

2

Άντωση - Εκτόπισμα - Βάρος πλοίου

2.1 Αρχή του Αρχιμήδους – Άντωση – Κέντρο άντωσης

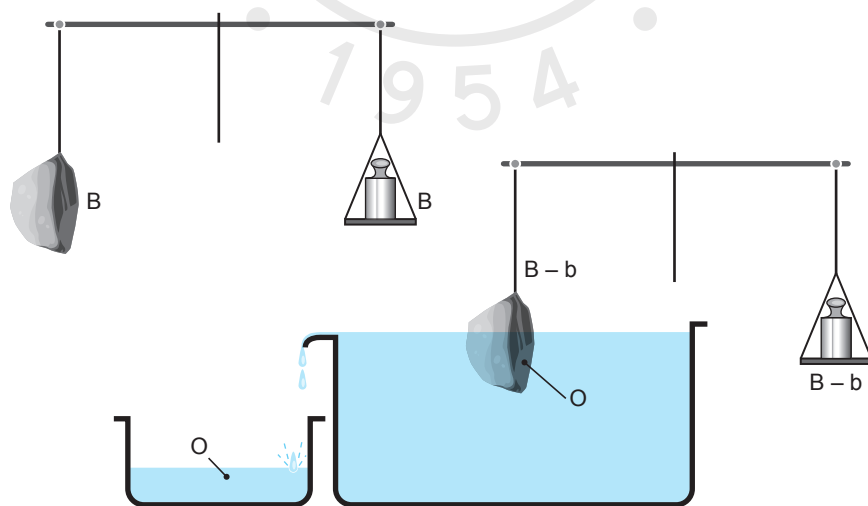
Σύμφωνα με την Αρχή του Αρχιμήδους **κάθε σώμα που βυθίζεται σε υγρό χάνει τόσο από το βάρος του, όσο είναι το βάρος του υγρού που εκτοπίζει**. Ο όγκος του υγρού που εκτοπίζεται είναι ίσος με τον όγκο του σώματος, ο οποίος βρίσκεται κάτω από την ίσαλο επιφάνεια.

Αυτή η βασική αρχή της υδροστατικής μπορεί να αποδειχθεί πειραματικά και θεωρητικά και να διατυπωθεί και με άλλο τρόπο, ως εξής:

Κάθε σώμα που βυθίζεται σε υγρό δέχεται την ενέργεια κατακόρυφης δύναμης, η οποία είναι συνισταμένη των υδροστατικών πιέσεων του υγρού, που είναι ίση και αντίθετη προς το βάρος του υγρού, το οποίο εκτοπίζεται απ' το σώμα. Πράγματι, πριν από τη βύθιση του σώματος, τον ίδιο ακριβώς όγκο βύθισης O καταλάμβανε το νερό. Το βάρος του νερού βρισκόταν σε ισορροπία με τη συνισταμένη των υδροστατικών πιέσεων που εξασκούσε το υπόλοιπο υγρό επάνω στον όγκο O .

Αυτή η κατακόρυφη δύναμη ονομάζεται **άντωση** και το σημείο της εφαρμογής της βρίσκεται στο κέντρο του όγκου του υγρού που εκτοπίζεται (σχ. 2.1)

Σύμφωνα με τα παραπάνω για το σχήμα 2.1 ισχύει η σχέση: $b = O \times \delta$ όπου: **b** το βάρος του υγρού που εκτοπίζεται, **O** ο όγκος του και **δ** το ειδικό βάρος του.



Σχ. 2.1

Αρχή του Αρχιμήδους

2.2 Πλευστότητα

Ο όρος **πλευστότητα** χρησιμοποιείται για να περιγράψουμε την ιδιότητα που έχουν τα στερεά σώματα να πλέουν ή την τάση συμπεριφοράς τους όταν βυθίζονται σε υγρό και ειδικότερα στο νερό.

Σχετικά με την πλευστότητα διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

1) **Θετική πλευστότητα** έχουν τα σώματα που πλέουν στην επιφάνεια του νερού, όπως οι κορμοί των δέντρων, τα πλοία κ.λπ. Η θετική πλευστότητα διακρίνεται σε:

α) **Φυσική**, που έχουν τα ομοιογενή σώματα, των οποίων το ειδικό βάρος που είναι μικρότερο από το ειδικό βάρος του νερού (φελλός, ξυλεία κλπ.) και

β) **επίκτητη**, που αποκτούν ορισμένα σώματα λόγω του σχήματός τους (χαλύβδινα πλοία).

