

Κεφάλαιο M12

Στατική ισορροπία και ελαστικότητα

Στατική ισορροπία

Ένα σώμα βρίσκεται σε ισορροπία όταν κινείται με σταθερή ταχύτητα και σταθερή γωνιακή ταχύτητα ως προς έναν παρατηρητή που βρίσκεται σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε μόνο με την ειδική περίπτωση κατά την οποία και οι δύο αυτές ταχύτητες έχουν μηδενική τιμή.

- Σε αυτή την περίπτωση, λέμε ότι το σώμα βρίσκεται σε *στατική ισορροπία*.

Η στατική ισορροπία είναι ένα πρόβλημα που συναντούν συχνά οι μηχανικοί.

Οι αρχές που σχετίζονται με τη στατική ισορροπία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους πολιτικούς μηχανικούς, τους αρχιτέκτονες, και τους μηχανολόγους μηχανικούς.

Ελαστικότητα

Θα εξετάσουμε την παραμόρφωση των σωμάτων όταν δέχονται φορτίο.

Κάθε ελαστικό σώμα ξαναπαίρνει το αρχικό σχήμα του όταν οι δυνάμεις που το παραμορφώνουν παύουν να ασκούνται σε αυτό.

Θα ορίσουμε διάφορες ελαστικές σταθερές, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε έναν διαφορετικό τύπο παραμόρφωσης.

Άκαμπτο σώμα σε ισορροπία

Στο μοντέλο του σωματιδίου σε ισορροπία, το υπό μελέτη σωματίδιο κινείται με σταθερή ταχύτητα επειδή η συνισταμένη δύναμη που ασκείται σε αυτό είναι μηδενική.

Η περίπτωση των πραγματικών (μη σημειακών) σωμάτων είναι πιο περίπλοκη.

- Συχνά, τα σώματα αυτά δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν ως σωματίδια.

Για να βρίσκεται ένα μη σημειακό σώμα σε ισορροπία, πρέπει να ικανοποιείται και μια δεύτερη συνθήκη.

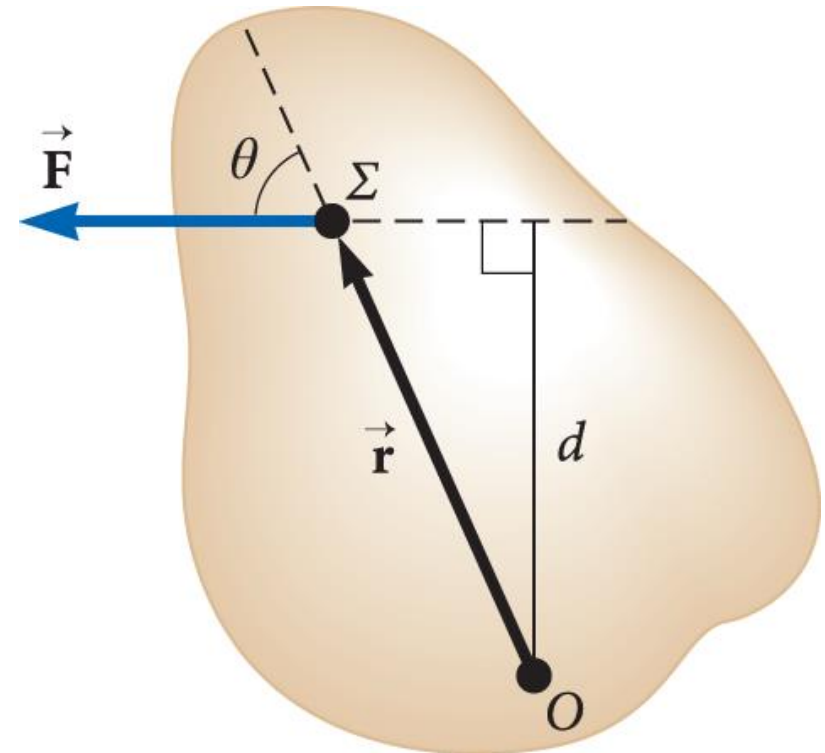
- Αυτή η δεύτερη συνθήκη σχετίζεται με την περιστροφική κίνηση του μη σημειακού σώματος.

Ροπή – Επανεξέταση

$$\vec{\tau} = \vec{\mathbf{F}} \times \vec{\mathbf{r}}$$

- Προσδιορίζουμε την κατεύθυνση της ροπής χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού.
- Η τάση της δύναμης να προκαλεί περιστροφή γύρω από το O εξαρτάται από το μέτρο της δύναμης F και από τον μοχλοβραχίονα d .

Η συνισταμένη ροπή που ασκείται σε ένα άκαμπτο σώμα του προσδίδει γωνιακή επιτάχυνση.



Συνθήκες ισορροπίας

Η συνισταμένη εξωτερική δύναμη που ασκείται στο σώμα πρέπει να είναι μηδενική.

- $\sum \vec{F}_{\text{εξωτ.}} = 0$
- Αν το σώμα μοντελοποιείται ως σωματίδιο, πρέπει να ικανοποιείται μόνο αυτή η συνθήκη.

Η συνισταμένη εξωτερική ροπή που ασκείται στο σώμα γύρω από οποιονδήποτε άξονα πρέπει να είναι μηδενική.

- $\sum \vec{\tau}_{\text{εξωτ.}} = 0$
- Η συνθήκη αυτή είναι απαραίτητη αν το σώμα δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί ως σωματίδιο.

Οι παραπάνω συνθήκες ορίζουν το **μοντέλο ανάλυσης του άκαμπτου σώματος που βρίσκεται σε ισορροπία**.

Ισορροπία – Σημειώσεις

Ισορροπία στη μεταφορική κίνηση

- Η πρώτη συνθήκη ισορροπίας αφορά την ισορροπία στη μεταφορική κίνηση.
- Σύμφωνα με αυτή τη συνθήκη, η επιτάχυνση του κέντρου μάζας του σώματος πρέπει να είναι μηδενική.
- Αυτή η συνθήκη πρέπει να ισχύει όταν παρατηρούμε το σώμα από ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Ισορροπία στην περιστροφική κίνηση

- Η δεύτερη συνθήκη ισορροπίας αφορά την ισορροπία στην περιστροφική κίνηση.
- Σύμφωνα με αυτή τη συνθήκη, η γωνιακή επιτάχυνση του σώματος πρέπει να είναι μηδενική.
- Αυτή η συνθήκη πρέπει να ισχύει για οποιονδήποτε άξονα περιστροφής.

