

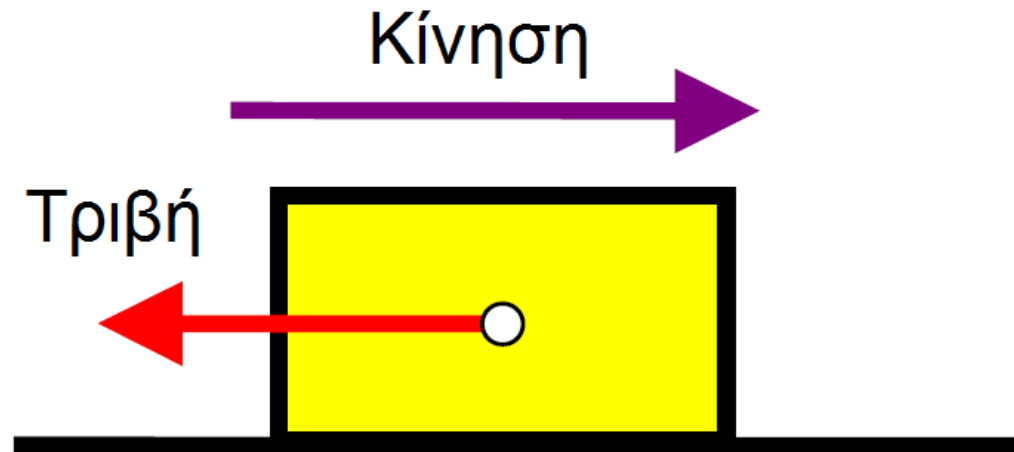


ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

Εισαγωγή

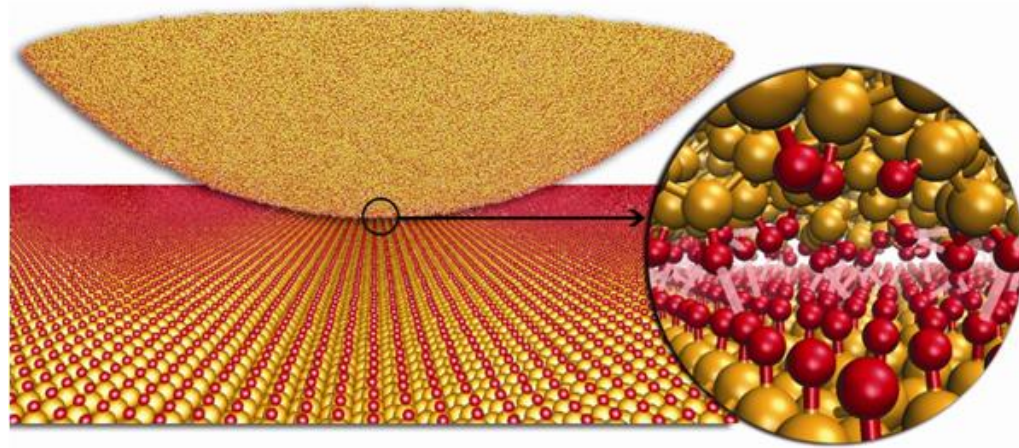
Γενικά για την Τριβή

- Τριβή είναι η δύναμη που αναπτύσσεται στην κοινή περιοχή μεταξύ δύο επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή, με διεύθυνση παράλληλη και φορά αντίθετη της κίνησης (ή της επικείμενης κίνησης) της μιας επιφάνειας πάνω στην άλλη. Η τριβή είναι δύναμη επαφής και μετριέται σε N (Newton).
- Το μέγεθος της παραγόμενης τριβής εκφράζει την ευκολία ή τη δυσκολία της σχετικής κίνησης δύο σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή.

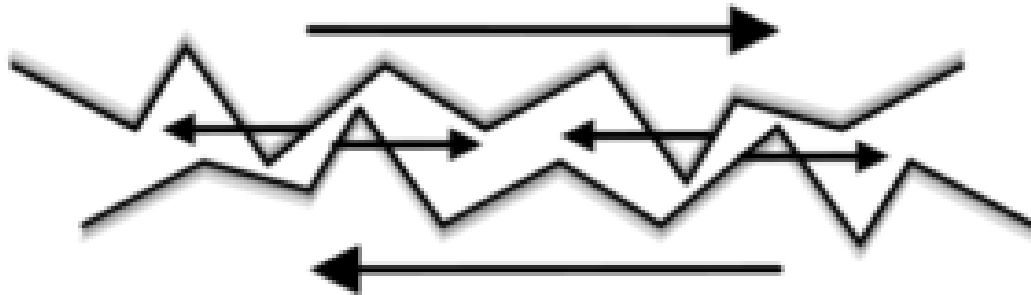


Που οφείλεται;

- Η δύναμη τριβής οφείλεται σε μαγνητικές μοριακές και ατομικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων των δύο επαπτόμενων επιφανειών.



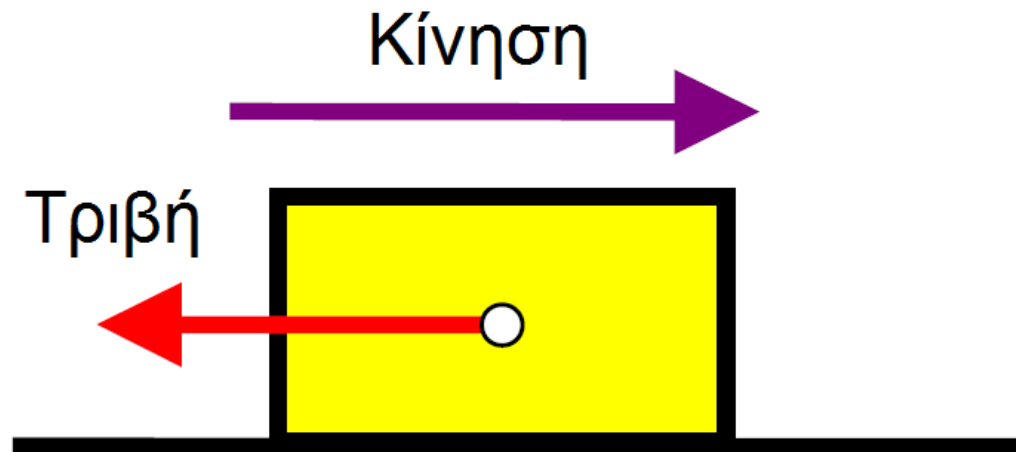
- Επίσης οφείλεται σε δυνάμεις αντίδρασης που αναπτύσσονται μεταξύ των δύο επιφανειών, λόγω των ανωμαλιών που υπάρχουν σε αυτές.



Από τι εξαρτάται;

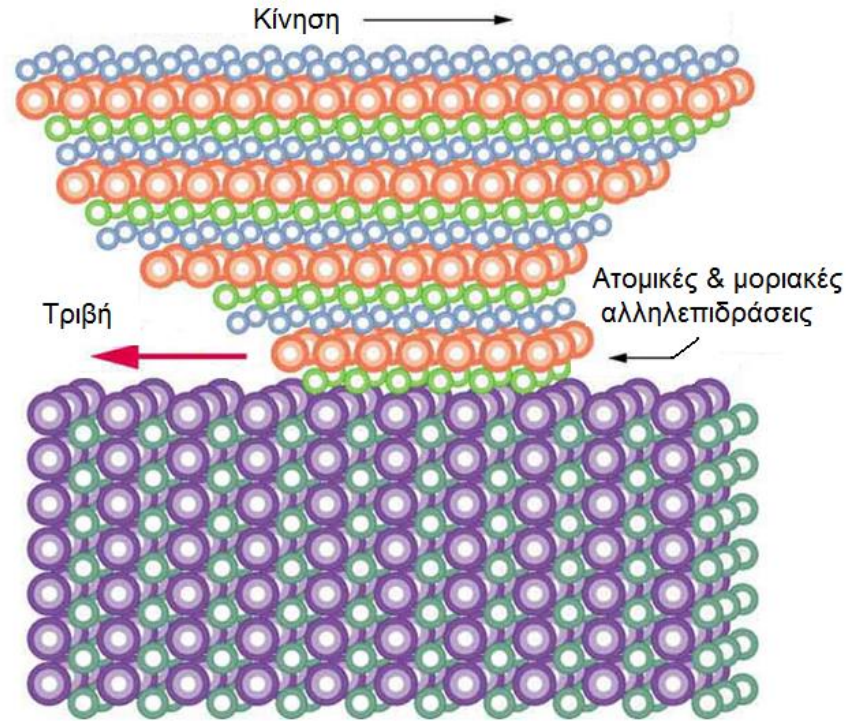
Το μέγεθος της τριβής εξαρτάται από:

- Τη δύναμη που εφαρμόζει η μια πάνω στην άλλη. Όταν ένα σώμα τείνει να κινηθεί πάνω σε ένα σταθερό δάπεδο, η δύναμη μεταξύ των επιφανειών είναι το βάρος του σώματος.
- Τη τραχύτητα και γεωμετρία των επαπτόμενων επιφανειών.
- Η δύναμη τριβής είναι ανεξάρτητη από το εμβαδόν των δύο επαπτόμενων επιφανειών.



Μικροδομική Προέλευση Τριβής

- Στην πραγματικότητα, όταν δύο σώματα εφάπτονται, η πραγματική επιφάνεια επαφής (μικροσκοπικά μόνο ορατή) είναι πολύ μικρότερη από αυτήν που αρχικά φαίνεται, και είναι ανάλογη της κάθετης δύναμης (βάρους του σώματος) γιατί τα σημεία επαφής παραμορφώνονται πλαστικά κάτω από τις μεγάλες τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτά.
- Πολλά σημεία επαφής παθαίνουν «ψυχρή συγκόλληση». Στα σημεία επαφής, τα μόρια των δύο επιφανειών είναι τόσο κοντά το ένα στο άλλο, ώστε εξασκούν μεταξύ τους ισχυρές διαμοριακές και διατομικές δυνάμεις.
- Όταν ένα σώμα ολισθαίνει πάνω σε ένα άλλο, η αντίσταση της τριβής έχει σχέση με το σπάσιμο αυτών των χιλιάδων μικροσκοπικών συγκολλήσεων, οι οποίες συνεχώς αναμορφώνονται καθώς δημιουργούνται νέες τυχαίες επαφές.

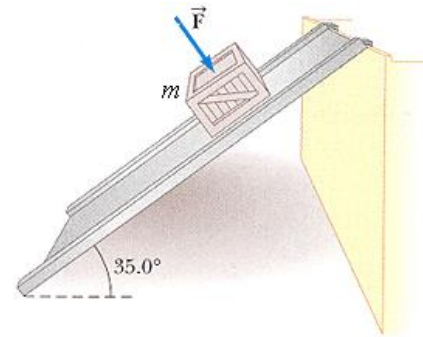


Μικροδομική Εξήγηση Ανεξαρτησίας Τριβής από το Εμβαδό Επαφής

- Έτσι, όταν ένας πλίνθος ολισθαίνει πάνω σε μια επιφάνεια, η δύναμη τριβής που αναπτύσσεται είναι η ίδια είτε η επαφή γίνεται με τη μεγάλη είτε με τη μικρή έδρα του πλίνθου (η μικροσκοπική επιφάνεια επαφής είναι η ίδια για όλες τις έδρες).
 - Όταν εφάπτεται η μεγάλη έδρα, ένας σχετικά μεγάλος αριθμός μικρών επαφών στηρίζουν το φορτίο.
 - Όταν εφάπτεται η μικρή έδρα υπάρχουν λιγότερες επαφές (η ορατή επιφάνεια είναι μικρή), αλλά το εμβαδόν κάθε επαφής είναι μεγαλύτερο κατά τον ίδιο ακριβώς παράγοντα, εξαιτίας της μεγαλύτερης πίεσης που εξασκεί ο όρθιος πλίνθος (στήριξη στη μικρή έδρα) πάνω στον μικρότερο αριθμό επαφών που στηρίζουν το ίδιο βάρος.

