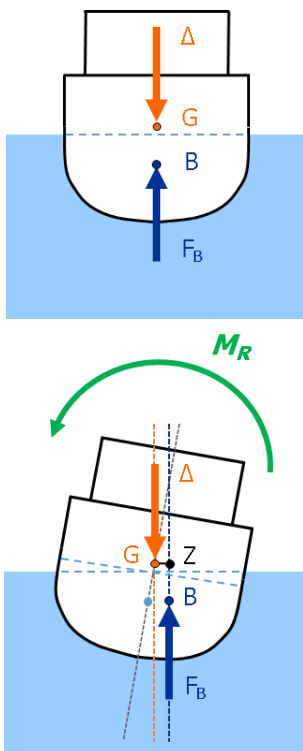


## Εγκάρσια Αρχική Ευστάθεια Πλοίου

Τα πλοία σχεδιάζονται για να έχουν θετική ευστάθεια σε όλες τις κινήσεις τους. Όμως, είναι πιο επιρρεπή σε αστάθεια στην περιστροφή γύρω από τον διαμήκη άξονα (διατοιχισμός) και στην περιστροφή γύρω από τον εγκάρσιο άξονα (προνευτασμός). Για το λόγο αυτό στην συνέχεια του μαθήματος θα μελετήσουμε καταρχήν την εγκάρσια και στην συνέχεια τη διαμήκη ευστάθεια ενός πλοίου στην απλή περίπτωση που αυτό είναι ακίνητο και η θάλασσα ήρεμη (χωρίς κυματισμούς). Η ευστάθεια θα μελετηθεί ξεχωριστά στην περίπτωση μικρών και μεγάλων γωνιών κλίσης.

### 1. Ροπή και μοχλοβραχίονας επαναφοράς.



Έστω ένα πλοίο που ισορροπεί σε ήρεμη θάλασσα, του οποίου η εγκάρσια τομή φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Για να εξεταστεί η εγκάρσια ευστάθειά του πρέπει το πλοίο να εκτραπεί από τη θέση ισορροπίας του κατά εγκάρσια γωνία  $\varphi$  και να μελετηθεί η συμπεριφορά του, δηλαδή αν θα επιστρέψει στη θέση ισορροπίας του (θετική ευστάθεια) ή αν θα απομακρυνθεί από αυτή (αρνητική ευστάθεια).

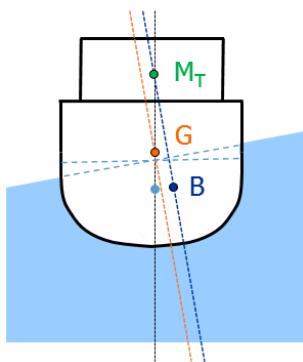
Η μεταβολή του βυθισμένου όγκου του πλοίου –λόγω της εγκάρσιας κλίσης που έλαβε– έχει ως συνέπεια την μετακίνηση του κέντρου άντωσης του. Η δύναμη του βάρους και της άντωσης δεν βρίσκονται πλέον στην ίδια ευθεία με αποτέλεσμα να δημιουργούν ένα ζεύγος δυνάμεων, το οποίο προκαλεί στο πλοίο ροπή με φορά αντίθετη από την εγκάρσια κλίση που έλαβε το πλοίο (**ροπή επαναφοράς -  $M_R$** ).

Η ροπή επαναφοράς ισούται με το γινόμενο του βάρους του πλοίου με την απόσταση των φορέων των δύο δυνάμεων, η οποία ονομάζεται **μοχλοβραχίονας επαναφοράς -  $GZ$** :

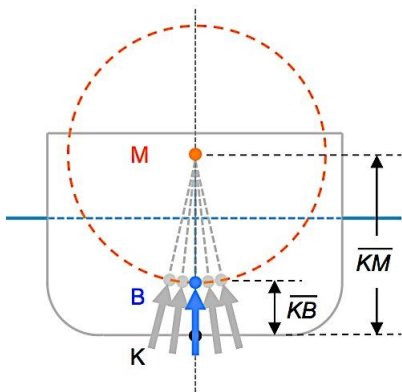
$$M_R = \Delta \cdot \overline{GZ}$$

Σχήμα 1. Αν ένα πλοίο λάβει εγκάρσια κλίση, οι δυνάμεις του βάρους και της άντωσης δημιουργούν μία ροπή, η οποία είναι επιθυμητό να επαναφέρει το πλοίο στη θέση ισορροπίας του.

## 2. Μετάκεντρο.



Σχήμα 2. Πρακτικά το εγκάρσιο μετάκεντρο στις  $0^\circ$  ορίζεται ως το σημείο τομής των φορέων της άντωσης προ και μετά της εγκάρσιας κλίσης  $\varphi$ .



Σχήμα 3. Ο επίσημος ορισμός του μετάκεντρου σχετίζεται με τη θέση του κέντρου άντωσης και τη γεωμετρία της ισάλου επιφάνειας.