Στατική και δυναμική ισορροπία

Σε αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθούμε στη στατική ισορροπία.

- Το σώμα είναι ακίνητο.
- $v_{KM} = 0$ και $\omega = 0$

Μηδενική συνισταμένη ροπή δεν συνεπάγεται απαραίτητως και απουσία περιστροφικής κίνησης.

Η δυναμική ισορροπία είναι επίσης πιθανή.

- Το σώμα περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα.
- Το σώμα κινείται με σταθερή ταχύτητα v_{KM} .

Εξισώσεις ισορροπίας

Θα περιορίσουμε την ανάλυσή μας σε περιπτώσεις στις οποίες όλες οι δυνάμεις βρίσκονται στο επίπεδο xy .

- Αυτές οι δυνάμεις ονομάζονται συνεπίπεδες επειδή τα διανύσματά τους ανήκουν στο ίδιο επίπεδο.
- Με αυτόν τον περιορισμό προκύπτουν τρεις βαθμωτές εξισώσεις.

Οι τρεις αυτές εξισώσεις είναι οι εξής:

- $\Sigma F_x = 0$
- $\Sigma F_y = 0$
- $\Sigma \tau_z = 0$
 - Η θέση του άξονα για την εξίσωση της ροπής επιλέγεται αυθαίρετα.

Κέντρο μάζας

Ένα σώμα μπορεί να χωριστεί σε πολλά μικρά σωματίδια.

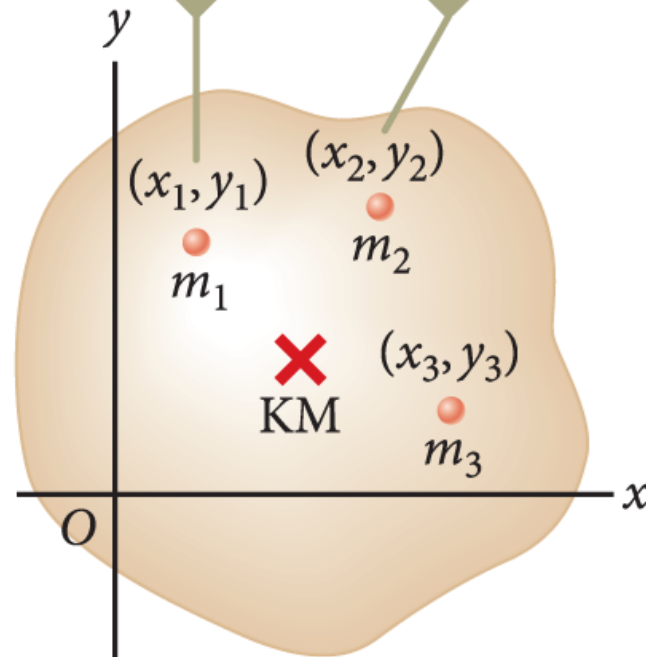
- Κάθε σωματίδιο έχει συγκεκριμένη μάζα και συγκεκριμένες συντεταγμένες.

Η συντεταγμένη x (τετμημένη) του κέντρου μάζας είναι

$$x_{\text{KM}} = \frac{\sum_i m_i x_i}{\sum_i m_i}$$

Μπορούμε να γράψουμε παρόμοιες σχέσεις για τις συντεταγμένες y και z .

Κάθε σωματίδιο του σώματος έχει συγκεκριμένη μάζα και συγκεκριμένες συντεταγμένες.

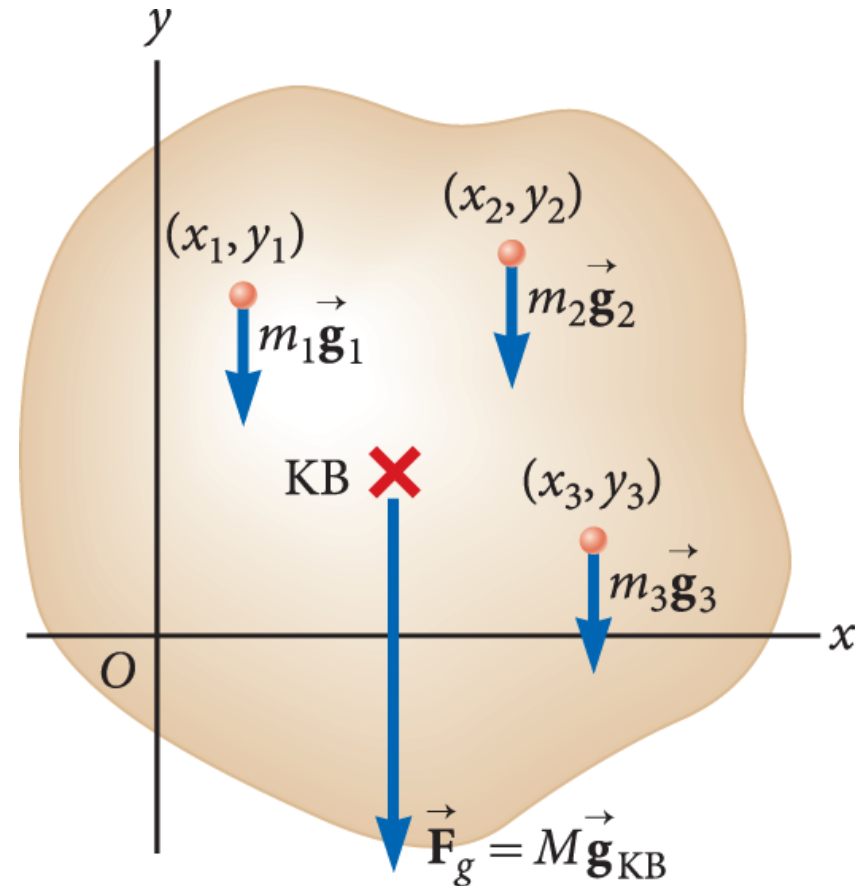


Κέντρο βάρους

Ο συνδυασμός των βαρυτικών δυνάμεων που ασκούνται στις διάφορες στοιχειώδεις μάζες του σώματος ισοδυναμεί με μία συνολική βαρυτική δύναμη, η οποία ασκείται στο κέντρο βάρους του σώματος.