Είδη Τριβής

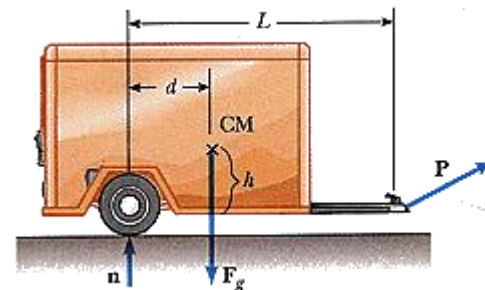
➤ Στατική τριβή



➤ Τριβή Ολίσθησης

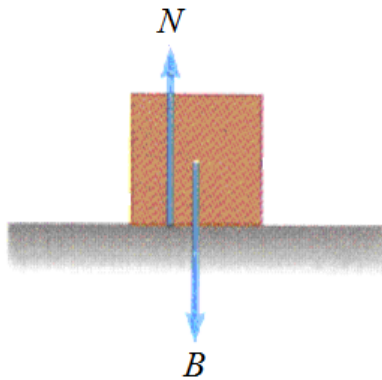


➤ Τριβή Κύλισης

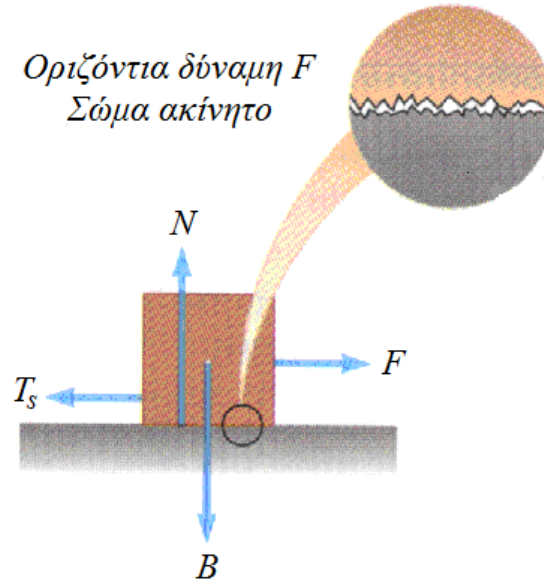


Στατική Τριβή – Τριβή Ολίσθησης

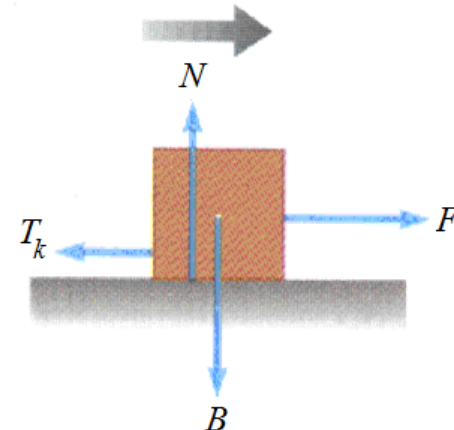
Μηδενική οριζόντια δύναμη
Σώμα ακίνητο



Οριζόντια δύναμη F
Σώμα ακίνητο

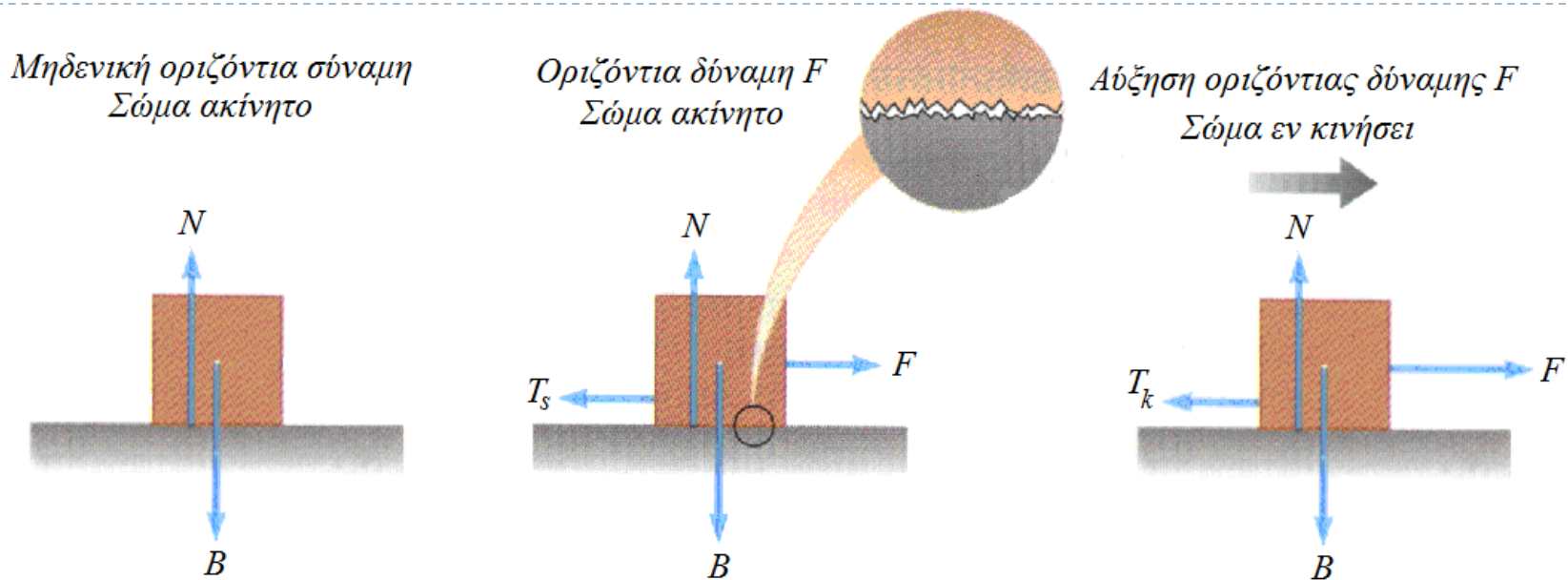


Αύξηση οριζόντιας δύναμης F
Σώμα εν κινήσει



- Ένα κουτί βρίσκεται πάνω σε ένα τραπέζι. Στην αρχή οι μόνες δυνάμεις που ασκούνται στο κουτί είναι το βάρος B και η αντίδραση N της επιφάνειας στήριξης (η δύναμη αντίδρασης είναι ίση και αντίθετη με το βάρος του κουτιού και το κουτί ισορροπεί).
- Όταν εφαρμοστεί μια μικρή εξωτερική οριζόντια δύναμη F το κουτί παραμένει ακίνητο. Αυτό συμβαίνει γιατί η εφαρμογή μικρής οριζόντιας δύναμης προκαλεί την ανάπτυξη δύναμης τριβής στην επιφάνεια κουτιού/τραπέζιου, που είναι ίση και αντίθετη με την εφαρμοζόμενη δύναμη.

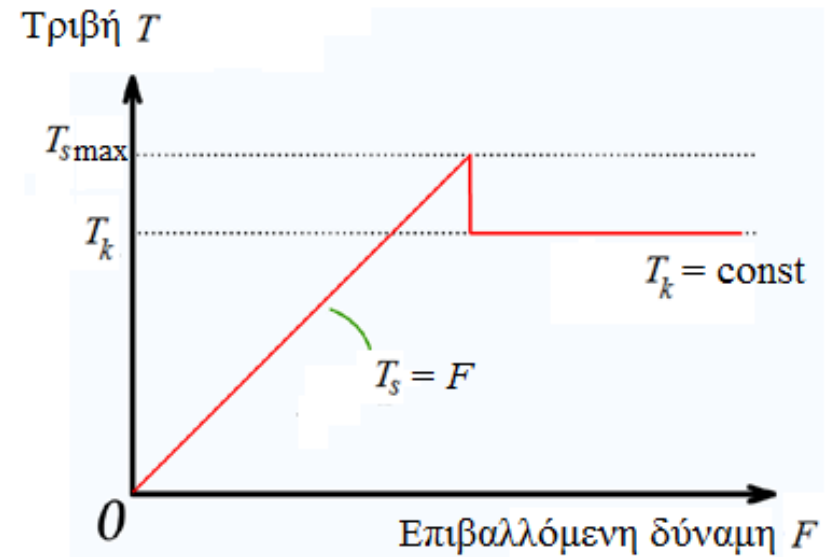
...Στατική Τριβή – Τριβή Ολίσθησης



- Όσο η εφαρμοζόμενη δύναμη αυξάνεται σε μέγεθος αυξάνεται και το μέγεθος της ενάντιας στην κίνηση δύναμης τριβής, μέχρις ενός κρίσιμου σημείου. Σε αυτό το κρίσιμο σημείο η αναπτυχθείσα τριβή λέγεται μέγιστη στατική τριβή (T_{smax}).
- Αν η εφαρμοζόμενη εξωτερική δύναμη συνεχίσει να αυξάνει (μετά το κρίσιμο σημείο) τότε προκύπτει κίνηση (ολίσθηση του κουτιού).
- Καθώς το κουτί είναι σε κίνηση, η δύναμη τριβής συνεχίζει να δρα. Η τριβή αυτή, που παρουσιάζεται κατά την κίνηση, ονομάζεται τριβή ολίσθησης ή κινητική τριβή (T_k).

Μεταβολή Δύναμης Τριβής σε Σχέση με την Εξωτερική Δύναμη

- Η κινητική τριβή (T_k) έχει σταθερή τιμή και είναι ανεξάρτητη από την τιμή της εφαρμοζόμενης δύναμης ή την ταχύτητα της κίνησης.
- Είναι μικρότερη από τη μέγιστη κινητική τριβή ($T_{smax} > T_k$)
- Για όσο διάστημα το σώμα είναι σε ακινησία το μέγεθος της αναπτυσσόμενης στατικής τριβής είναι ίσο με το μέγεθος της εφαρμοζόμενης εξωτερικής δύναμης (όσο αυξάνει η εξωτερική δύναμη τόσο αυξάνει και η δύναμη τριβής).
- Όταν αρχίζει η κίνηση, το μέγεθος της δύναμης τριβής (τριβή ολίσθησης) παραμένει σταθερό. Η τιμή της είναι σταθερή, χαμηλότερη από τη μέγιστη στατική τριβή.



Συντελεστής Τριβής

Η μέγιστη δύναμη στατικής τριβής καθώς και η δύναμη τριβής ολίσθησης είναι ανάλογες της κάθετης δύναμης αντίδρασης (N) που αναπτύσσεται κατακόρυφα (κάθετα στην επιφάνεια επαφής) και ενός συντελεστή τριβής.

Ο συντελεστής τριβής:

- Είναι καθαρός αριθμός
- Εξαρτάται από τον τύπο του υλικού σύστασης
- Εξαρτάται από τη φύση των εφραπτόμενων επιφανειών (τραχύτητα των δύο επιφανειών).
- Εκφράζει τη ευκολία ή τη δυσκολία της μεταξύ τους ολίσθησης και το μέγεθος της μηχανικής και μοριακής τους αλληλεπίδρασης (όσο μεγαλύτερη η αλληλεπίδραση τόσο μεγαλύτερος ο συντελεστής τριβής).

Στατικός και Κινητικός Συντελεστής Τριβής

Διακρίνουμε το συντελεστή στατικής τριβής μ_s (τα επαπτόμενα σώματα σε στάση):

$$T_{s \max} = \mu_s N$$

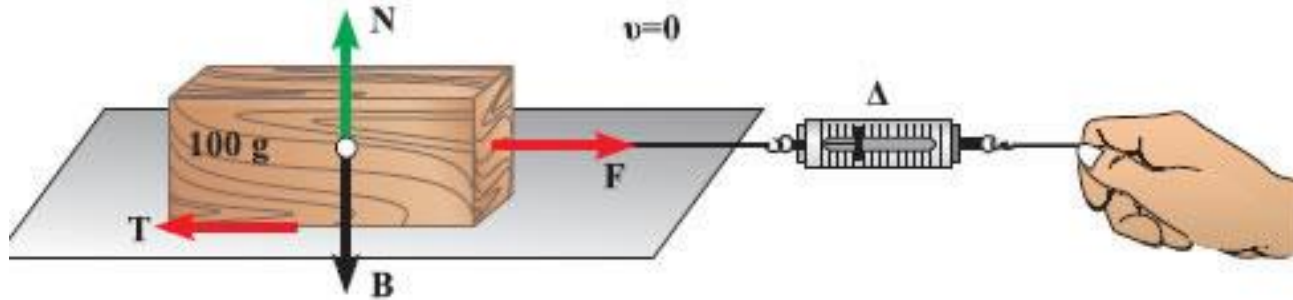
και το συντελεστή κινητικής τριβής μ_k (τα επαπτόμενα σώματα σε κίνηση):

$$T_k = \mu_k N$$

Ισχύει:

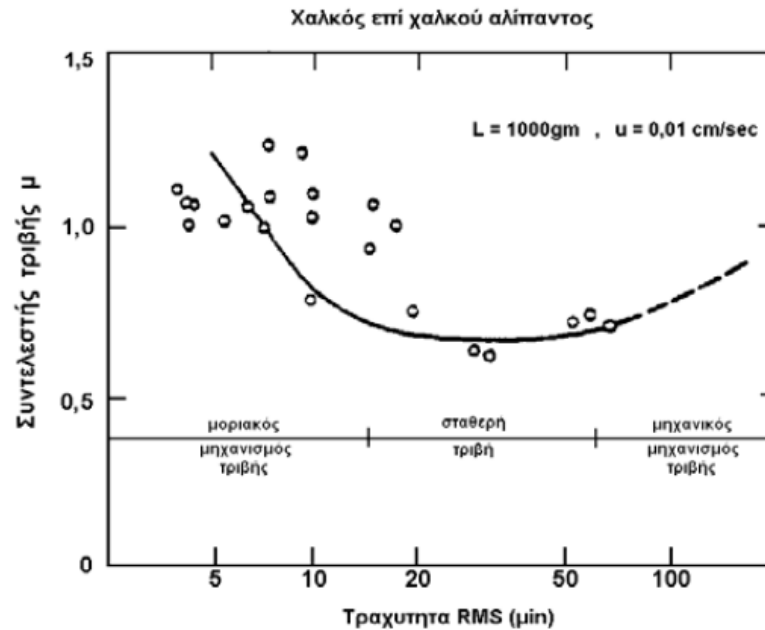
$$\mu_s > \mu_k$$

Υπολογισμός Συντελεστή Τριβής



- Η παραπάνω συσκευή (ρυμουλκούμενο έλκηθρο) χρησιμεύει για τη μέτρηση του συντελεστή στατικής τριβής διαφόρων υλικών.
- Αποτελείται από ένα σώμα γνωστού βάρους που έλκεται από ένα ελατήριο - μετρητή. Η μετακινούμενη (ολισθαίνουσα) επιφάνεια, συνήθως κάποιο υλικό υπόδησης, τοποθετείται κάτω από το σώμα.
- Το ελατήριο τραβά το σώμα (της γνωστής μάζας) μέχρι αυτό να μετακινηθεί. Τη στιγμή που αρχίζει η μετακίνηση μετριέται η εφαρμοζόμενη (οριζόντια) δύναμη αφέλκυσης.
- ο βάρος του σώματος καθορίζει και την κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης (ίση και αντίθετη).
- Ο συντελεστής τριβής είναι ο λόγος: δύναμη ελατηρίου / δύναμη του βάρους.

Μεταβολή Συντελεστή Τριβής με την Τραχύτητα



- Για πολύ λείες επιφάνειες , η τριβή τείνει να είναι υψηλή επειδή η πραγματική επιφάνεια επαφής αυξάνεται υπερβολικά, με αντίστοιχη αύξηση των μοριακών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των εφραπτόμενων σωμάτων.
- Στις πολύ τραχείες επιφάνειες η τριβή είναι και πάλι υψηλή εξαιτίας της αυξημένης απαίτησης «ύψωσης» της μιας επιφάνειας επί των προεξοχών της άλλης.
- Για ενδιάμεσες τιμές τραχύτητας, που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση, η τριβή είναι σχεδόν ανεξάρτητη της τραχύτητας.