2) **Μηδενική πλευστότητα** έχουν τα σώματα που αιωρούνται κάτω από την επιφάνεια του νερού.

3) **Αρνητική πλευστότητα** έχουν τα σώματα που βυθίζονται μέχρι τον πυθμένα.

4) **Εφεδρική άντωση ή πλευστότητα** καλούμε τον στεγανό όγκο των πλοίων, που βρίσκεται επάνω από την ίσαλο επιφάνεια. Τα έξαλα των πλοίων αποτελούν φανερό και κατά προσέγγιση μέτρο της εφεδρικής πλευστότητας.

2.3 Εκτόπισμα

Το βάρος του υγρού που εκτοπίζεται από ένα σώμα, το οποίο βυθίζεται μέσα σε αυτό, ονομάζεται **εκτόπισμα του σώματος** και επομένως:

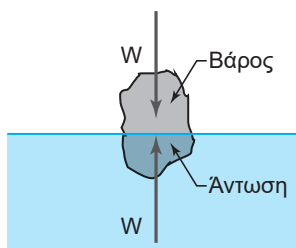
$$\text{άντωση} = \text{εκτόπισμα}$$

Εξάλλου, εφόσον το σώμα ισορροπεί στην επιφάνεια (επιπλέει) ή και μέσα στο υγρό (αιωρείται), υπάρχει ισορροπία δυνάμεων και επομένως το βάρος του είναι ίσο με την άντωση, οπότε ισχύει ή γενική σχέση (σχ. 2.2):

Αν ο όγκος που εκτοπίζεται από τα ύφαλα του πλοίου είναι V και το ειδικό βάρος του νερού είναι δ , τότε: $\text{εκτόπισμα} = V \times \delta$

Στη ναυτιλία ως μονάδες εκτοπίσματος και βάρους χρησιμοποιούνται ο μετρικός τόνος των 1000 kg και ο αγγλικός τόνος των 2240 λιμπρών (1016 kg). Όταν δεν

$$(\text{Βάρος} = \text{Αντωση})$$



Σχ. 2.2

Επιπλέον σώμα σε ισορροπία

υπάρχουν ακριβείς πληροφορίες παίρνουμε το ειδικό βάρος του νερού ως εξής:

Νερό	Σύστημα	
	Μετρικό	Αγγλικό
Θαλάσσιο νερό	1,025 t/m ³	1/35 t/ft ³
Γλυκό νερό	1,000 t/m ³	1/36 t/ft ³

Είναι φανερό ότι, όταν αυξάνεται το βύθισμα ενός πλοίου, αυξάνεται ο όγκος των υφάλων και επομένως το εκτόπισμα. Διακρίνουμε τα εξής χαρακτηριστικά εκτοπίσματα.

1) **Έμφορτο ή εκτόπισμα πλήρους φόρτου.** Είναι αυτό που αντιστοιχεί στο μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα του πλοίου.

2) **Άφορτο εκτόπισμα.** Είναι το εκτόπισμα που έχει το πλοίο, όταν είναι άφορτο· στην κατάσταση αυτή το πλοίο είναι απόλυτα έτοιμο να αναλάβει αποστολή, αλλά χωρίς κανένα φορτίο, καυσίμων, έρματος, πόσιμου νερού, εφοδίων, τροφίμων και πληρώματος, χωρίς κανένα, δηλαδή, πρόσθετο φορτίο.

2.4 Βάρος πλοίου. Ομάδες βαρών. Κέντρο βάρους

Το βάρος του πλοίου είναι άθροισμα των βαρών των ειδών και των αντικειμένων που φέρει. Διακρίνεται για λόγους υπολογισμού σε δύο κύριες κατηγορίες και κάθε μία από αυτές σε διάφορες ομάδες.

1) **Μόνιμο ή ίδιο βάρος του πλοίου.** Είναι το άθροισμα βαρών των ειδών που αποτελούν το έτοιμο πλοίο, χωρίς κανένα πρόσθετο βάρος ή φορτίο. Το βάρος αυτό αντιστοιχεί με το άφορτο εκτόπισμα και μοιράζεται στις εξής βασικές ομάδες βαρών.