Κάθε σωματίδιο προκαλεί ροπή ως προς έναν άξονα που διέρχεται από την αρχή των συντεταγμένων. Η ροπή αυτή έχει μέτρο ίσο με το γινόμενο του βάρους του σωματιδίου επί τον μοχλοβραχίονά του.

$$x_{\text{KB}} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \dots}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots}$$



Κέντρο βάρους (συνέχεια)

Η ροπή που προκαλεί η βαρυτική δύναμη σε ένα σώμα μάζας M είναι η δύναμη Mg που ασκείται στο κέντρο βάρους του σώματος.

Αν η επιτάχυνση της βαρύτητας g είναι ομοιόμορφη σε ολόκληρο το σώμα, τότε το κέντρο βάρους του σώματος συμπίπτει με το κέντρο μάζας του.

Αν το σώμα είναι ομογενές και συμμετρικό, τότε το κέντρο βάρους του συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο του.

Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων – Προβλήματα ισορροπίας

Μοντελοποίηση

- Προσδιορίστε όλες τις δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα.
- Φανταστείτε πώς θα επηρέαζε την περιστροφή του σώματος κάθε δύναμη ξεχωριστά αν ήταν η μοναδική δύναμη που εφαρμοζόταν σε αυτό.

Κατηγοριοποίηση

- Βεβαιωθείτε ότι το σώμα είναι όντως άκαμπτο σώμα που βρίσκεται σε ισορροπία.
- Το σώμα πρέπει να έχει μηδενική μεταφορική επιτάχυνση και μηδενική γωνιακή επιτάχυνση.

Ανάλυση

- Σχεδιάστε ένα διάγραμμα.
- Επισημάνετε όλες τις εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα.

Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων – Προβλήματα ισορροπίας (2)

Ανάλυση, (συνέχεια)

- Μοντέλο του σωματιδίου υπό την επίδραση συνισταμένης δύναμης
 - Το σώμα στο οποίο ασκούνται οι δυνάμεις μπορεί να αναπαρασταθεί στο διάγραμμα ελεύθερου σώματος με μία κουκκίδα, επειδή δεν έχει σημασία πού βρίσκονται τα σημεία εφαρμογής των δυνάμεων επάνω στο σώμα.
- Μοντέλο του άκαμπτου σώματος σε ισορροπία
 - Το σώμα στο οποίο ασκούνται οι δυνάμεις δεν μπορεί να αναπαρασταθεί με μία κουκκίδα, επειδή οι θέσεις των σημείων εφαρμογής των δυνάμεων έχουν σημασία για τους υπολογισμούς.
- Επιλέξτε το κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων.
- Βρείτε τις συνιστώσες των δυνάμεων και στους δύο άξονες.
- Εφαρμόστε την πρώτη συνθήκη ισορροπίας ($\Sigma F = 0$).
- Χρησιμοποιήστε κατάλληλα πρόσημα.

Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων – Προβλήματα ισορροπίας (3)

Ανάλυση, (συνέχεια)

- Επιλέξτε κατάλληλο άξονα για να υπολογίσετε τη συνισταμένη ροπή που ασκείται στο άκαμπτο σώμα.
 - Να θυμάστε ότι η επιλογή του άξονα είναι αυθαίρετη.
- Επιλέξτε τον άξονα που απλουστεύει τους υπολογισμούς σας όσο το δυνατόν περισσότερο.
 - Αν η ευθεία εφαρμογής της δύναμης (ή φορέας της δύναμης) διέρχεται από την αρχή των αξόνων, η δύναμη δεν προκαλεί ροπή.
- Εφαρμόστε τη δεύτερη συνθήκη ισορροπίας.
- Από τις δύο συνθήκες ισορροπίας θα προκύψει ένα σύστημα εξισώσεων.
- Λύστε το σύστημα των εξισώσεων.

Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων – Προβλήματα ισορροπίας (4)

Ολοκλήρωση

- Βεβαιωθείτε ότι τα αποτελέσματά σας συμφωνούν με το διάγραμμά σας.
- Αν κάποια δύναμη στη λύση σας έχει αρνητικό πρόσημο, η πραγματική κατεύθυνσή της είναι αντίθετη από αυτήν που σχεδιάσατε στο διάγραμμα.
- Ελέγξτε τα αποτελέσματά σας για να επαληθεύσετε ότι $\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$, $\Sigma \tau = 0$.