Τιμές Συντελεστή Τριβής

Coefficient of Static Friction

Metal on metal	0.15–0.60
Metal on wood	0.20–0.60
Metal on stone	0.30–0.70
Metal on leather	0.30–0.60
Wood on wood	0.25–0.50
Wood on leather	0.25–0.50
Stone on stone	0.40–0.70
Earth on earth	0.20–1.00
Rubber on concrete	0.60–0.90

Material Pair	μ (Static)	μ (Kinetic)
Aluminum on mild steel	0.61	0.47
Teflon on teflon	0.04	—
Teflon on steel	0.04	—
Copper on mild steel	0.53	0.53
Nickel on nickel	1.10	0.53
Brass on mild steel	0.51	0.44
Brass on cast iron	—	0.30
Copper on cast iron	1.05	0.29
Aluminum on aluminum	1.05	1.4
Cast iron on cast iron	1.10	0.15
Bronze on cast iron	—	0.22

Τριβή Κύλισης



- Η τριβή κύλισης είναι η δύναμη που δέχεται ένας κύλινδρος κατά την περιστροφή του πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια και εμποδίζει την κίνησή του.
- Η τριβή κύλισης οφείλεται κυρίως στις αντιστάσεις της επιφάνειας του δαπέδου όπου πρόκειται να βρεθεί ο κύλινδρος, λόγω της παραμόρφωσης της επιφάνειας από την πίεση στο προηγούμενο μέρος της, όπου βρίσκεται ο κύλινδρος.
- Το μέγεθος της τριβής κύλισης εξαρτάται από το βάρος του κυλίνδρου (κάθετη δύναμη αντίδρασης), από το μήκος της ακτίνας του, από το συντελεστή τριβής των δύο επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή και από το βαθμό παραμόρφωσης τους.

Τριβή Κύλισης



- Για να τεθεί ο κύλινδρος σε περιστροφή πρέπει να εφαρμόσουμε σε αυτόν μια ροπή δύναμης.
- Η ροπή αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μακρύτερα από το σημείο στήριξης εφαρμόζεται η δύναμη (μηχανικό πλεονέκτημα).
- Στις ρόδες του αυτοκινήτου η τριβή κύλισης είναι αντίστροφος ανάλογη της διαμέτρου του τροχού και αυξάνει με τη μείωση της πίεσης του αέρα των ελαστικών. Η τριβή κύλισης σε σύγκριση με τη στατική τριβή και την τριβή ολίσθησης είναι πολύ μικρή (το 1/100 μέχρι το 1/1000 τους).
- Γι' αυτό και από την αρχαία εποχή μέχρι σήμερα οι κύλινδροι (ο τροχός) χρησιμοποιούνται στη μετακίνηση μεγάλων φορτίων.

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

1. Προβλήματα Τριβής στο Επίπεδο

Βήματα Επίλυσης Προβλημάτων Τριβής

- 1) Σχεδιάζουμε τα διαγράμματα ελευθέρων σωμάτων (ΔΕΣ). Ξεκινάμε από το σώμα που τείνει άμεσα να κινηθεί π.χ. σφήνα.
- 2) Θεωρούμε διευθύνσεις τριβής T παράλληλες με σε μία εκ των δύο επιφανειών επαφής και φορές τριβής αντίθετες με τη φορά που τείνει να κινηθεί το σώμα.
- 3) Οι αντιδράσεις N ένεκα της επαφής σημειώνονται κάθετες στις δυνάμεις τριβής.
- 4) Λαμβάνουμε υπόψη την αρχή δράσης-αντίδρασης για να μεταφέρουμε τριβές T και αντιδράσεις N στα σώματα που βρίσκονται σε επαφή.
- 6) Θεωρούμε ένα «βολικό» ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων στο οποίο βρίσκονται συνολικά οι περισσότερες δυνάμεις.
- 7) Τις δυνάμεις των οποίων οι διευθύνσεις δε βρίσκονται πάνω στο (x,y) σύστημα συντεταγμένων τις αναλύουμε σε x και y συνιστώσες.

...Βήματα Επίλυσης Προβλημάτων Τριβής

8) Αν το σώμα είναι ακίνητο ή κινείται με σταθερή ταχύτητα, εφαρμόζουμε τις τρεις εξισώσεις ισορροπίας:

$$\sum F_x = \sum F_y = \sum M_{\text{σημείου}} = 0$$

9) Διαφορετικά εφαρμόζουμε τις τρεις εξισώσεις:

$$\sum F_x = ma_x, \sum F_y = 0 \text{ (λόγω επαφής)}, \sum M_{\text{σημείου}} = I\alpha_{\gamma\omega\nu}$$

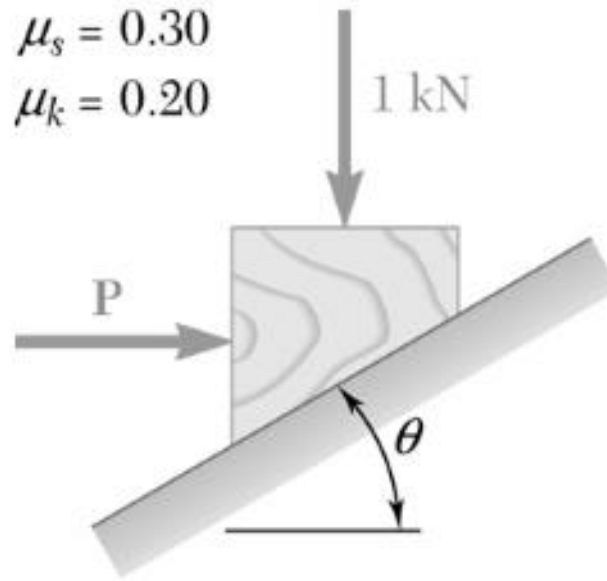
10) Αν το σώμα είναι οριακά ακίνητο και επίκειται η κίνηση του λαμβάνουμε υπόψη τη σχέση ότι το μέτρο της τριβής είναι:

$$T = \mu_s N$$

11) Αν έχουμε κίνηση (παραβιάζεται δηλαδή η προηγούμενη σχέση) εφαρμόζουμε:

$$T = \mu_k N$$

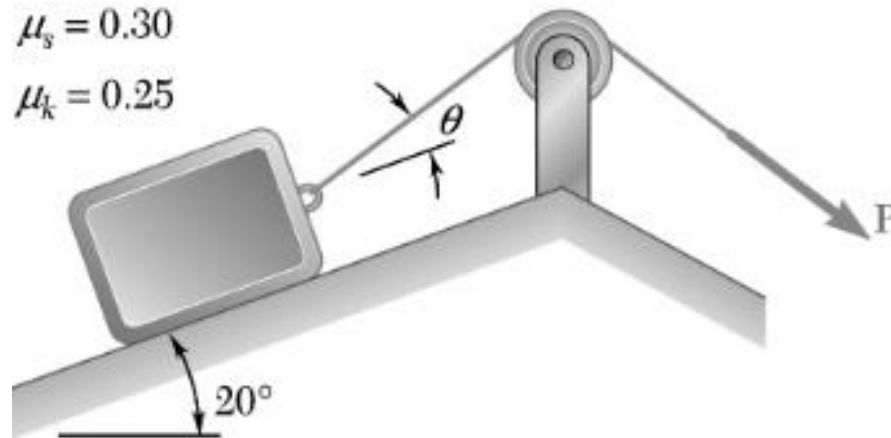
Άσκηση 1.1



Να εξεταστεί αν το στερεό είναι σε ισορροπία και να υπολογισθεί το μέτρο και η διεύθυνση της δύναμης τριβής αν:

- (a) $\theta = 30^\circ$ και $P = 200\text{N}$
- (b) $\theta = 35^\circ$ και $P = 400\text{N}$.

Άσκηση 1.2



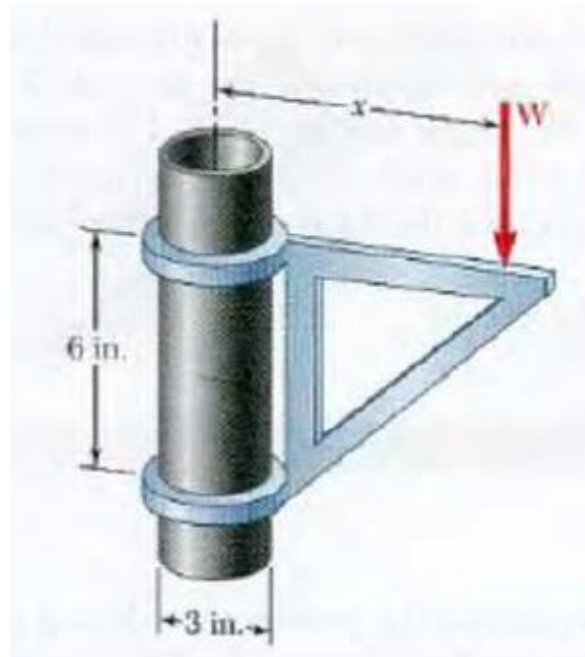
Να εξεταστεί αν το στερεό βάρους 20KN είναι σε ισορροπία και να υπολογισθεί το μέτρο και η διεύθυνση της δύναμης τριβής αν:

(a) $\theta = 20^\circ$ και $P = 8\text{KN}$

(b) $\theta = 15^\circ$ και $P = 12.5\text{KN}$.

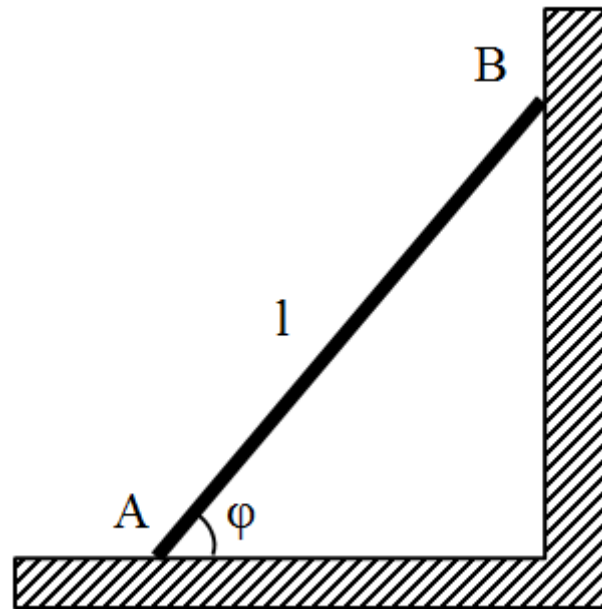
Να εξετασθεί για ποιες τιμές της P το στερεό είναι σε ισορροπία αν $\theta = 25^\circ$

Άσκηση 1.3



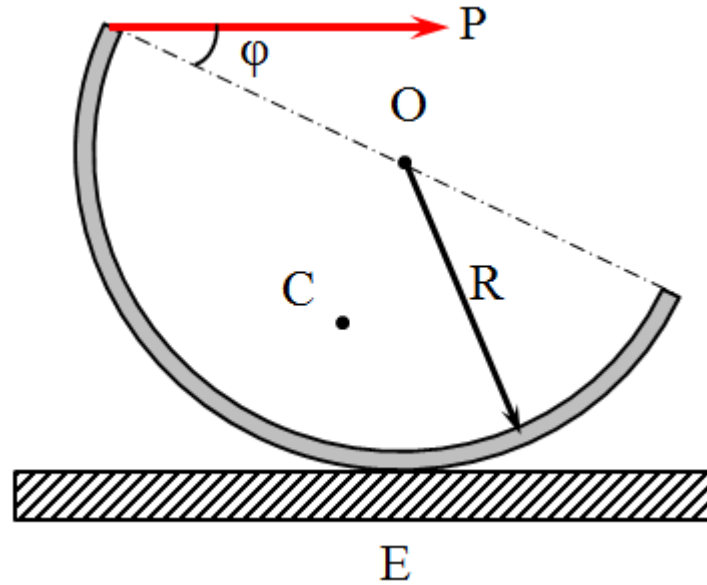
Το κινητό υποστήριγμα του σχήματος μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε ύψος στον 3in διαμέτρου σωλήνα. Αν ο στατικό συντελεστής τριβής μεταξύ υποστηρίγματος και σωλήνα είναι 0.25, να υπολογισθεί η ελάχιστη απόσταση x στην οποία το βάρος W δύναται να τοποθετηθεί. Να θεωρηθεί αμελητέο το βάρος υποστηρίγματος.

Άσκηση 1.4



Η ομογενής ράβδος AB βάρους W τοποθετείται όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Αν ο στατικός συντελεστής τριβής είναι ίσος με μ τόσο με το κατακόρυφο όσο και με το οριζόντιο επίπεδο, να βρεθεί η μικρότερη γωνία φ για την οποία υπάρχει ισορροπία.

Άσκηση 1.5



Το ημικυλινδρικό κέλυφος του σχήματος έχει βάρος W και μέση ακτίνα R ενώ το πάχος του είναι πολύ μικρό. Ο συντελεστής τριβής είναι $\mu_s = 0.2$, Να βρεθεί η γωνία φ για την οποία θα παρατηρηθεί ολίσθηση καθώς το μέτρο της οριζόντιας δύναμης αυξάνει σταδιακά. Δίδεται : $OC = 2R/\pi$.