Πριν συνεχίσουμε χρήσιμος αποδεικνύεται ο ορισμός ενός τέταρτου σημείου επί της εγκάρσιας τομής του πλοίου, το οποίο πρακτικά είναι το σημείο τομής του φορέα της άντωσης σε εγκάρσια κλίση  $0^\circ$  και του φορέα της σε εγκάρσια κλίση  $\varphi$ . Το σημείο αυτό ονομάζεται **εγκάρσιο μετάκεντρο** -  $M_T$  (βλ. σχήμα 2).

Το μετάκεντρο είναι ένα θεωρητικό σημείο, το οποίο ορίστηκε από τον Γάλλο Pierre Bouguer (1698-1758 μ.Χ.) στην προσπάθειά του να προβλέψει την ευστάθεια των πλοίων από την αρχική φάση της σχεδιάσής τους. Το εγκάρσιο μετάκεντρο ενός πλοίου για μία θέση ισορροπίας του ορίζεται ως το κέντρο καμπυλότητας του γεωμετρικού τόπου των  $B$  (κέντρων άντωσης) του πλοίου, καθώς αυτό λαμβάνει μικρές εγκάρσιες κλίσεις γύρω από τη θέση αυτή (βλ. σχήμα 3).

Η κατακόρυφη θέση του μετάκεντρου ( $KM_T$ ) εξαρτάται από τη θέση του κέντρου άντωσης. Πιο συγκεκριμένα ισχύει η σχέση:

$$\overline{KM_T} = \overline{KB} + \overline{BM_T}$$

όπου  $KM_T$  η κατακόρυφη απόσταση του εγκάρσιου μετάκεντρου από την τρόπιδα του πλοίου ή εγκάρσιο ύψος μετάκεντρου.

$KB$  η κατακόρυφη απόσταση του κέντρου άντωσης από την τρόπιδα του πλοίου.

$BM_T$  η απόσταση του εγκάρσιου μετάκεντρου από το κέντρο άντωσης (εγκάρσια μετακεντρική ακτίνα).

Αποδεικνύεται ότι η εγκάρσια μετακεντρική ακτίνα ενός πλοίου ισοούται με το λόγο της ροπής αδρανείας<sup>1</sup> της ισάλου επιφάνειας του πλοίου ως προς τον διαμήκη άξονα συμμετρίας της, προς το βυθισμένο όγκο του πλοίου. Δηλαδή, είναι:

$$\overline{BM_T} = \frac{I_{xx}}{\nabla}$$

### Σημείωση

Το μετάκεντρο είναι ένα σημείο στο επίπεδο (και όχι στο χώρο όπως τα  $G$  και  $B$ ). Δηλαδή, στο διάμηκες επίπεδο του πλοίου ορίζεται αντίστοιχα το διάμηκες ύψος μετάκεντρου ( $KM_L$ ) και η διαμήκης μετακεντρική ακτίνα ( $BM_L$ ). Τα δύο αυτά μήκη δεν ταυτίζονται με τα αντίστοιχα στο εγκάρσιο επίπεδο, αλλά ορίζονται με όμοιο τρόπο.

<sup>1</sup> Η ροπή αδρανείας μιας επιφάνειας ως προς έναν άξονα δείχνει την «ευκολία» που περιστρέφεται η επιφάνεια γύρω από τον άξονα αυτό. Παρόλο που ο υπολογισμός ροπών επιφανειών ξεφεύγει του αντικειμενικού στόχου του μαθήματος, γενικά ισχύει ότι όσο πιο απομακρυσμένη είναι η επιφάνεια από τον άξονα περιστροφής τόσο δυσκολότερο είναι να περιστραφεί γύρω από αυτόν και τόσο μεγαλύτερη είναι η ροπή αδρανείας της.

Δηλαδή είναι:

$$\overline{KM}_L = \overline{KB} + \overline{BM}_L$$

όπου:

$$\overline{BM}_L = \frac{I_{yy}}{\nabla}$$

Γενικά ισχύει:

$$\overline{BM}_L \gg \overline{BM}_T \quad \text{και} \quad \overline{KM}_L \gg \overline{KM}_T$$

Η διαφορά των δύο σημείων ( $M_T$  και  $M_L$ ) οφείλεται στην διαφορά των ροπών αδρανεΐας της επιφάνειας της ισάλου ως προς τον διαμήκη άξονα ( $I_{xx}$ ) και ως προς τον εγκάρσιο άξονα ( $I_{yy}$ ) του πλοίου.

### 3. Τρίγωνο ευστάθειας και εγκάρσιο μετακεντρικό ύψος.

Για ένα πλοίο που έχει λάβει μικρή εγκάρσια κλίση  $\varphi$ , τα σημεία  $M_T$ ,  $G$  και  $Z$  σχηματίζουν ένα ορθογώνιο τρίγωνο (ορθή γωνία στο  $Z$ ), το οποίο καλείται τρίγωνο ευστάθειας (βλ. σχήμα που ακολουθεί).