α) **Σκάφους.** Είναι το βάρος του μεταλλικού ή από άλλο υλικό σκελετού, με όλες τις εσωτερικές φρακτές και τα χωρίσματα, καθώς και τις υπερκατασκευές.

β) **Πρωοστήριου σκεύους.** Είναι το βάρος της μηχανής πρόωσης με τις συσκευές και τα μηχανήματα που είναι προσαρτημένα σε αυτήν. Στο βάρος αυτό περιλαμβάνεται το νερό των λεβήτων μέχρι τη στάθμη λειτουργίας, τα υγρά των δικτύων της πρωοστήριας εγκατάστασης και το λάδι λίπανσης στις ελαιολεκάνες των μηχανημάτων.

γ) **Βοηθητικών μηχανημάτων και δικτύων,** όπως είναι τα μηχανήματα πηδαλίου, εργάτη, αγκυρών, ψυκτικών και δικτύων πλοίου.

δ) **Εξαρτισμού,** δηλαδή φορτωτήρων, λέμβων, αλυσίδων, αγκύρων κ.λπ.

ε) **Ενδιαίτησης και επίπλωσης.**

στ) **Οπλισμού** (για πολεμικά πλοία).

ζ) **Μόνιμου στερεού έρματος.**

2) **Φορτίο πλοίου.** Ο αγγλικός όρος Deadweight που χρησιμοποιείται, έχει καθιερωθεί διεθνώς. Στην ελληνική βιβλιογραφία συναντιέται ως **πρόσθετα** (ή νεκρά) **βάρη** και είναι το άθροισμα όλων των βαρών, που προσθέτονται στο σύμφωνα με τα παραπάνω, εντελώς έτοιμο πλοίο. Διακρίνεται δε στις ακόλουθες ομάδες βαρών:

α) Καυσίμων και λιπαντικών.

β) Τροφοδοτικού και πόσιμου νερού.

γ) Υλικών και εφοδίων πλοίου.

δ) Πληρώματος και των αποσκευών και εφοδίων του.

ε) Υγρού έρματος.

στ) Επιβατών και των αποσκευών τους.

ζ) Φορτίου κάθε είδους.

Οι δύο τελευταίες ομάδες είναι το ωφέλιμο φορτίο (Cargo Deadweight). Το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο ενός πλοίου μπορεί να αυξηθεί σε βάρος των ομάδων καυσίμων και νερού για πλόες μικρών αποστάσεων. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

Πλήρες ή έμφορτο εκτόπισμα = Μόνιμο ή ίδιο βάρος + Πρόσθετο βάρος

Χρήσιμο στοιχείο είναι ο λόγος $\frac{\text{Deadweight}}{\text{πλήρες εκτόπισμα}}$ ο οποίος κυμαίνεται στα εμπορι-

κά πλοία, εκτός από τα επιβατικά, από 0,65 μέχρι 0,85.

Παρακάτω δίνονται ενδεικτικά μερικές τιμές του λόγου:

Φορηγά	0,75
Πλοία μεταφοράς μεταλλεύματος ή μεταλλευματοφόρα	0,78 - 0,86
Πλοία χύδην (σκόρπιου) φορτίου	0,80
Πλοία ψυγεία	0,58
Επιβατηγά πλοία	0,35

Παράδειγμα

Για φορηγό πλοίο πρόσθετου φορτίου (ή βάρος Deadweight) 9000 τόνων και για τιμή 0,67 του παραπάνω λόγου, το πλήρες (ή έμφορτο) εκτόπισμα προκύπτει ίσο με $9000/0,67 = 13.430$ τόνοι. Αυτό δίνει μία προσεγγιστική τιμή του πλήρους εκτοπίσματος, που αντιστοιχεί στο παραπάνω Deadweight.

2.5 Κέντρο βάρους

Το κέντρο βάρους του πλοίου είναι το σημείο, στο οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι ενεργεί το βάρος του πλοίου, η συνισταμένη δηλαδή όλων των βαρών ή το άθροισμα όλων των βαρών.

Το κέντρο βάρους οποιουδήποτε σώματος, όπως ορίζεται από τη Μηχανική, είναι το σημείο (στη Ναυπηγική χαρακτηρίζεται συνήθως με το γράμμα **G**), του οποίου η θέση είναι τέτοια, ώστε το άθροισμα των ροπών όλων των επιμέρους βαρών ως προς οποιοδήποτε άξονα που διέρχεται από το σημείο αυτό, να είναι μηδέν.