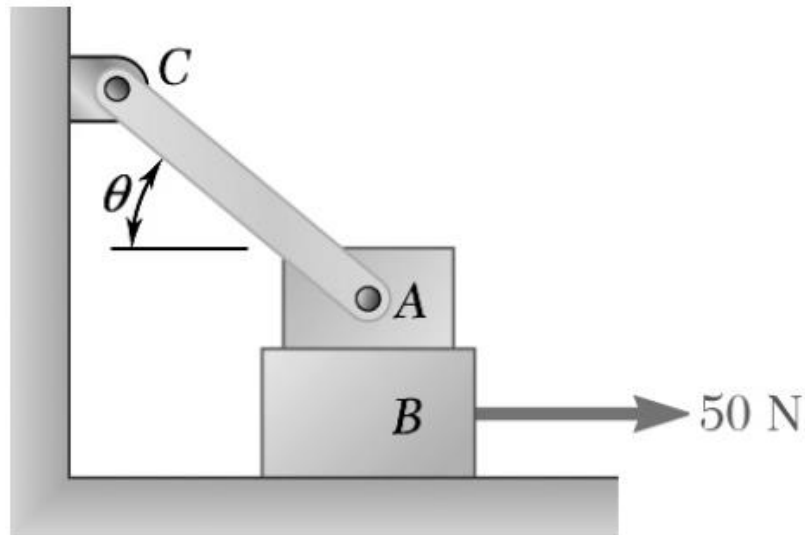
Άσκηση 1.6



Ο στατικός και δυναμικός συντελεστής τριβής είναι 0.4 και 0.3 αντίστοιχα μεταξύ όλων των επιφανειών σε επαφή. Να υπολογισθεί η δύναμη P για την οποία επίκειται η κίνηση του 60lb κιβωτίου αν:

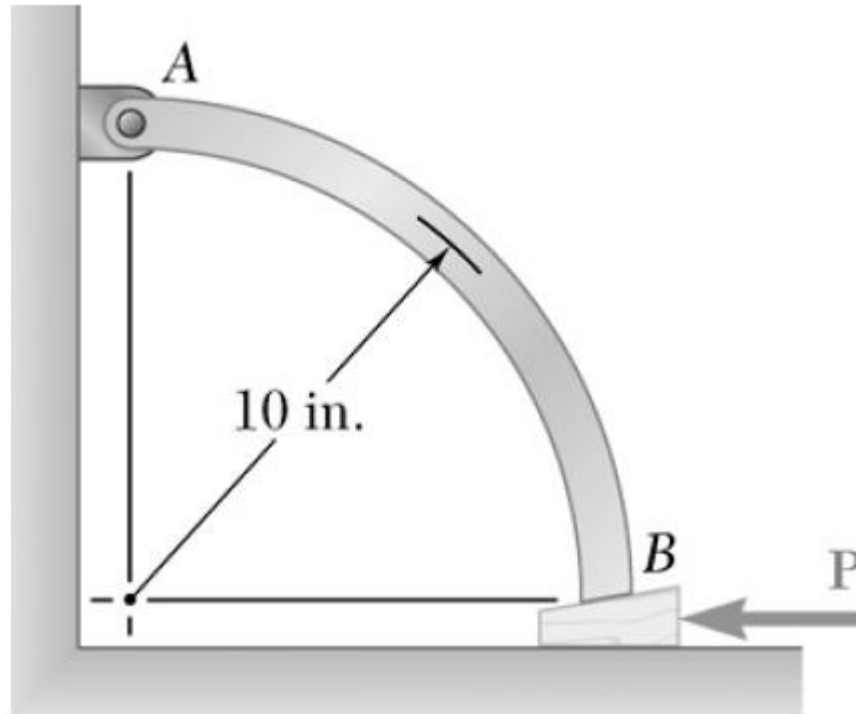
- (a) Το σχοινί AB είναι ακέραιο
- (b) Το σχοινί AB είναι κομμένο.

Άσκηση 1.7



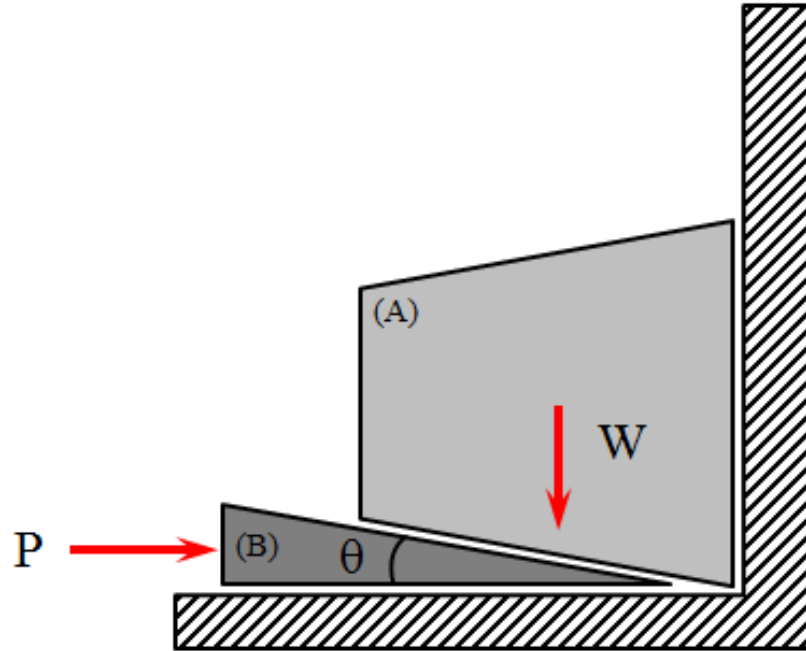
Ο στατικός συντελεστής τριβής μεταξύ όλων των επιφανειών σε επαφή είναι 0.2. Τα κιβώτια A και B ζυγίζουν 8kg και 12kg, αντίστοιχα. Να υπολογισθεί η γωνία θ για την οποία επίκειται η κίνηση του κιβωτίου B αν η ράβδος είναι αβαρής.

Άσκηση 1.8



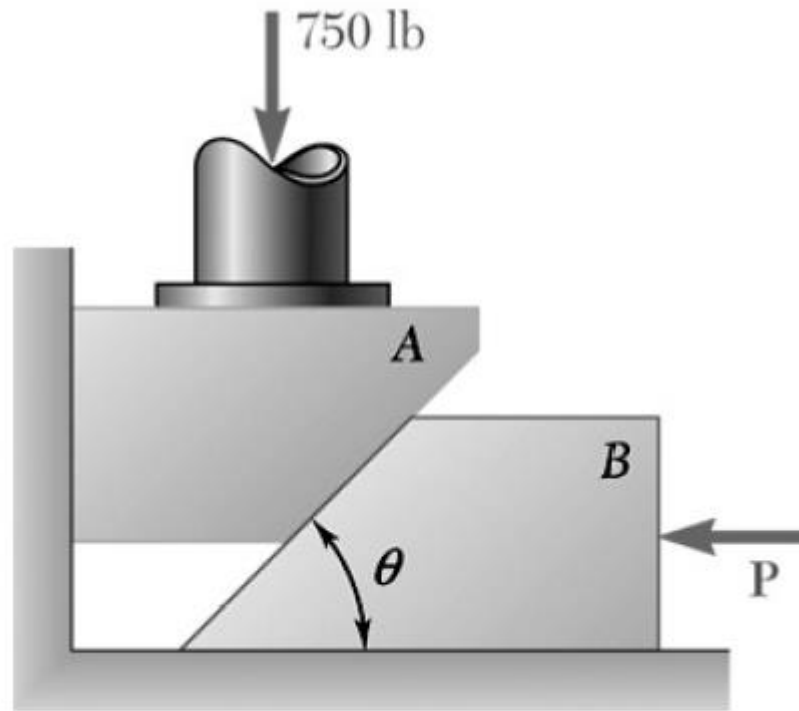
Μία σφήνα πιέζεται κάτω από τη διατομή B της 12lb τοξοειδούς ράβδου. Αν ο συντελεστής στατικής τριβής μεταξύ σφήνας και ράβδου είναι 0.45 ενώ μεταξύ σφήνας και δαπέδου 0.25, να υπολογισθεί η ελάχιστη δύναμη P για την ανύψωση της διατομής B. Το κέντρο βάρους ενός τεταρτοκυκλίου απέχει $0.9R$ από το κέντρο του.

Άσκηση 1.9



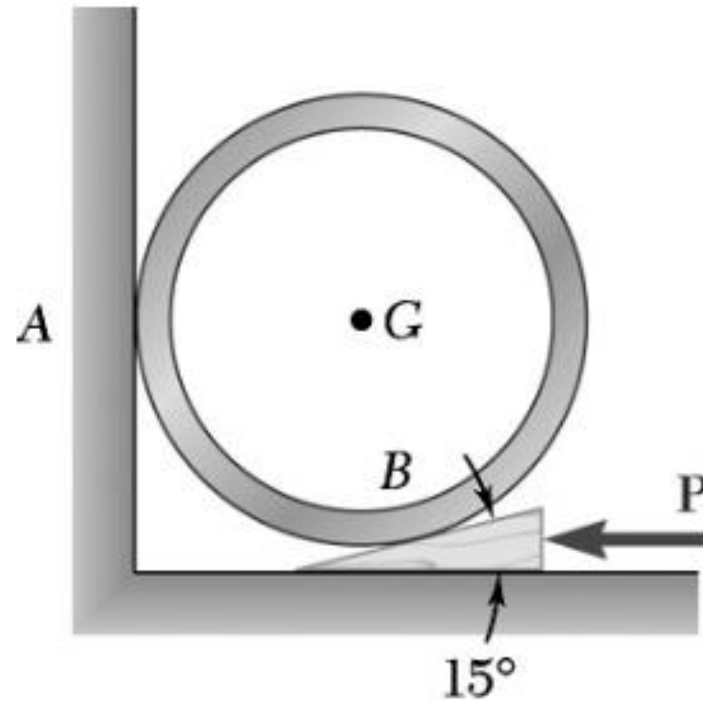
Να υπολογισθεί η οριζόντια δύναμη P που απαιτείται, ώστε να αρχίσει η ανύψωση του βάρους (A) $W=10\text{Kg}$ με τη βοήθεια της σφήνας (B) αμελητέου βάρους. Ο συντελεστής τριβής μεταξύ (A) και (B) είναι 0.4 μεταξύ (A) και τοίχου 0.3 ενώ μεταξύ σφήνας και εδάφους είναι αμελητέος. Η γωνία της σφήνας είναι $\theta=30^\circ$.

Άσκηση 1.10



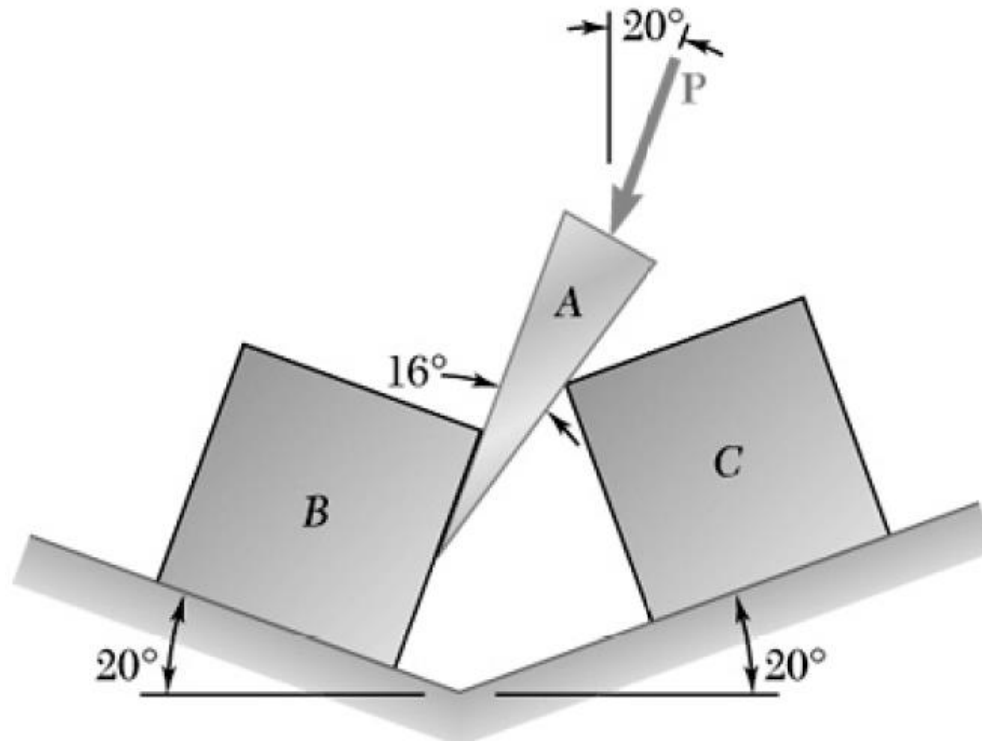
Το σώμα A στηρίζει έναν σωλήνα και στηρίζεται στο σώμα B. Γνωρίζοντας ότι ο στατικός συντελεστής τριβής μεταξύ όλων των επιφανειών είναι 0.25 και ότι $\theta=45^\circ$, να υπολογισθεί η ελάχιστη δύναμη P που απαιτείται για την ανύψωση του σωλήνα.

Άσκηση 1.11





Ο σωλήνας ζυγίζει 100 kg . Γνωρίζοντας ότι ο στατικός συντελεστής τριβής μεταξύ όλων των επιφανειών είναι 0.2 , να υπολογισθεί η ελάχιστη δύναμη P που απαιτείται να ασκηθεί στη σφήνα για την ανύψωση του σωλήνα.

Άσκηση 1.12



Η αμελητέου βάρους σφήνα A βρίσκεται μεταξύ δύο σωμάτων B, C 80kg τα οποία στηρίζονται σε κεκλιμένα δάπεδα όπως φαίνεται στο σχήμα. Η ο στατικός συντελεστής ολίσθησης μεταξύ σφήνας και σωμάτων είναι 0.4, μεταξύ σώματος B και εδάφους 0.6 ενώ μεταξύ σώματος C και εδάφους 0.4. Να υπολογισθεί για ποια δύναμη P επίκειται κίνηση της σφήνας.