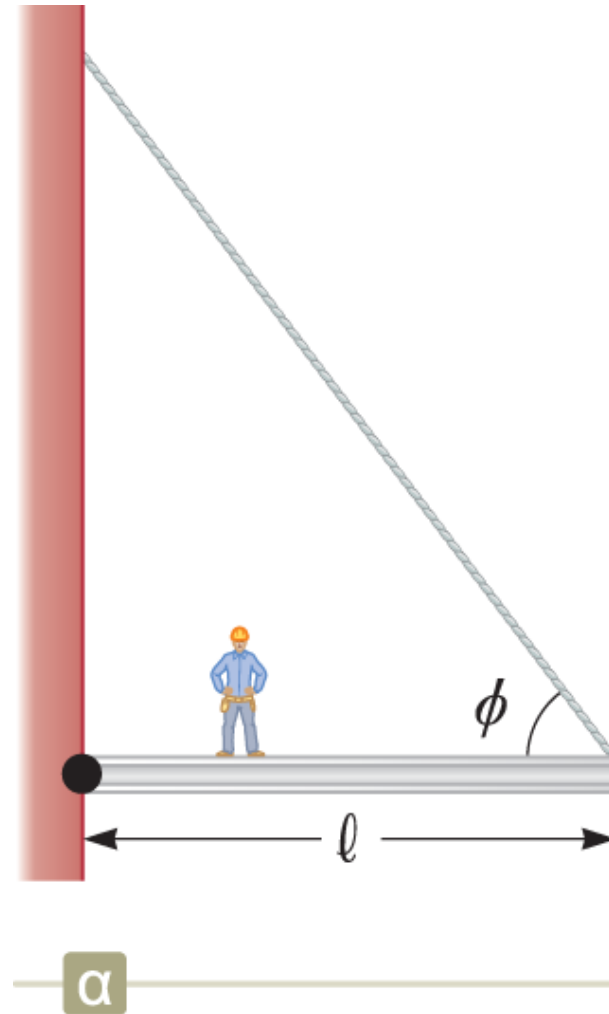
Οριζόντια δοκός – Παράδειγμα

Μοντελοποίηση

- Η δοκός είναι ομογενής.
- Άρα, το κέντρο βάρους της δοκού συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο της.
- Επάνω στη δοκό στέκεται ένας άνθρωπος.
- Πόση είναι η τάση που αναπτύσσεται στο συρματοσκόινο και ποιο είναι το μέτρο της δύναμης που ασκεί ο τοίχος στη δοκό;

Κατηγοριοποίηση

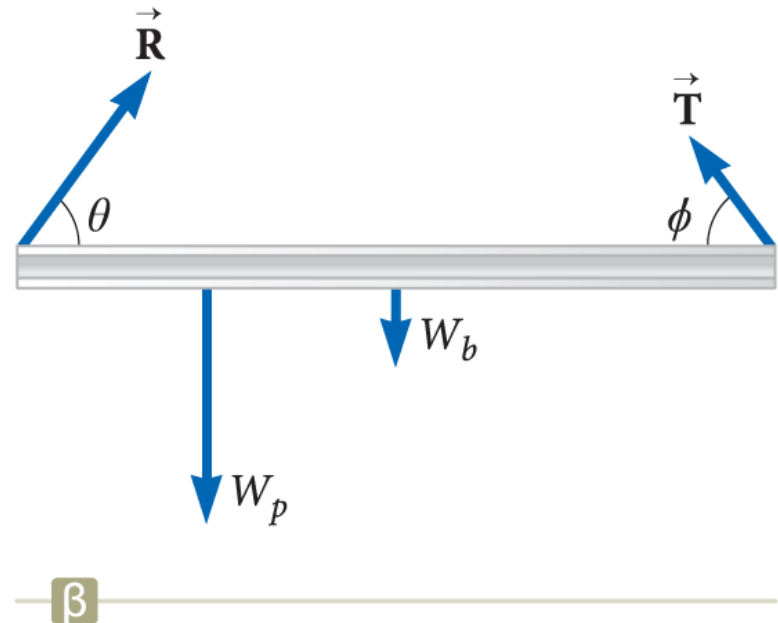
- Το σύστημα είναι ακίνητο, οπότε μοντελοποιούμε τη δοκό ως άκαμπτο σώμα σε ισορροπία.



Οριζόντια δοκός – Παράδειγμα (2)

Ανάλυση

- Σχεδιάστε το διάγραμμα δυνάμεων.
- Ορίστε την άρθρωση της δοκού (η οποία βρίσκεται στον τοίχο) ως σημείο περιστροφής.
 - Γενικά, αυτό θα διευκολύνει την επίλυση του προβλήματος.
- Σημειώστε ότι υπάρχουν τρεις άγνωστες μεταβλητές (T , R , θ).



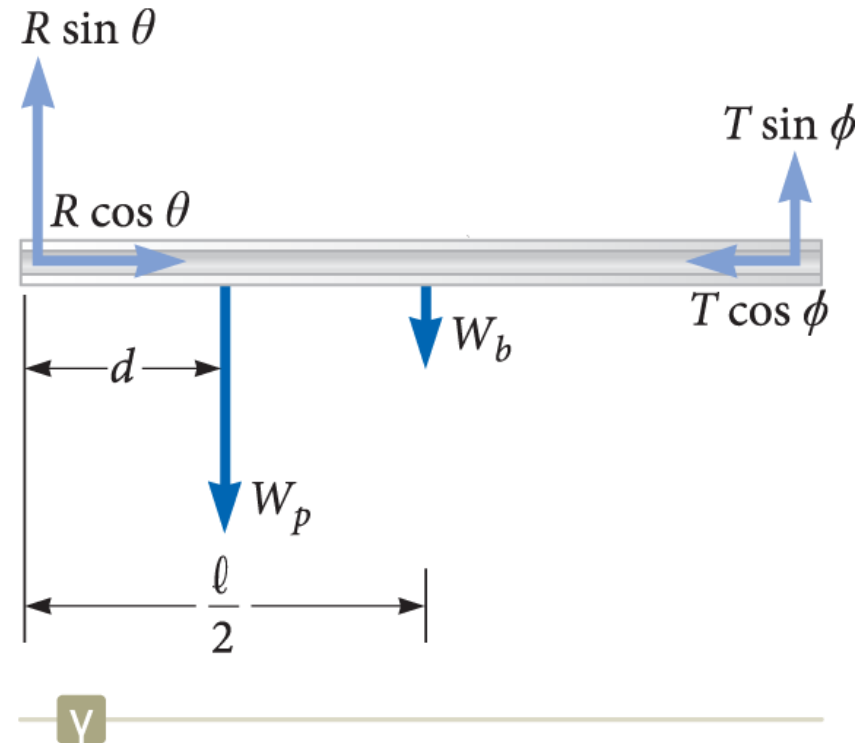
Οριζόντια δοκός – Παράδειγμα (3)

Ανάλυση, (συνέχεια)

- Μπορείτε να αναλύσετε τις δυνάμεις στις συνιστώσες τους.
- Εφαρμόστε τις δύο συνθήκες ισορροπίας. Θα προκύψουν τρεις εξισώσεις.
- Λύστε ως προς τις άγνωστες μεταβλητές.

Ολοκλήρωση

- Η θετική τιμή της γωνίας θ υποδηλώνει ότι η κατεύθυνση της R στο διάγραμμα ήταν σωστή.