Στα πλοία το κέντρο βάρους βρίσκεται συνήθως λόγω συμμετρίας επάνω στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας και κάπου στη μέση του μήκους τους. Η απόσταση του κέντρου βάρους από το βασικό επίπεδο (ύψος) έχει ιδιαίτερη σημασία για τα θέματα ευστάθειας.

Η θέση του κέντρου βάρους του ίδιου βάρους του πλοίου παραμένει αμετάβλητη εφόσον δεν μεταβάλλονται τα μόνιμα βάρη του, διαφέρει όμως από τη θέση του κέντρου βάρους του φορτωμένου πλοίου, το οποίο εξαρτάται προφανώς και από την κατανομή των προσθέτων βαρών.

Μεταξύ των συντελεστών γάστρας, μέσης τομής και του πρισματικού υπάρχει η σχέση:

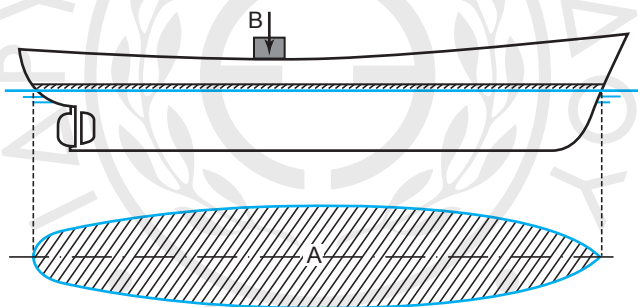
$$C_B = \frac{V}{M \times L} \times \frac{M}{B \times D} = C_P \times C_M$$

Οι παραπάνω συντελεστές αναφέρονται στην ίσαλο κατασκευής.

3.5 Τόνοι ανά μονάδα βύθισης

Με τον όρο αυτό εννοείται το βάρος σε τόνους, το οποίο πρέπει να προστεθεί (ή να αφαιρεθεί) στο πλοίο για να αυξηθεί (ή να ελαττωθεί) το βύθισμά του κατά μία μονάδα μήκους. Στην περίπτωση αυτή ως μονάδα της διαφοράς βυθισμάτων χρησιμοποιείται συνήθως το εκατοστόμετρο και η ίντσα από όπου προέρχονται οι όροι **τόνοι ανά εκατοστόμετρο** (t/cm) και **τόνοι ανά ίντσα βύθισης**.

Έστω ότι σε πλοίο με ίσαλο επιφάνεια A (σε m^2) προσθέτουμε βάρος B (σε τόνους) (σχ. 3.5). Εφόσον αυξήθηκε το βάρος του πλοίου, θα πρέπει να αυξηθεί και η άντωση και επομένως ο όγκος υφάλων του πλοίου. Αναλόγως θα αυξηθεί και το βύθισμα, έτσι, ώστε το βάρος που έχει προστεθεί να είναι ίσο με την πρόσθετη άντωση.



Σχ. 3.5

Η πρόσθετη αυτή άντωση είναι ίση με το βάρος του νερού που εκτοπίζεται επί πλέον, το οποίο έχει όγκο τον όγκο της **φέτας** επιφάνειας A και πάχος ίσο με την πρόσθετη βύθιση. Με την προϋπόθεση, βέβαια, ότι το πρόσθετο βάρος B τοποθετείται σε κατάλληλο σημείο κατά μήκος του πλοίου και επάνω στον διαμήκη άξονα συμμετρίας του, ώστε να μην αλλάξει η διαγωγή του πλοίου ούτε να προκληθεί κλίση αριστερά-δεξιά (βλ. πιο κάτω ευστάθεια πλοίου).

Αν η βύθιση που προκαλείται είναι 1 cm (1/100 m) τότε οι τόνοι ανά cm είναι:

$$T = A \times \frac{1}{100} \times \text{ειδικό βάρος} = \frac{A}{100} \times 1,025$$

Με όμοιο τρόπο αποδεικνύεται ότι στο αγγλικό σύστημα μέτρησης οι τόνοι ανά ίντσα είναι:

$$T = A \times \frac{1}{12} \times \frac{1}{35} = \frac{A}{420}$$

όπου: **A** η επιφάνεια της ίσαλου σε τετρ. πόδια (ft²)