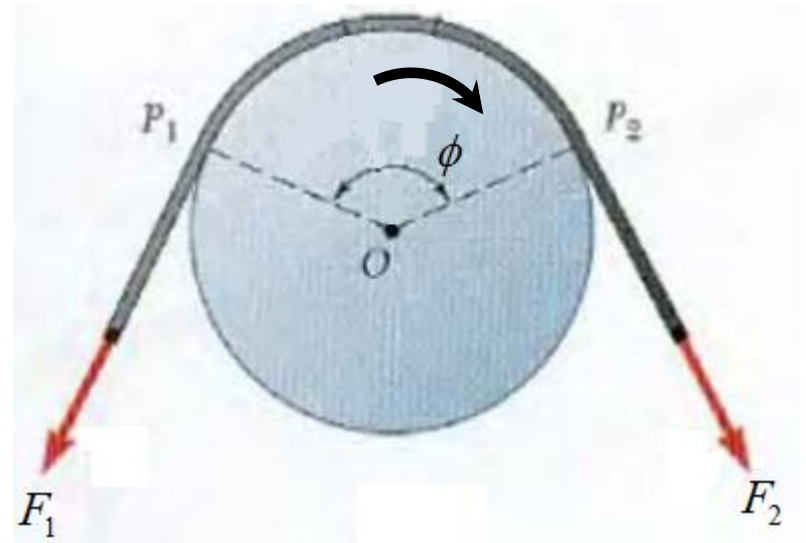
ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

2. Ιμάντες

Τριβή Ιμάντων-Σχοινιών

- Όταν ο ιμάντας **οριακά** δεν διολισθαίνει πάνω στην τροχαλία τότε ισχύει ο Νόμος του Euler, ο οποίος αγνοώντας τις φυγόκεντρες δυνάμεις είναι:

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu_s \phi}$$

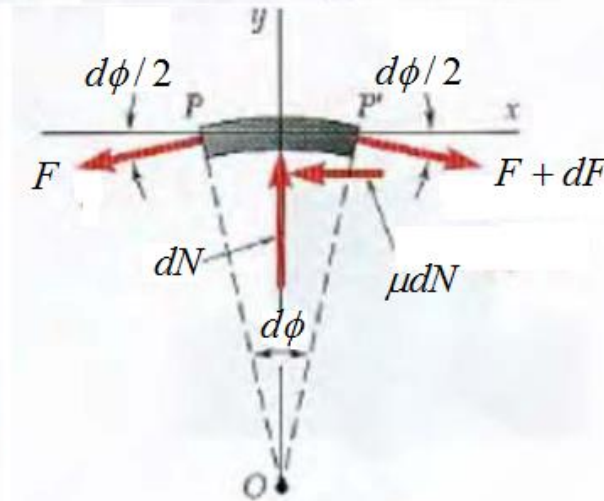
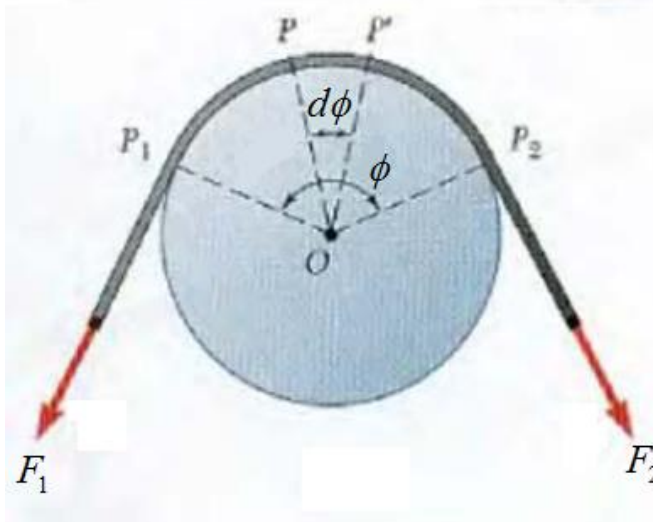


Όπου F_2 είναι η μεγαλύτερη δύναμη ολκής σε σχέση με την δύναμη F_1 , μ_s ο συντελεστής στατικής τριβής και ϕ το τόξο τύλιξης σε rad ($\pi=180^\circ$).

Η μεγαλύτερη δύναμη F_2 βρίσκεται προς την πλευρά που δείχνει το βέλος κίνησης του κινούμενου στοιχείου.

Απόδειξη Σχέσης Euler

- Από ισοροπία στοιχειώδους μήκους μάντα έχουμε:



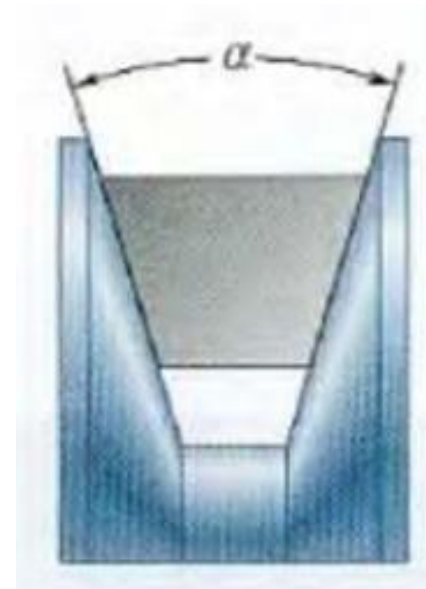
$$\begin{cases} \Sigma F_x = 0 \\ \Sigma F_y = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mu dN = (F + dF) \cos(d\phi/2) - F \cos(d\phi/2) \\ dN = (F + dF) \sin(d\phi/2) + F \sin(d\phi/2) \end{cases} \Rightarrow \left(d\phi/2 \approx 0 \Rightarrow \begin{cases} \cos(d\phi/2) = 1 \\ \sin(d\phi/2) = d\phi/2 \end{cases} \right) \Rightarrow$$

$$\begin{cases} \mu dN = dF \\ dN = F d\phi \end{cases} \Rightarrow \frac{dF}{F} = \mu d\phi \Rightarrow \int_{F_1}^{F_2} \frac{dF}{F} = \int_0^\phi \mu d\phi \Rightarrow \ln \frac{F_2}{F_1} = \mu\phi \Rightarrow \underline{\underline{\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu\phi}}}$$

Τραπεζοειδείς Ιμάντες

- Η αντίστοιχη σχέση Euler για τραπεζοειδή ιμάντα και οριακά επικείμενη ολίσθηση, λόγω της ύπαρξης και πλευρικών δυνάμεων τριβής είναι:

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu_s \varphi / \sin(a/2)}$$

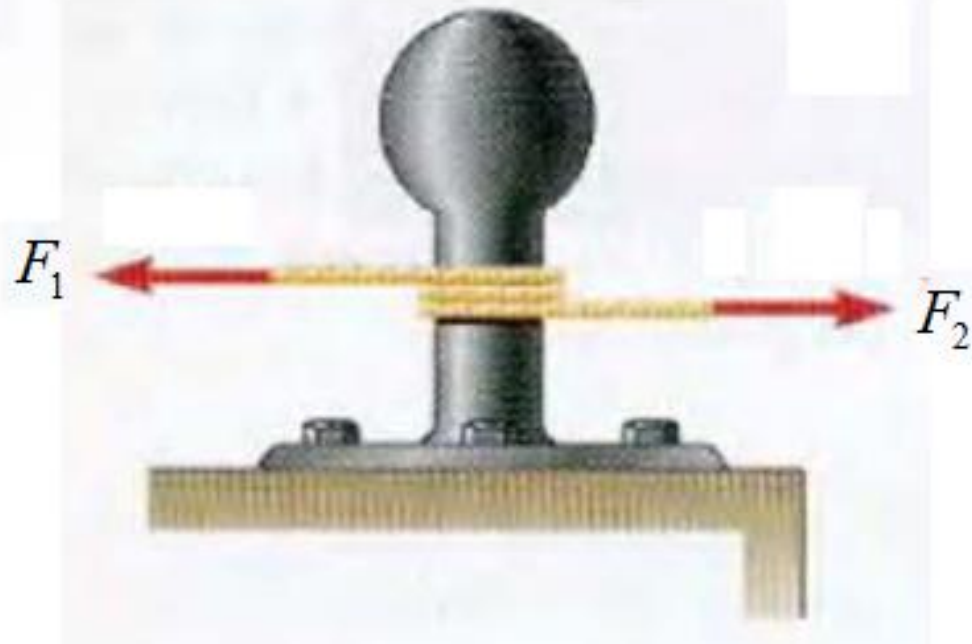


Όπου α είναι η γωνία της τραπεζοειδούς διατομής του ιμάντα σε μοίρες.

Παρατηρήσεις Για Τριβή Ιμάντων

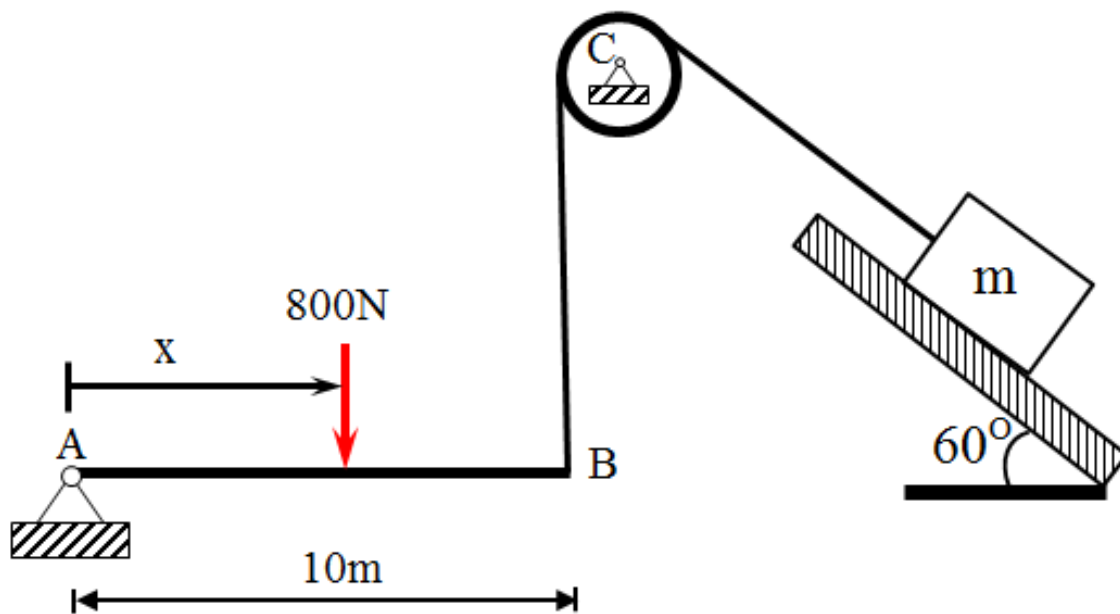
- Όταν ο ιμάντας **οριακά** δεν ολισθαίνει στην τροχαλία, χρησιμοποιούμε ο στατικός συντελεστής τριβής.
- Αν υπάρχει μικρή διολίσθηση θα πρέπει να χρησιμοποιείται ο κινητικός συντελεστής τριβής.
- Η γωνία φ μπορεί να είναι μεγαλύτερη του 2π αν ο ιμάντας έχει τυλιχθεί κατά πλήρεις περιστροφές στην τροχαλία.
- Όταν ένα σώμα ηρεμεί ή περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα γύρω από έναν άξονα, τότε το άθροισμα των ροπών ως προς τον άξονα αυτό είναι ίσο με μηδέν.
- **Η μεθοδολογία επίλυσης ιμάντων είναι ίδια:**
 - Εξετάζουμε ξεχωριστά το κάθε σώμα με τη γνωστή μεθοδολογία.
 - Για την περίπτωση των ιμάντων εφαρμόζουμε την σχέση Euler.
 - Για την περίπτωση των τροχαλιών εφαρμόζουμε ισορροπία ροπών στον άξονα περιστροφής αν αυτές ισορροπούν ή περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα.

Άσκηση 2.1



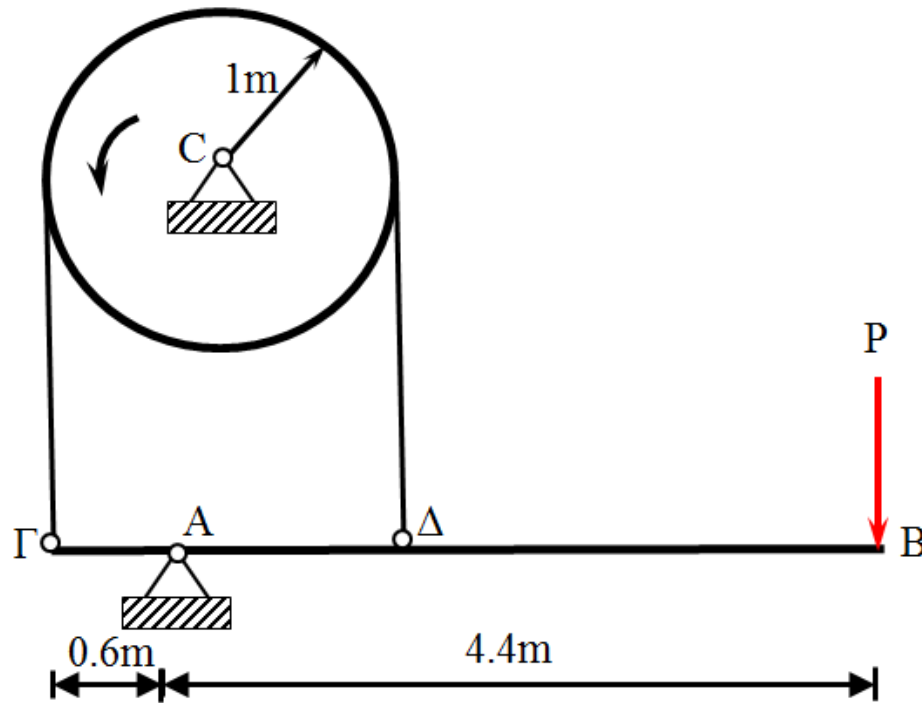
Στη δέστρα του σχήματος είναι περιτυλιγμένο σχοινί που παρουσιάζει συντελεστή στατικής τριβής με τη δέστρα ίσο με $\mu_s=0.4$. Δύναμη $F_1=100\text{N}$ συγκρατεί τη δύναμη $F_2=4000\text{N}$ με N περιστροφές του σχοινιού. Ζητείται ο αριθμός N .