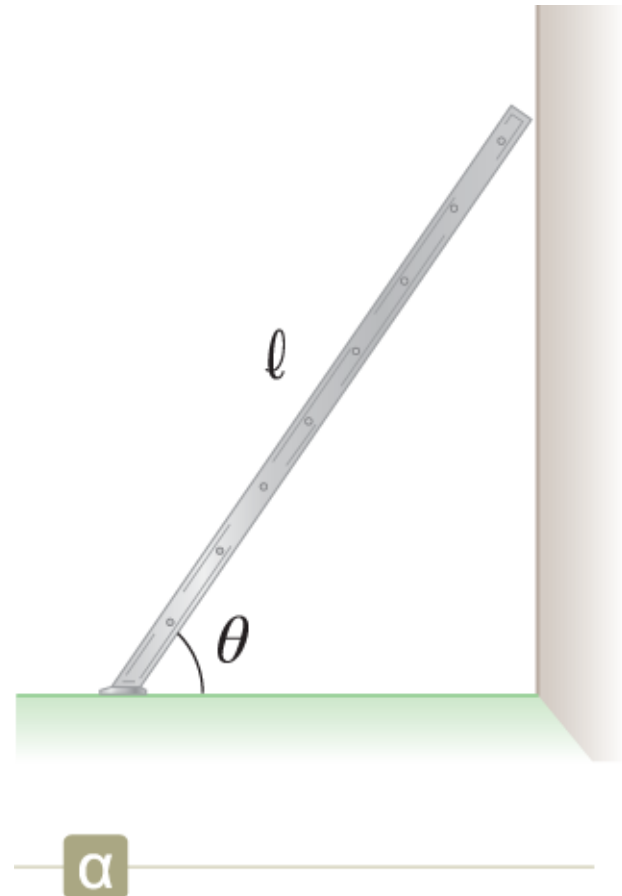
Σκάλα – Παράδειγμα

Μοντελοποίηση

- Η σκάλα είναι ομογενής.
- Άρα το σημείο εφαρμογής του βάρους είναι το γεωμετρικό κέντρο της (το κέντρο βάρους).
- Μεταξύ της σκάλας και του εδάφους αναπτύσσεται στατική τριβή.

Κατηγοριοποίηση

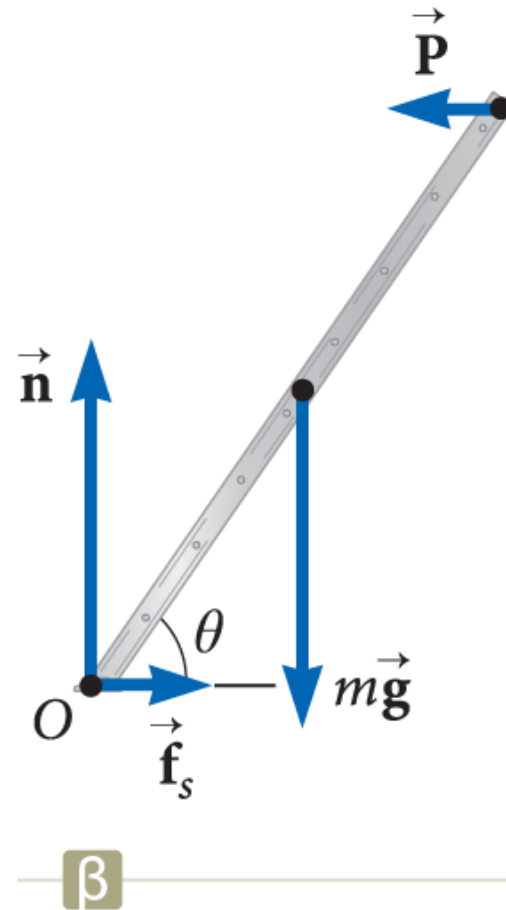
- Μοντελοποιήστε τη σκάλα ως άκαμπτο σώμα σε ισορροπία.
 - Επειδή δεν πρέπει να ολισθήσει.



Σκάλα – Παράδειγμα (2)

Ανάλυση

- Σχεδιάστε ένα διάγραμμα με όλες τις δυνάμεις που ασκούνται στη σκάλα.
- Η δύναμη τριβής είναι $f_s = \mu_s n$.
- Έστω ότι ο άξονας περιστροφής διέρχεται από την αρχή O .
- Εφαρμόστε τις δύο συνθήκες ισορροπίας.
- Λύστε τις εξισώσεις.



Ελαστικότητα

Μέχρι τώρα υποθέταμε ότι τα σώματα δεν παραμορφώνονται υπό την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων.

- Εκτός των ελατηρίων

Στην πραγματικότητα, όλα τα σώματα παραμορφώνονται σε κάποιο βαθμό.

- Η εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων σε ένα σώμα μπορεί να προκαλέσει μεταβολή στο μέγεθος και/ή στο σχήμα του.

Οι εσωτερικές δυνάμεις αντιστέκονται στην παραμόρφωση.

Παραμόρφωση – Ορισμοί

Τάση (stress)

- Είναι ανάλογη της δύναμης που προκαλεί την παραμόρφωση.
- Είναι η εξωτερική δύναμη που ασκείται στο σώμα ανά μονάδα του εμβαδού διατομής.

Ένταση (strain)

- Είναι το αποτέλεσμα της τάσης.
- Αποτελεί ένα μέτρο του βαθμού παραμόρφωσης.

Μέτρο ελαστικότητας

Μέτρο ελαστικότητας (elastic modulus) ονομάζουμε τη σταθερά αναλογίας μεταξύ των μεγεθών της τάσης (stress) και της έντασης (strain).

- Για μικρές τιμές τάσης, η τάση είναι ανάλογη της έντασης.
- Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από το υλικό που παραμορφώνεται.
- Επίσης, εξαρτάται από τη φύση της παραμόρφωσης.

Γενικά, το μέτρο ελαστικότητας συνδέει τη δύναμη που υφίσταται ένα στερεό σώμα με την αντίδραση του σώματος.

$$\text{μέτρο ελαστικότητας} \equiv \frac{\text{τάση}}{\text{ένταση}}$$

Σε κάθε τύπο παραμόρφωσης αντιστοιχεί ένα μοναδικό μέτρο ελαστικότητας.