$\frac{1}{12}$ (του ft) ή ίντσα

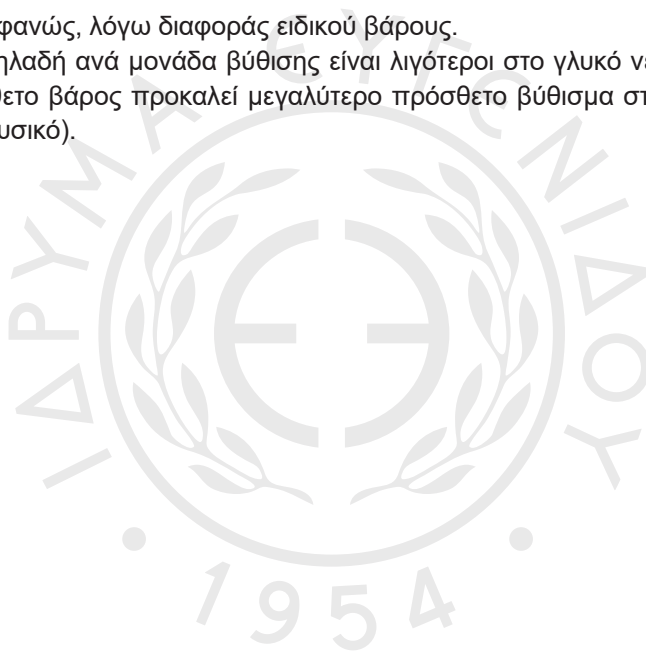
$\frac{1}{35}$ t/ft³ το ειδικό βάρος του θαλάσσιου νερού.

Για γλυκό νερό ισχύουν οι δύο αντίστοιχοι τύποι:

$$T = \frac{1}{100} \quad \text{και} \quad T = \frac{A}{432}$$

Αυτό, προφανώς, λόγω διαφοράς ειδικού βάρους.

Οι τόνοι δηλαδή ανά μονάδα βύθισης είναι λιγότεροι στο γλυκό νερό ή αλλιώς, το ίδιο πρόσθετο βάρος προκαλεί μεγαλύτερο πρόσθετο βύθισμα στο γλυκό νερό (όπως είναι φυσικό).



5

Εγκάρσια ευστάθεια πλοίου

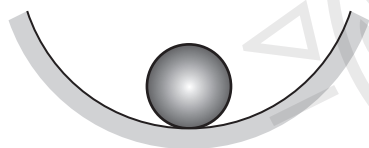
5.1 Γενικά. Ισορροπία

Όταν ένα σώμα δεν κινείται, βρίσκεται σε ισορροπία. Στα σχήματα 5.1, 5.2 και 5.3 φαίνεται μία σφαίρα σε ισορροπία. Αν με την επενέργεια εξωτερικής δύναμης η σφαίρα μετακινηθεί λίγο από τη θέση ισορροπίας και στη συνέχεια η εξωτερική δύναμη πάψει να επενεργεί, η σφαίρα θα συμπεριφερθεί με διαφορετικό τρόπο σε κάθε περίπτωση, ως εξής:

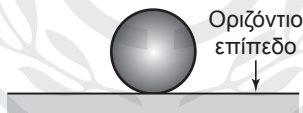
1) Η σφαίρα θα επανέλθει στη θέση αρχικής ισορροπίας (σχ. 5.1). Τότε λέμε ότι το σώμα βρίσκεται σε κατάσταση **ευσταθούς ισορροπίας**.

2) Η σφαίρα θα ηρεμήσει στη νέα της θέση (σχ. 5.2). Το σώμα βρίσκεται σε κατάσταση **αδιάφορου ισορροπίας**.

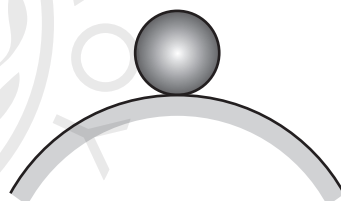
3) Η σφαίρα θα κυλήσει μακριά από την αρχική θέση ισορροπίας (σχ. 5.3). Το σώμα βρίσκεται σε κατάσταση **ασταθούς ισορροπίας**.



Σχ. 5.1
Ευσταθής ισορροπία



Σχ. 5.2
Αδιάφορος ισορροπία



Σχ. 5.3
Ασταθής ισορροπία

Η ισορροπία ενός σώματος λέγεται **ευσταθής**, όταν το σώμα μετακινούμενο λίγο από τη θέση ισορροπίας του τείνει να επανέλθει σε αυτή.

