δημητρίου Α. Δαλακλή (2008) –

‘Ναυτικά Ηλεκτρονικά Όργανα’

Εμμανουήλ Νικόλαος (2013).

Μελέτη και Ανάλυση Ηλεκτρονικών Συσκευών και Ραδιοεπικοινωνιών Σκαφών.

Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας, Σχολή Μηχανικών (2018).

<https://sites.google.com/site/aenmakmech>. Επισκέφθηκε, Μάρτιο 2018

Ν. Τσούλης . Σημειώσεις ΝΗΟ ΙΙ Γ Εξαμήνου. ΑΕΝ Μακεδονίας, Σχολή Πλοιάρχων (2018). –