Άσκηση 2.2



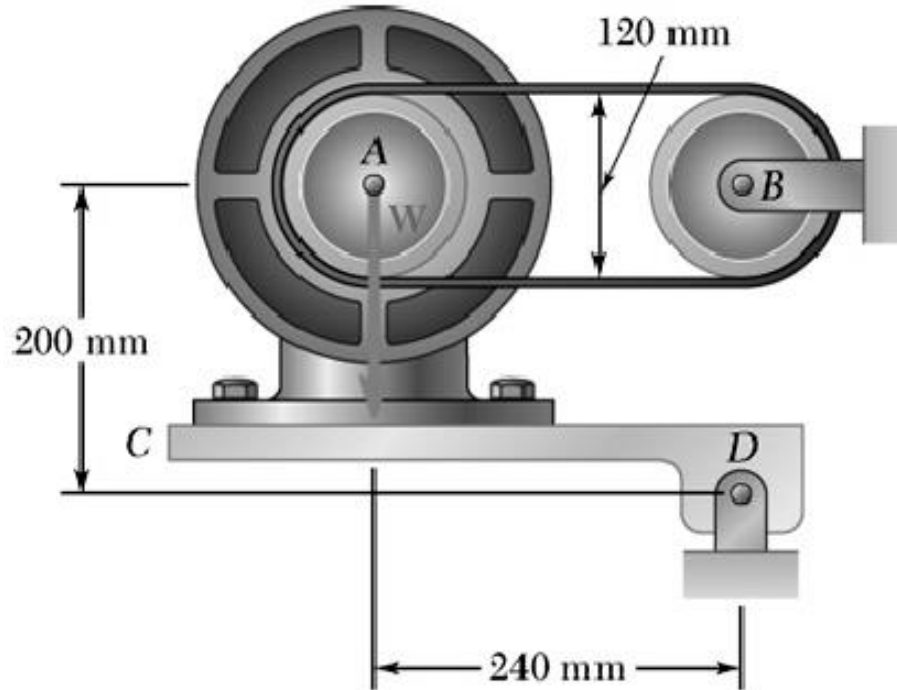
Η δύναμη 800N μπορεί να αλλάζει θέση πάνω στην αβαρή δοκό. Η μάζα $m = 20.39\text{kp}$ που βρίσκεται στο κεκλιμένο επίπεδο, παρουσιάζει με αυτό στατικό συντελεστή τριβής 0.1, ενώ ο συντελεστής τριβής μάντα τυμπάνου είναι ίσος με 0.3. Να βρεθεί η θέση x της δυνάμεως ώστε το σύστημα να ισορροπεί.

Άσκηση 2.3



Το τύμπανο του σχήματος έχει ακτίνα $R=1\text{m}$ και περιστρέφεται αριστερόστροφα υπό την επίδραση ροπής $M=100\text{Nm}$ από κάποιο κινητήριο άξονα. Θέλουμε να φρενάρι το τύμπανο από τον μάντα. Ο στατικός συντελεστής τριβής μάντα τυμπάνου είναι 0.6 . Να βρεθεί η δύναμη P που απαιτείται. Η δοκός GB είναι αβαρής.

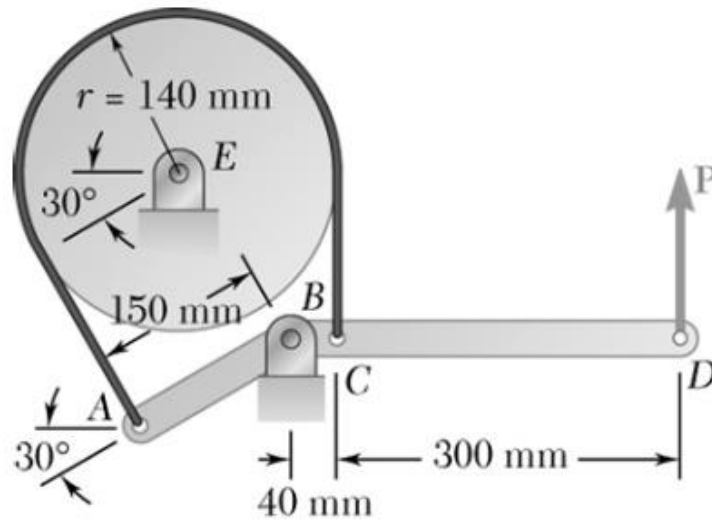
Άσκηση 2.4



Η τάνυση του επίπεδου μάντα του σχήματος επιτυγχάνεται από το ίδιο βάρος του κινητήρα $W=85\text{kp}$. Γνωρίζοντας ότι συντελεστής στατικής τριβής μάντα - τυμπάνων A και B είναι 0.4 και θεωρώντας αμελητέο το βάρος της πλατφόρμας CD, να υπολογισθεί η μέγιστη ροπή που μπορεί να μεταδοθεί στο τύμπανο B εφόσον:

- 1) Το τύμπανο A περιστρέφεται ωρολογιακά.
- 2) Το τύμπανο A περιστρέφεται ανθρωρολογιακά.
- 3) Το τύμπανο A περιστρέφεται ωρολογιακά και ο μάντας είναι τραπεζοειδής με $\alpha=36^\circ$.

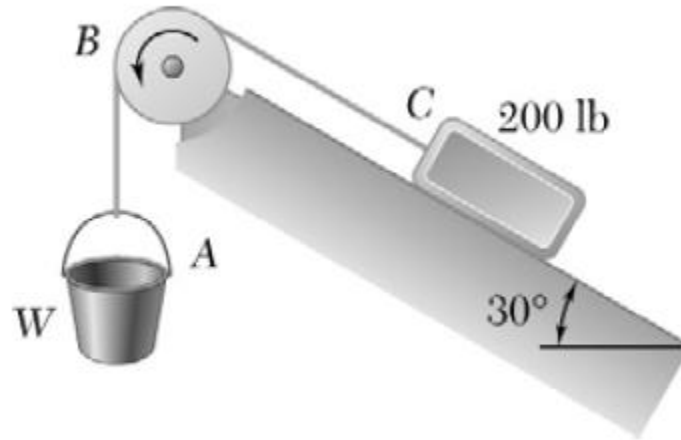
Άσκηση 2.5



Το φρένο του σχήματος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας του τυμπάνου το οποίο περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Αν ο κινητικός συντελεστής τριβής ιμάντα-τυμπάνου είναι 0.3 και ότι μια ροπή 150Nm επιβάλλεται στο τύμπανο να υπολογισθεί η δύναμη P που μεταδίδεται στην άκρη του μοχλού όταν:

- 1) Το τύμπανο A περιστρέφεται ωρολογιακά.
- 2) Το τύμπανο A περιστρέφεται ανθρωρολογιακά.
- 3) Να υπολογιστεί ο στατικός συντελεστής τριβής για τον οποίο το διαφορικό φρένο ασφαλίζει αυτόματα το ανθρωρολογιακά περιστρεφόμενο τύμπανο .

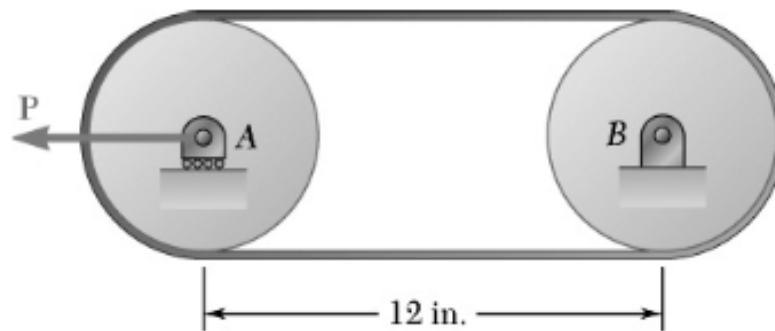
Άσκηση 2.6



Ένας κουβάς A και ένα κιβώτιο C συνδέεται με ένα καλώδιο, το οποίο διέρχεται από το κυλινδρικό τμήμα B . Γνωρίζοντας ότι το κυλινδρικό τμήμα B περιστρέφεται αργά με φορά ανθρωπολογική και ότι ο στατικό και κινητικός συντελεστής τριβής είναι 0.35 και 0.25 , να καθορίσετε το μικρότερο βάρος W του κουβά και του περιεχομένου του για το οποίο το κιβώτιο C :

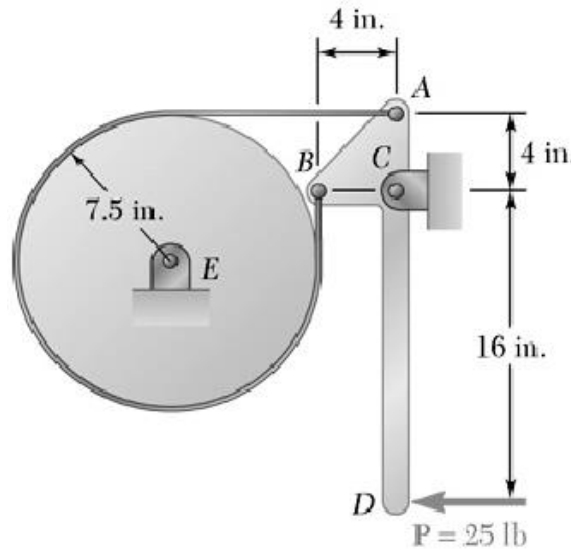
- 1) Τείνει να κινηθεί προς τα κάτω.
- 2) Τείνει να κινηθεί προς τα άνω.
- 3) Κινείται προς τα άνω με σταθερή ταχύτητα.

Άσκηση 2.7



Ένας επίπεδος μάντας χρησιμοποιείται για να μεταδοθεί ροπή από τον τροχό A στον τροχό B. Η διάμετρος κάθε τροχού είναι 3 in. Το μέγεθος της δύναμης είναι 225 lb. Αν ο συντελεστής στατικής και κινητικής τριβής είναι 0.35 και 0.20 αντίστοιχα να υπολογισθεί με μέγιστη ροπή που δύναται να μεταδοθεί. Αν έχουμε διασταυρούμενη μετάδοση ποια θα είναι η μέγιστη μεταδιδόμενη ροπή;

Άσκηση 2.8



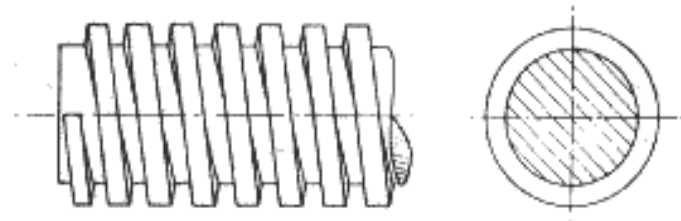
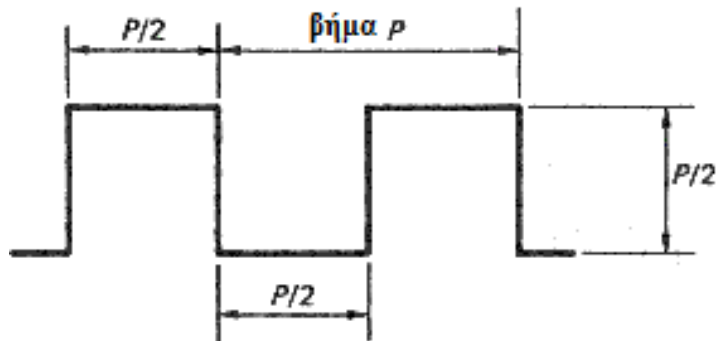
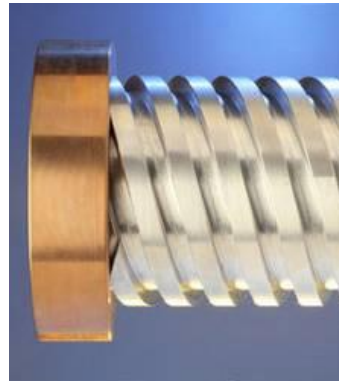
Ο μάντας του σχήματος χρησιμοποιείται για να ελέγξει την ταχύτητα του τροχού. Να υπολογισθεί η ροπή που εφαρμόζεται στον τροχό αν αυτός περιστρέφεται με σταθερή ωρολογιακή γωνιακή ταχύτητα. Ο στατικός και κινητικός συντελεστής τριβής μεταξύ μάντα και τροχού είναι 0.4 και 0.25, αντίστοιχα.