Η ισορροπία ενός σώματος λέγεται **αδιάφορος**, όταν το σώμα μετακινούμενο λίγο από τη θέση ισορροπίας του παραμένει στη νέα του θέση.

Τέλος η ισορροπία ενός σώματος λέγεται **ασταθής**, όταν το σώμα μετακινούμενο λίγο από τη θέση ισορροπίας του τείνει να απομακρυνθεί από αυτή ακόμα παραπάνω. Τα πλοία επιφάνειας πρέπει προφανώς να έχουν ευσταθή εγκάρσια ισορροπία, ώστε όταν παίρνουν εγκάρσιες κλίσεις κάτω από την επιρροή εξωτερικών δυνάμεων (κυματισμοί, άνεμοι κ.λπ.), να έχουν την τάση να επανέλθουν στην όρθια θέση, δηλαδή με τον ιστό κατακόρυφο.

5.2 Ισορροπία σώματος που επιπλέει

Ένα σώμα που επιπλέει στην ήρεμη επιφάνεια υγρού δέχεται την επίδραση δύο

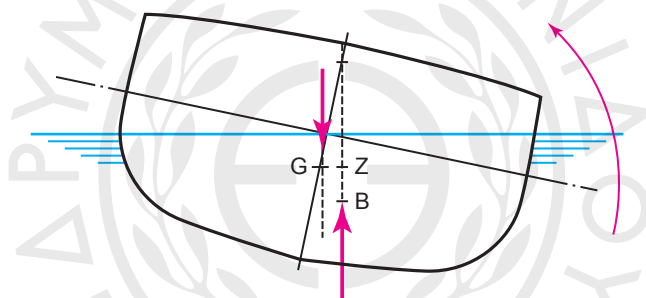
κατακόρυφων δυνάμεων:

- 1) Του **βάρους**, στο κέντρο βάρους.
- 2) Της **άντωσης**, στο κέντρο άντωσης.

Όταν το πλοίο ισορροπεί, οι δύο δυνάμεις ενεργούν επάνω στην ίδια κατακόρυφη και είναι ίσες και αντίθετες.

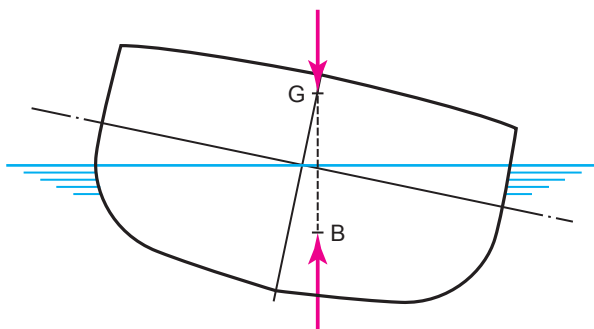
Αν δοθεί στο πλοίο από εξωτερική δύναμη εγκάρσια κλίση, θα μεταβληθεί το σχήμα του όγκου των υφάλων και το κέντρο άντωσης θα αλλάξει θέση, απομακρυνόμενο από το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας προς την πλευρά της κλίσης. Με τον τρόπο αυτό οι κατακόρυφες ευθείες ενέργειας των δύο δυνάμεων θα αποχωρισθούν και θα δημιουργηθεί ζεύγος δυνάμεων με ροπή ίση προς το γινόμενο της μιας δύναμης επί την κάθετη απόσταση μεταξύ των ευθειών ενέργειας.

Στο σχήμα 5.4 το παραπάνω ζεύγος δυνάμεων τείνει να επαναφέρει το πλοίο στην όρθια θέση και η ροπή του καλείται **ροπή επαναφοράς**. Η κάθετη απόσταση μεταξύ των ευθειών ενέργειας των δύο δυνάμεων είναι ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς GZ. Στην περίπτωση αυτή το πλοίο βρίσκεται σε ευσταθή ισορροπία.