Σχήμα 4. Στο τρίγωνο αρχικής ευστάθειας ενός πλοίου φαίνεται η σχέση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς και του μετακεντρικού ύψους σε μικρές γωνίες κλίσης.

Με βάση τις σχέσεις της τριγωνομετρίας και για μικρές γωνίες εγκάρσιας κλίσης έχουμε:

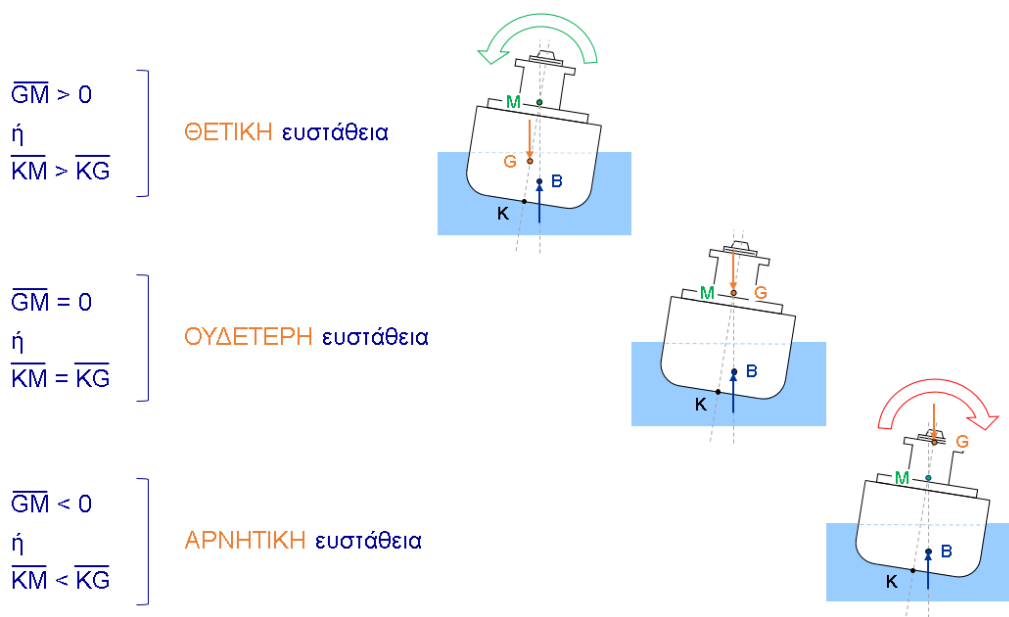
$$\sin\varphi = \frac{\overline{GZ}}{\overline{GM}_T} \Rightarrow \boxed{\overline{GZ} = \overline{GM}_T \cdot \sin\varphi}$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στον τύπο της ροπής επαναφοράς έχουμε:

$$\boxed{M_R = \Delta \cdot \overline{GM}_T \cdot \sin\varphi}$$

Εφόσον το εκτόπισμα του πλοίου είναι συγκεκριμένο, συμπεραίνεται ότι η αρχική ευστάθεια του πλοίου είναι ανάλογη του μήκους  $GM_T$ , το οποίο καλείται **εγκάρσιο μετακεντρικό ύψος**. Για το λόγο αυτό το μετακεντρικό ύψος αποτελεί το μέτρο της αρχικής ευστάθειας των πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η σχετική θέση του  $G$  με το  $M$  προσδιορίζει την αρχική ευστάθεια του πλοίου:

- Όσο το  $G$  βρίσκεται χαμηλότερα του  $M_T$  ( $GM_T > 0$  ή  $KM_T > KG$ ) το πλοίο έχει **θετική αρχική ευστάθεια**.
- Αν για κάποιο λόγο το κέντρο βάρους του πλοίου μετακινηθεί προς τα πάνω, τότε με βάση το τρίγωνο ευστάθειας, μειώνεται το μετακεντρικό ύψος του πλοίου και άρα και η ευστάθειά του. Αν το  $G$  ταυτιστεί με το  $M_T$  ( $GM_T = 0$  ή  $KM_T = KG$ ), τότε αν το πλοίο πάρει κλίση θα παραμείνει σε αυτή τη θέση, δηλαδή θα έχει **ουδέτερη αρχική ευστάθεια**.
- Αν τέλος το  $G$  βρεθεί πιο ψηλά από το  $M_T$  ( $GM_T < 0$  ή  $KM_T < KG$ ), τότε με την παραμικρή εγκάρσια κλίση το πλοίο θα ανατραπεί (**αρνητική αρχική ευστάθεια**).



Σχήμα 5. Η σχετική θέση του κέντρου βάρους και του μετάκεντρου καθορίζει την αρχική ευστάθεια των πλοίων. Όσο πιο χαμηλά είναι το κέντρο βάρους, τόσο πιο ευσταθές είναι το πλοίο.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι όσο πιο χαμηλά τοποθετούνται τα βαριά αντικείμενα στο πλοίο τόσο πιο πολύ αυξάνεται η εγκάρσια ευστάθειά του.