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

3. Κοχλίες Τετραγωνικού Σπειρώματος

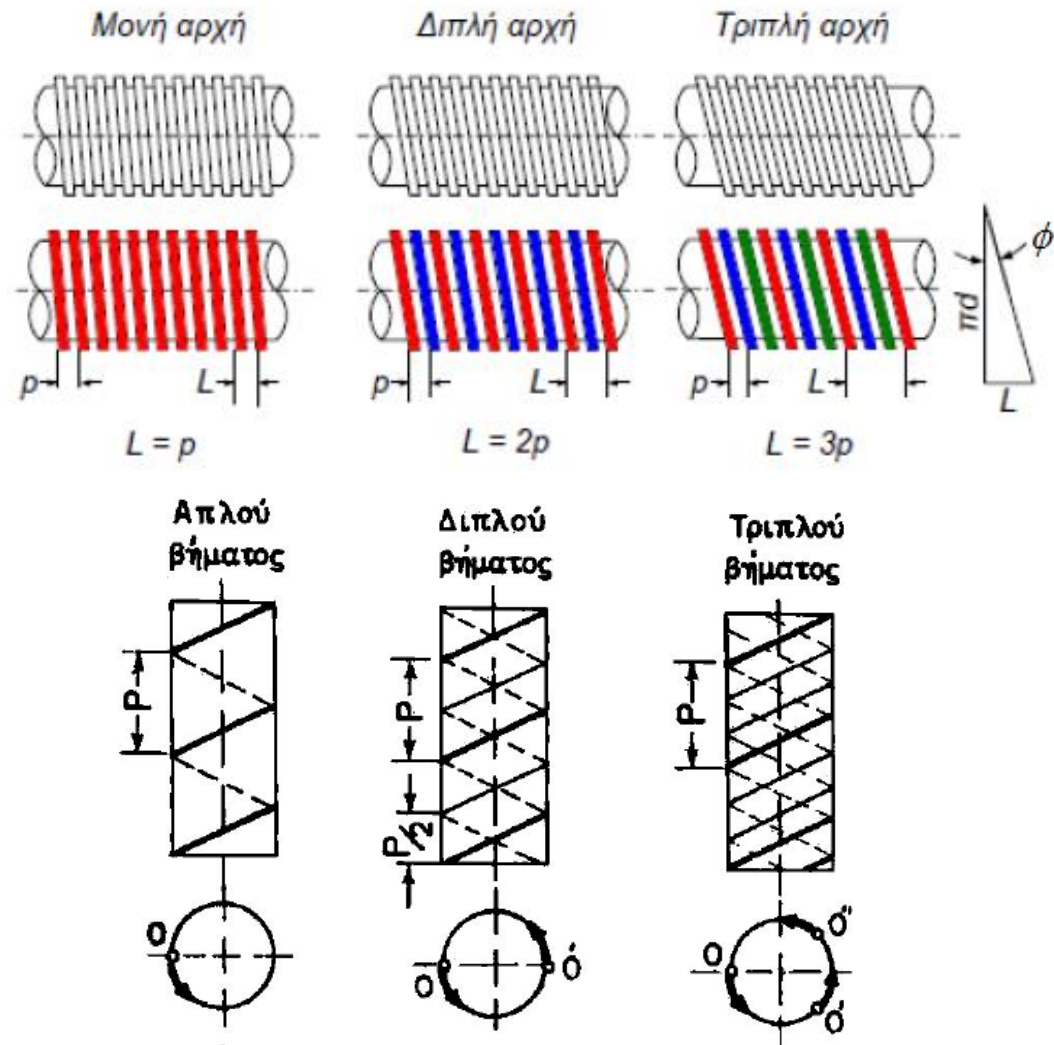
Κοχλίες Τετραγωνικού Σπειρώματος

- Οι κοχλίες αυτοί έχουν τετραγωνικό προφίλ σπείρας και χαρακτηρίζονται από το βήμα τους p που είναι η απόσταση μεταξύ δύο σπειρών.
- Γενικά το σπείρωμα κοχλία λειτουργεί ως σώμα που ολισθαίνει στο κεκλιμένο επίπεδο που σχηματίζεται από το σπείρωμα του περικοχλίου.



Κοχλίες Πολλαπλού Βήματος

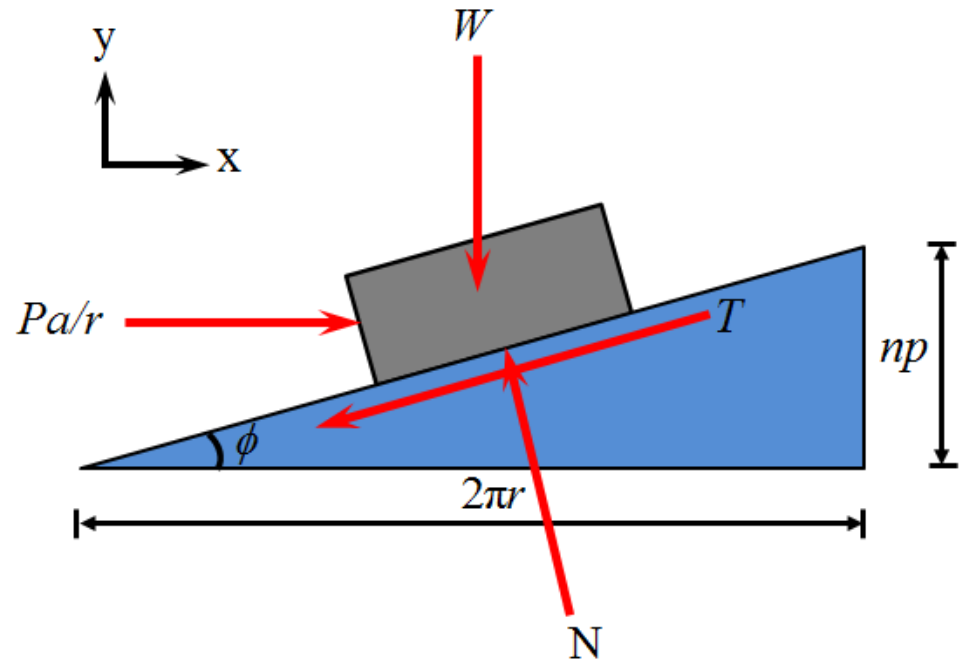
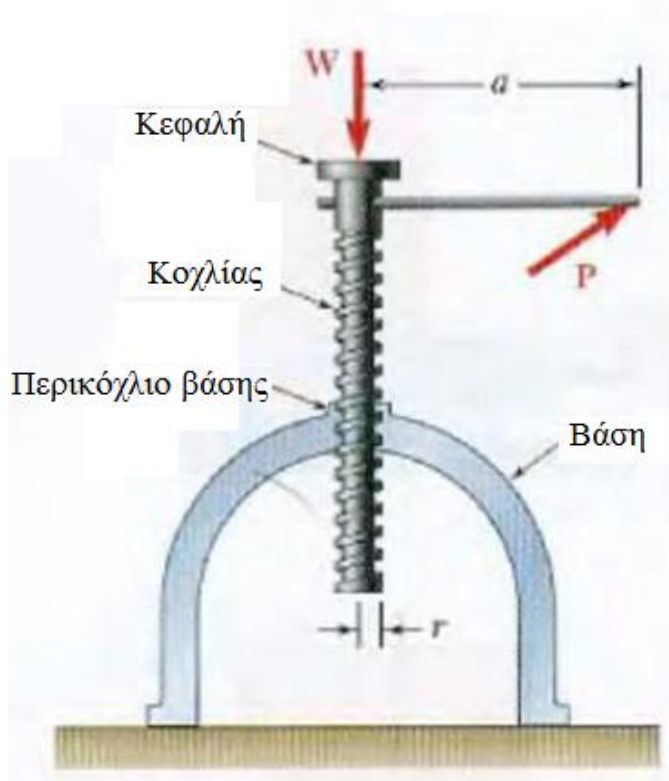
- Ένας κοχλίας τετραγωνικού σπειρώματος μπορεί να έχει μία, δύο ή τρεις αρχές να είναι δηλαδή απλού διπλού ή τριπλού βήματος.
- Σε μια πλήρη περιστροφή του, πd , ο κοχλίας προχωρά κατά $L = nr$, όπου n ο αριθμός των αρχών και r το βήμα. Η γωνία κλίσης του σπειρώματος είναι $\tan\phi = L/\pi d = L/2\pi r$, όπου d και r είναι η διάμετρος και η ακτίνα του σπειρώματος, αντίστοιχα.



Ανάλυση Δυνάμεων σε Τετραγωνικού Σπειρώματος Κοχλίες

- Η ανάλυση ενός κοχλία τετραγωνικού σπειρώματος είναι ανάλογη με την ανάλυση ενός κιβωτίου (κοχλίας) που ολισθαίνει σε κεκλιμένο επίπεδο (περικόχλιο βάσης). **Αυτό είναι δυνατό καθώς η τριβή είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της επιφάνειας επαφής.**
- Το κεκλιμένο επίπεδο (περικόχλιο) σχεδιάζεται με τη κλίση που φαίνεται στο κοχλία. Το ύψος του κεκλιμένου είναι $L = nr$, το μήκος $pd = 2\pi r$ και προφανώς η κλίση του $\tan\phi = nr/2\pi r$.
- Οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται γενικά στον κοχλία μεταφέρονται ως δυνάμεις στο ισοδύναμο κιβώτιο ενώ σημειώνονται σε αυτό η αντίδραση N εξαιτίας της επαφής του κοχλία με περικόχλιο και η τριβή T ανάλογα με τη φορά επικείμενης κίνησης. Η φορά της τριβής αντιτίθεται πάντα στην κίνηση του κιβωτίου-κοχλία.
- Έπειτα αναλύεται το πρόβλημα με τη κλασική μέθοδο γράφοντας τις εξισώσεις ισορροπίας ή κίνησης καθώς και τον νόμο του Coulomb για ξηρά τριβή.

Εύρεση Δύναμης Γρύλου – Επικείμενη Κίνηση Προς τα Άνω

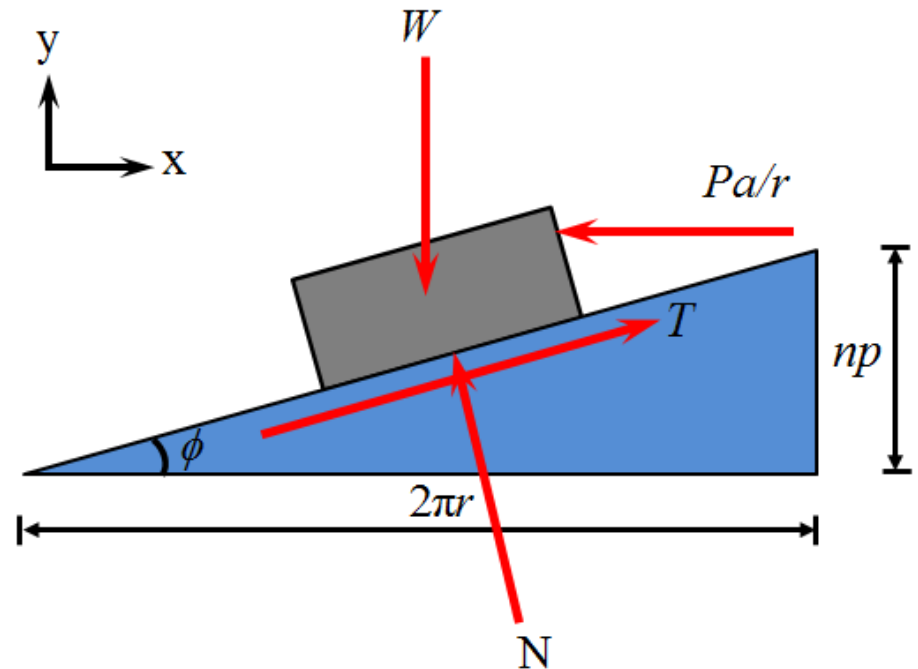
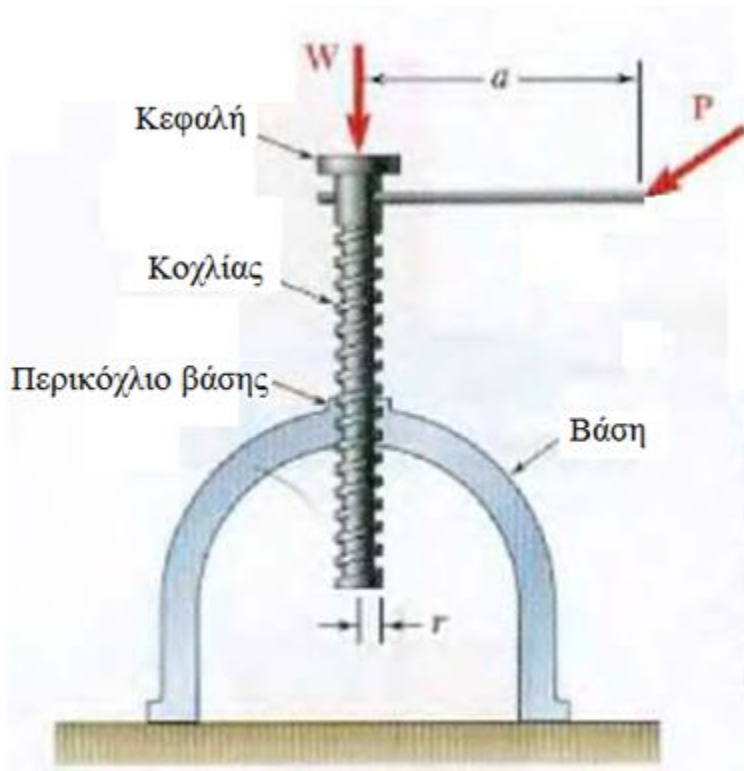


$$\left\{ \begin{array}{l} \Sigma F_x = 0 \Rightarrow Pa/r - T \cos \phi - N \sin \phi = 0 \\ \Sigma F_y = 0 \Rightarrow -W - T \sin \phi + N \cos \phi = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$T = \mu_s N$$

$$P = W \left(\frac{r}{a} \right) \left(\frac{\mu_s \cos \phi + \sin \phi}{\cos \phi - \mu_s \sin \phi} \right), \phi = \tan^{-1} \left(\frac{np}{2\pi r} \right)$$

Εύρεση Δύναμης Γρύλου– Επικείμενη Κίνηση Προς τα Κάτω



$$\left\{ \begin{array}{l} \Sigma F_x = 0 \Rightarrow -Pa/r + T \cos \phi - N \sin \phi = 0 \\ \Sigma F_y = 0 \Rightarrow -W + T \sin \phi + N \cos \phi = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$T = \mu_s N$$

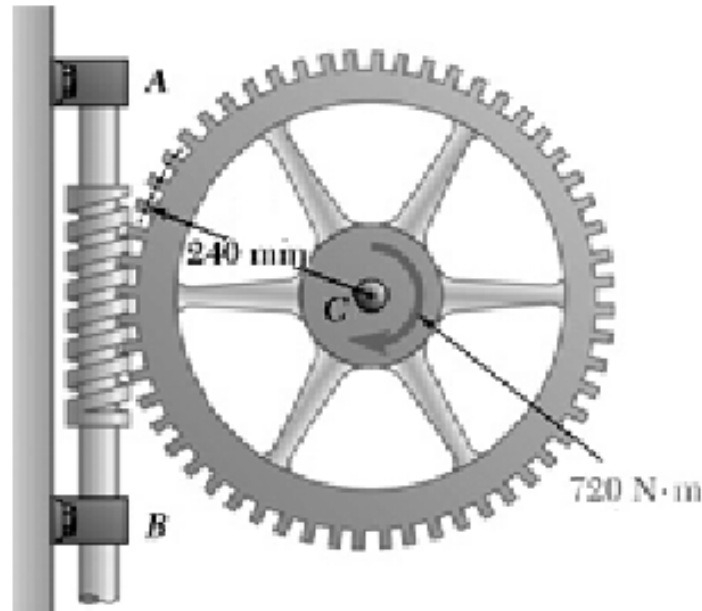
$$P = W \left(\frac{r}{a} \right) \left(\frac{\mu_s \cos \phi - \sin \phi}{\cos \phi + \mu_s \sin \phi} \right), \phi = \tan^{-1} \left(\frac{np}{2\pi r} \right)$$