Σχ. 5.4

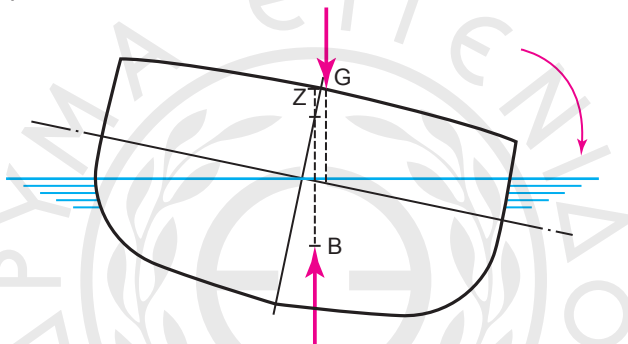
Έστω ότι το κέντρο βάρους του πλοίου G βρισκόταν ψηλότερα, σε τέτοια θέση, ώστε, όταν το πλοίο πάρει μικρή εγκάρσια κλίση, η δύναμη άντωσης να ενεργεί επάνω σε ευθεία που διέρχεται από το κέντρο βάρους (σχ. 5.5). Στην κατάσταση αυτή οι δύο δυνάμεις βάρους και άντωσης ενεργούν επάνω στην ίδια ευθεία και ο μοχλο-



Σχ. 5.5

βραχίονας και η ροπή του ζεύγους είναι μηδενική. Στην περίπτωση αυτή το πλοίο βρίσκεται σε **αδιάφορη** ισορροπία, δεδομένου ότι υπάρχει ζεύγος που να τείνει να το επαναφέρει στην όρθια θέση, αλλά ούτε και να τείνει να τον ανατρέψει. Μεγαλύτερη αύξηση της εγκάρσιας κλίσης θα επιφέρει μεταβολή της κατάστασης ισορροπίας.

Αν το κέντρο βάρους βρισκόταν ακόμα περισσότερο προς τα επάνω, όπως στο σχήμα 5.6, οι ευθείες ενέργειας των δύο δυνάμεων αποχωρίζονται, όταν το πλοίο πάρει εγκάρσια μικρή κλίση και στην περίπτωση αυτή η ροπή των δύο δυνάμεων όχι μόνο δεν τείνει να αποκαταστήσει το πλοίο στην όρθια θέση, αλλά αντίθετα προκαλεί αύξηση της εγκάρσιας κλίσης. Στην περίπτωση αυτή το πλοίο βρίσκεται σε ασταθή ισορροπία. Η ροπή που δημιουργείται ονομάζεται **ροπή ανατροπής** και ο μοχλοβραχίονας GZ λέγεται **μοχλοβραχίονας ανατροπής**. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η ισορροπία του πλοίου γίνεται πιο ευσταθής όσο το Κ.Β. βρίσκεται χαμηλότερα.



Σχ. 5.6

5.3 Μετάκεντρο. Μετακεντρικό ύψος

Σε μικρές γωνίες εγκάρσιας κλίσης (μέχρι 7° ως 10°) το σημείο της τομής της κατακόρυφου που περνά από το κέντρο άντωσης, με την αρχική κατακόρυφο που περνούσε από το κέντρο άντωσης, όταν η κλίση του πλοίου ήταν μηδενική, καλείται **μετάκεντρο**, θεωρείται σταθερό σημείο και χαρακτηρίζεται με το γράμμα M .

Η θέση του μετάκεντρου σε σχέση με τη θέση του κέντρου βάρους επηρεάζει σημαντικά την ευστάθεια του πλοίου. Έτσι, όπως φαίνεται και από τα σχήματα 5.4, 5.5 και 5.6, όταν το κέντρο βάρους του πλοίου είναι κάτω από το μετάκεντρο, το πλοίο είναι ευσταθές, όταν το κέντρο βάρους συμπίπτει με το μετάκεντρο, η ισορροπία του πλοίου είναι αδιάφορη, ενώ όταν το κέντρο βάρους του πλοίου είναι επάνω από το μετάκεντρο το πλοίο είναι ασταθές.

Σχετικά με την επιρροή που ασκεί η θέση του μετάκεντρου στην ευστάθεια του πλοίου τονίζεται ιδιαίτερα ότι το μετάκεντρο θεωρείται ως σταθερό σημείο μόνο για μικρές γωνίες εγκάρσιας κλίσης μέχρι 7° ως 10° .

Η παραπέρα εξέταση της εγκάρσιας ευστάθειας βασίζεται σε σταθερό μετάκεντρο και ισχύει μόνο για μικρές γωνίες εγκάρσιας κλίσης και καλείται συνήθως **αρχική ευστάθεια** ή **ευστάθεια μικρών γωνιών κλίσης**.