Τρεις τύποι μέτρων ελαστικότητας

Μέτρο ελαστικότητας του Young (Young's modulus)

- Είναι το μέτρο της αντίστασης που παρουσιάζει το στερεό στη μεταβολή του μήκους του.

Μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση (shear modulus)

- Είναι το μέτρο της αντίστασης που παρουσιάζει το στερεό στην παράλληλη ολίσθηση των επιπέδων του.

Μέτρο ελαστικότητας όγκου (bulk modulus)

- Είναι το μέτρο της αντίστασης που παρουσιάζουν τα στερεά ή τα υγρά σε μεταβολές του όγκου τους.

Το μέτρο ελαστικότητας του Young

Η ράβδος επιμηκύνεται κατά ΔL υπό την επίδραση της δύναμης F .

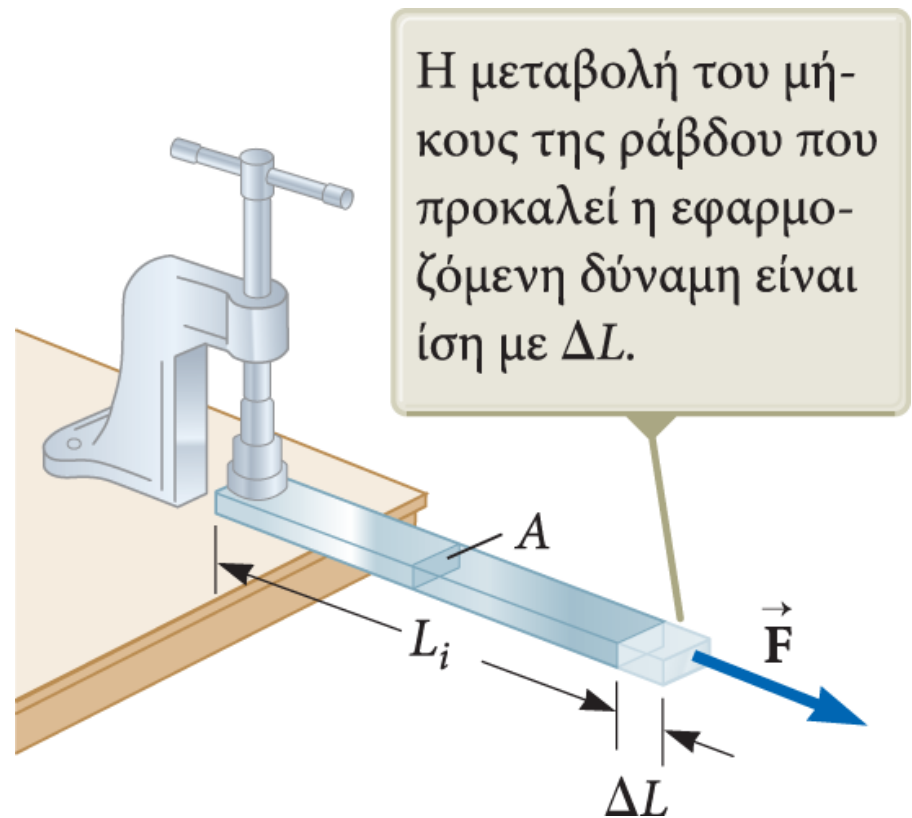
Η **τάση εφελκυσμού** (tensile stress) είναι ο λόγος του μέτρου της εξωτερικής δύναμης προς το εμβαδόν διατομής A .

Η **εφελκυστική ένταση** (tensile strain) είναι ο λόγος της μεταβολής του μήκους προς το αρχικό μήκος.

Το μέτρο ελαστικότητας του Young (Y) είναι ο συνδυασμός των δύο αυτών λόγων:

$$Y \equiv \frac{\text{τάση εφελκυσμού}}{\text{εφελκυστική ένταση}} = \frac{F/A}{\Delta L/L_i}$$

Μονάδες: N/m^2

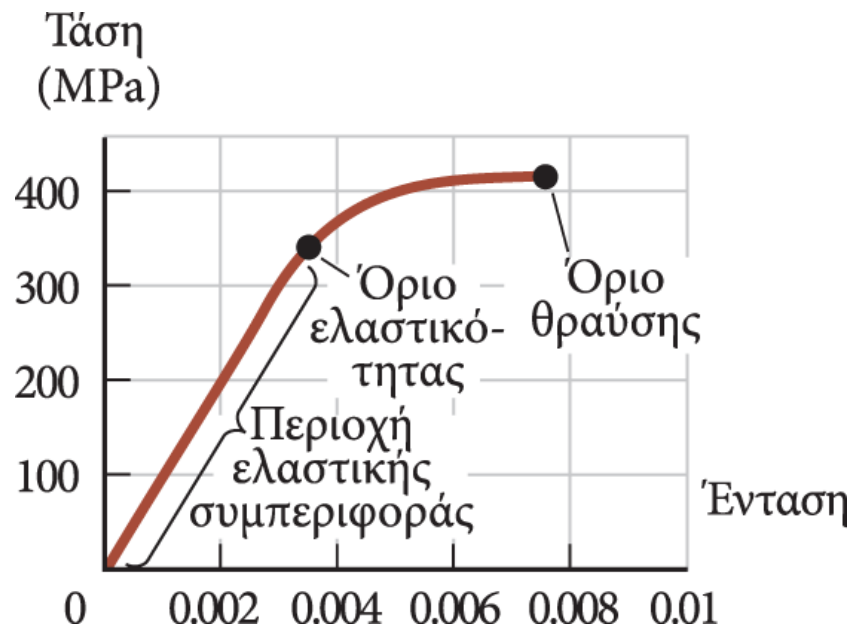


Καμπύλη τάσης-έντασης

Αποδεικνύεται πειραματικά ότι η τάση, εντός ενός συγκεκριμένου εύρους τιμών, είναι ανάλογη προς την ένταση.

Το τμήμα αυτό της καμπύλης *τάσης-έντασης* περιγράφει την ελαστική συμπεριφορά του υλικού.

Το **όριο ελαστικότητας** ενός υλικού είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να δεχθεί το υλικό χωρίς να υποστεί μόνιμη παραμόρφωση.



Καμπύλη τάσης-έντασης (συνέχεια)

Όταν η τάση ξεπεράσει το όριο ελαστικότητας, το σώμα αποκτά μόνιμη παραμόρφωση.

- Η καμπύλη δεν είναι πλέον ευθεία.

Αν η τάση συνεχίσει να αυξάνεται, το υλικό τελικά θα σπάσει.

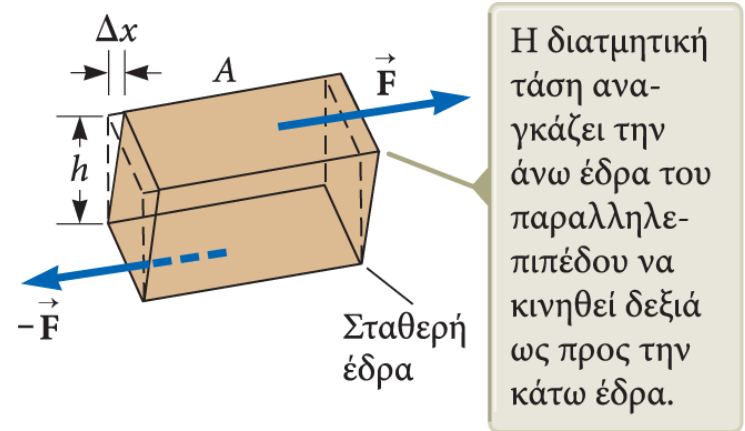
Μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση

Ένα άλλο είδος παραμόρφωσης προκύπτει όταν σε ένα σώμα ασκείται μια δύναμη παράλληλα με μια έδρα του, ενώ η απέναντι έδρα του διατηρείται σταθερή από μια δύναμη αντίθετης κατεύθυνσης.

Η τάση αυτή ονομάζεται **διατμητική τάση**.

Για μικρές διατμητικές παραμορφώσεις, ο όγκος του σώματος δεν μεταβάλλεται.

- Αυτή είναι μια πρώτη καλή προσέγγιση.



α

Μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση (συνέχεια)

Η διατμητική ένταση ορίζεται ως ο λόγος $\Delta x/h$.

- Δx είναι η οριζόντια απόσταση κατά την οποία μετακινείται η έδρα που υφίσταται διάτμηση.
- h είναι το ύψος του σώματος.

Η διατμητική τάση ορίζεται ως ο λόγος F/A .

- F είναι η εφαπτομενική δύναμη.
- A είναι το εμβαδόν της έδρας που υφίσταται διάτμηση.

Το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση είναι ο λόγος της διατμητικής τάσης προς τη διατμητική ένταση.

$$S = \frac{\text{διατμητική τάση}}{\text{διατμητική ένταση}} = \frac{F/A}{\Delta x/h}$$

Μονάδες: N/m^2

Μέτρο ελαστικότητας όγκου

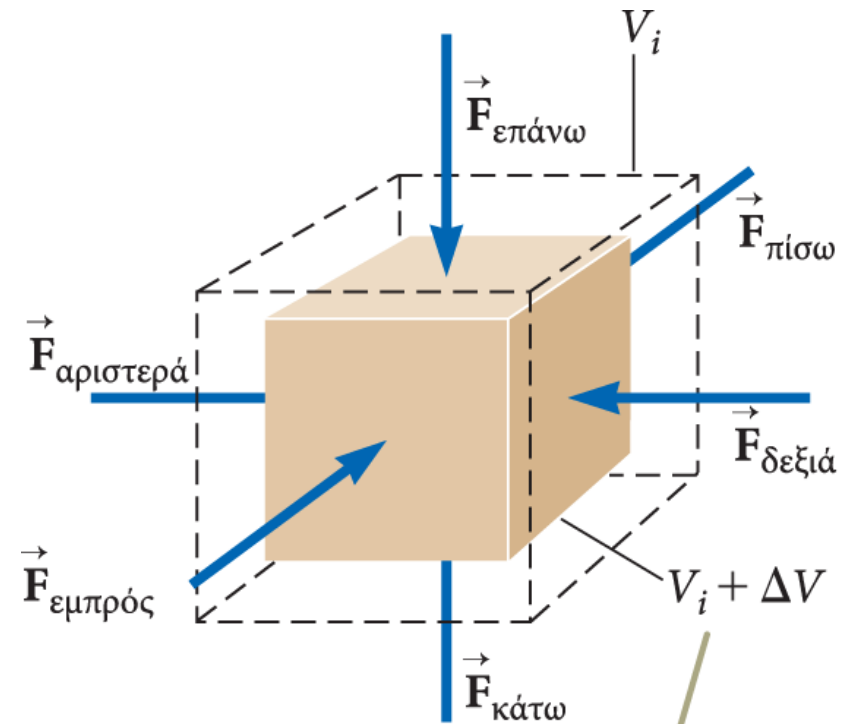
Ένα άλλο είδος παραμόρφωσης προκύπτει όταν μια δύναμη σταθερού μέτρου ασκείται κάθετα σε ολόκληρη την επιφάνεια του σώματος.

Ο όγκος του σώματος μεταβάλλεται, αλλά όχι το σχήμα του.

Η τάση όγκου ορίζεται ως ο λόγος του μέτρου της συνολικής δύναμης F που ασκείται στην επιφάνεια προς το εμβαδόν A της επιφάνειας.

- Το μέγεθος αυτό είναι γνωστό και ως **πίεση** (pressure).

Η ένταση όγκου είναι ο λόγος της μεταβολής του όγκου προς τον αρχικό όγκο.



Ο όγκος του κύβου μεταβάλλεται, αλλά όχι το σχήμα του.

Μέτρο ελαστικότητας όγκου (συνέχεια)

Το μέτρο ελαστικότητας όγκου ορίζεται ως ο λόγος της τάσης όγκου προς την ένταση όγκου.

$$B = \frac{\text{τάση όγκου}}{\text{ένταση όγκου}} = -\frac{\Delta F/A}{\Delta V/V_i} = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V_i}$$

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η αύξηση της πίεσης προκαλεί μείωση του όγκου.

Συμπιεστότητα

Το αντίστροφο του μέτρου ελαστικότητας όγκου ονομάζεται συμπιεστότητα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται αντί του μέτρου ελαστικότητας όγκου.

Μέτρα ελαστικότητας και είδη υλικών

Τα στερεά και τα υγρά έχουν μέτρο ελαστικότητας όγκου.

Τα υγρά δεν υφίστανται διάτμηση ή εφελκυσμό.

- Αν σε ένα υγρό εφαρμοστεί διατμητική ή εφελκυστική δύναμη, το υγρό απλώς ρέει.

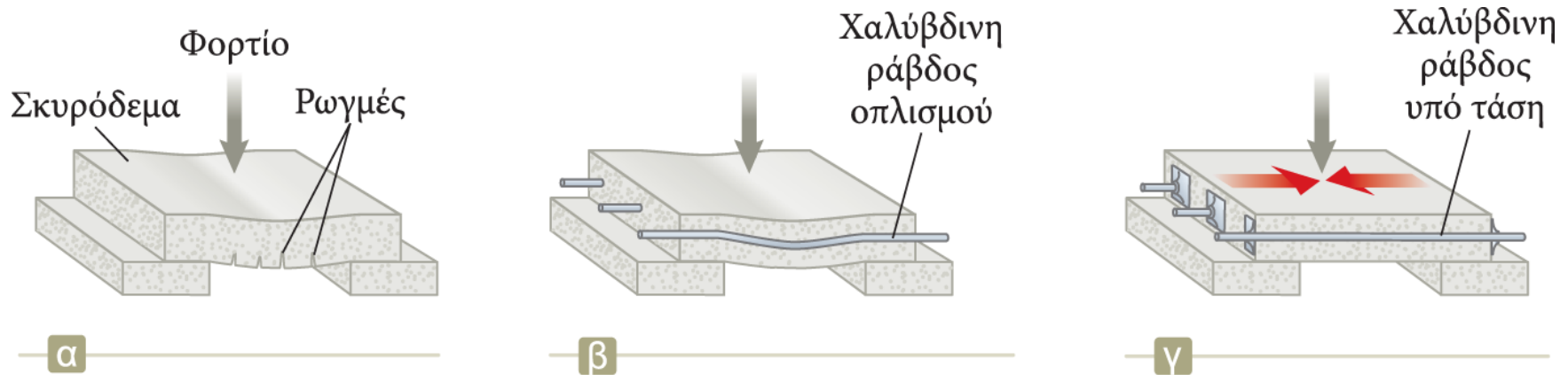
Τιμές μέτρων ελαστικότητας

ΠΙΝΑΚΑΣ M12.1

Τυπικές τιμές μέτρων ελαστικότητας

Υλικό	Μέτρο του Young (N/m ²)	Μέτρο διάτμησης (N/m ²)	Μέτρο ελαστικότητας όγκου (N/m ²)
Βολφράμιο	35×10^{10}	14×10^{10}	20×10^{10}
Χάλυβας	20×10^{10}	8.4×10^{10}	6×10^{10}
Χαλκός	11×10^{10}	4.2×10^{10}	14×10^{10}
Ορείχαλκος	9.1×10^{10}	3.5×10^{10}	6.1×10^{10}
Αλουμίνιο	7.0×10^{10}	2.5×10^{10}	7.0×10^{10}
Γυαλί	$6.5\text{--}7.8 \times 10^{10}$	$2.6\text{--}3.2 \times 10^{10}$	$5.0\text{--}5.5 \times 10^{10}$
Χαλαζίας	5.6×10^{10}	2.6×10^{10}	2.7×10^{10}
Νερό	—	—	0.21×10^{10}
Υδράργυρος	—	—	2.8×10^{10}

Προεντεταμένο σκυρόδεμα



Αν η τάση που ασκείται σε ένα στερεό σώμα ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, το σώμα υφίσταται θραύση.

Κάτω από κανονικές συνθήκες, οι πλάκες σκυροδέματος μικρής διατομής είναι πολύ εύθραυστες.

- Οι πλάκες από σκυρόδεμα έχουν την τάση να κάμπτονται κάτω από το ίδιο τους το βάρος και να εμφανίζουν ρωγμές στα τμήματα που δεν υποστηρίζονται.

Η αντοχή της πλάκας σκυροδέματος μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση χαλύβδινου οπλισμού.

Το σκυρόδεμα είναι πιο ανθεκτικό στη θλίψη από ό,τι στον εφελκυσμό.

Προεντεταμένο σκυρόδεμα (συνέχεια)

Με την προένταση του σκυροδέματος επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση στη διατμητική αντοχή του.

Κατά τη χύτευση του σκυροδέματος, οι χαλύβδινες ενισχυτικές ράβδοι εφελκύνονται με την εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων.

Μόλις πήξει τελείως το σκυρόδεμα, σταματάει η εφαρμογή των εξωτερικών δυνάμεων.

Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια μόνιμη εφελκυστική τάση στον χάλυβα, η οποία με τη σειρά της προσδίδει θλιπτική τάση στο σκυρόδεμα.

Αυτό επιτρέπει στο σκυρόδεμα να μπορεί να δέχεται πολύ μεγαλύτερα φορτία.

Μοντέλο ανάλυσης – Άκαμπτο σώμα σε ισορροπία

Ένα άκαμπτο σώμα που βρίσκεται σε ισορροπία δεν έχει μεταφορική ή γωνιακή επιτάχυνση.

Η συνισταμένη εξωτερική δύναμη που δέχεται το σώμα είναι μηδενική:

$$\sum \vec{F}_{\text{εξωτ.}} = 0$$

- Αυτή είναι η συνθήκη ισορροπίας του σώματος στη μεταφορική κίνηση.

Η συνισταμένη εξωτερική ροπή που ασκείται στο σώμα είναι μηδενική:

$$\sum \vec{\tau}_{\text{εξωτ.}} = 0$$

- Αυτή είναι η συνθήκη ισορροπίας του σώματος στην περιστροφική κίνηση.