Άσκηση 3.1



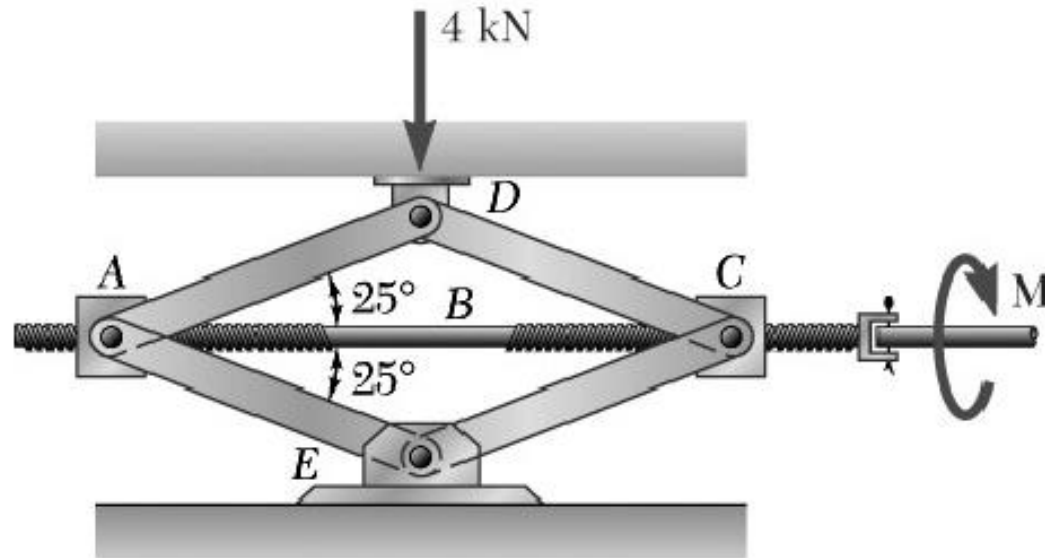
Η μέγγενη του σχήματος χρησιμοποιείται για να διατηρήσει δύο κομμάτια ξύλου σε επαφή. Το σπείρωμα είναι τετραγωνικό διπλού βήματος, έχει μέση διάμετρο 10mm και βήμα ίσο με 2mm. Ο στατικός συντελεστής τριβής είναι 0.3. Αν η ροπή σύσφιξης που επιβάλλεται είναι 40Nm να υπολογισθεί (α) η δύναμη μεταξύ των δύο κομματιών και (β) η ροπή που απαιτείται για την αποσύσφιξη της μέγγενης.

Άσκηση 3.2



Ο κοχλιωτός άξονας AB φέρει τετραγωνικό απλό σπείρωμα βήματος 7.5mm μέσης ακτίνας 30mm. Ο μεγαλύτερος οδοντωτός τροχός υπόκειται σε σταθερή ωρολογιακή ροπή 720Nm. Ο συντελεστής στατικής τριβής είναι μεταξύ των οδόντων είναι 0.12. Να υπολογισθεί η ροπή που πρέπει να επιβληθεί στον άξονα AB για να περιστραφεί ο μεγάλος τροχός (α) ανθρωπολογικά και (β) ωρολογιακά. Θεωρείστε τα έδρανα ολίσθησης παρέχουν μηδενική ροπή.

Άσκηση 3.3



Τα σπειρώματα του γρύλου είναι τετραγωνικά βήματος 2mm και μέσης διαμέτρου 7.5mm. Ο στατικός συντελεστής τριβής είναι 0.15. Να υπολογισθεί η απαιτούμενη ροπή (α) για το ανέβασμα και (β) για το κατέβασμα του βάρους 4kN.

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

4. Ακτινικά Έδρανα

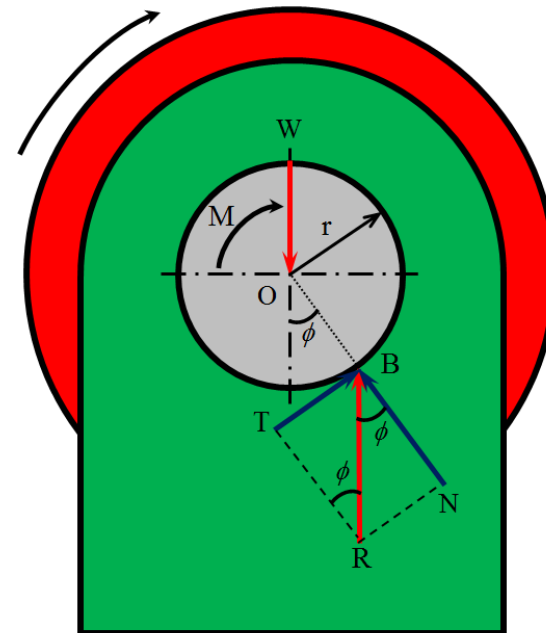
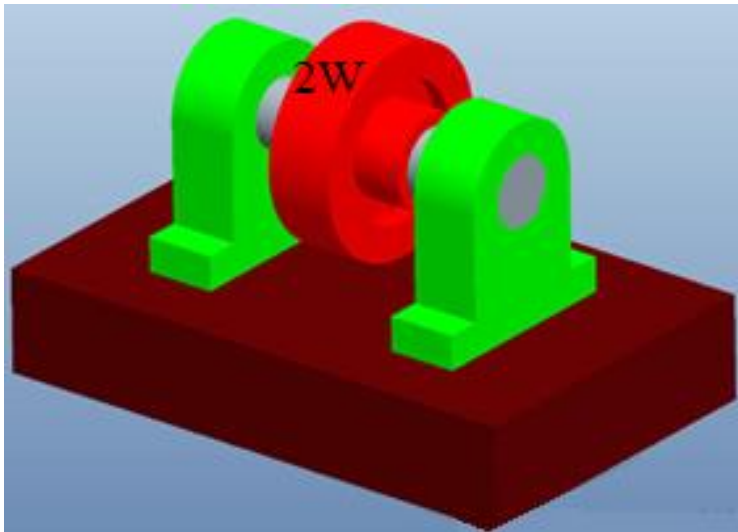
Ακτινικά Έδρανα Χωρίς ή Με Περιορισμένο Λιπαντικό

- Χρησιμοποιούνται για να παρέχουν πλευρική υποστήριξη σε περιστρεφόμενες ατράκτους και άξονες.



Ακτινικά Έδρανα Χωρίς ή Με Περιορισμένο Λιπαντικό

- Στα ακτινικά έδρανα η συνισταμένη R της αντίδρασης επαφής N και δύναμης τριβής T , δεν διέρχεται από το κέντρο της ατράκτου ή άξονα αλλά από ένα σημείο B .
- Αυτό συμβαίνει διότι μέχρι να ολισθήσει ο άξονας «ανεβαίνει» στον δακτύλιο ολίσθησης. Όταν η ολίσθηση ξεκινήσει ο άξονας «πέφτει» και εφάπτεται με το δακτύλιο ολίσθησης στο σημείο B .



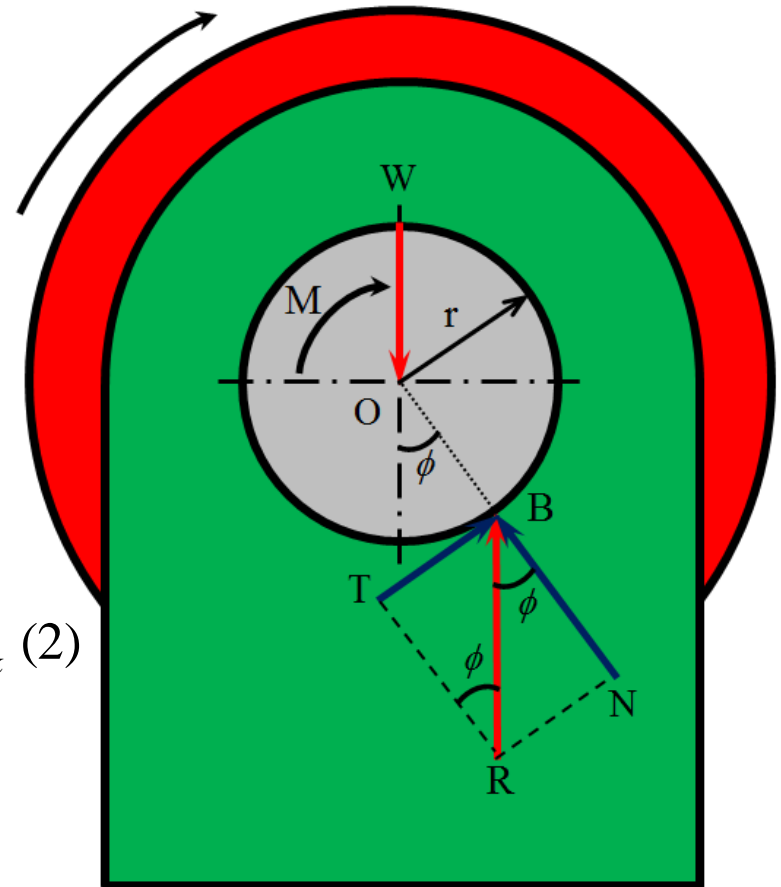
Απαιτούμενη Ροπή Στρέψης σε Ακτινικά Έδρανα Χωρίς Λίπανση

- Για να περιστρέφεται ο άξονας με σταθερή ταχύτητα θα πρέπει να εφαρμόζεται μια ροπή M . Το Διάγραμμα Ελεύθερου Σώματος του άξονα οδηγεί στην παρακάτω εξίσωση:

$$\overset{\leftarrow+}{\Sigma} M_O = 0 \Rightarrow -M + Rr \sin \phi = 0 \Rightarrow M = Rr \sin \phi \quad (1)$$

$$\phi \rightarrow 0 \Rightarrow \sin \phi = \tan \phi \Rightarrow \sin \phi = \frac{T^{\text{Coulomb}}}{N} \Rightarrow \sin \phi = \mu_k \quad (2)$$

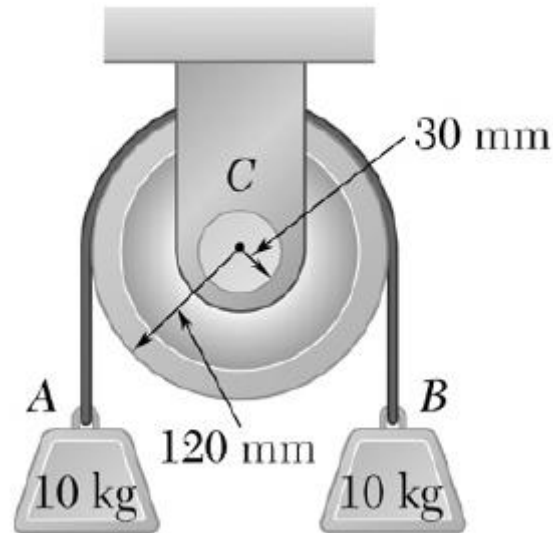
$$(1) \Rightarrow \underline{M = Rr\mu_k} \quad (2)$$



Επίλυση Ακτινικού Εδράνου που Τείνει ή Βρίσκεται σε Περιστροφή

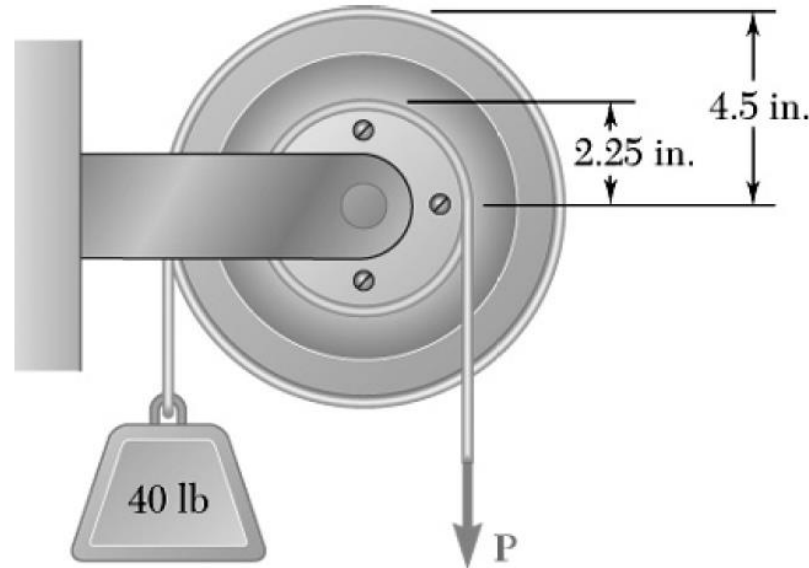
- Κατασκευάζουμε το Δ.Ε.Σ. του συσσωματώματος άξονα τροχαλίας.
- Χρησιμοποιούμε σημείο επαφής B προς την πλευρά που επίκειται κίνηση ή κινείται ο άξονας ούτως ώστε αυτό να μην διέρχεται κατακορύφως από το κέντρο του άξονα αλλά να είναι μετατοπισμένο κατά γωνία φ προς τη μεριά της επικείμενης κίνησης.
- Αντί για την αντίδραση N και την Τριβή T σημειώνουμε τη συνιστάμενη τους R στο σημείο B έτσι ώστε να είναι αντίθετη στη συνισταμένη των υπολοίπων δυνάμεων.
- Γράφουμε το νόμο του Coulomb εκφρασμένο ως εξής: $\mu = \tan\varphi$, όπου μ είναι ο κατάλληλος συντελεστής τριβής και φ η γωνία μεταξύ N και T.
- Γράφουμε επίσης όλες τις απαιτούμενες εξισώσεις ισορροπίας ή κίνησης που εμπλέκουν τόσο δυνάμεις όσο και ροπές. Είναι βολικό να θέτουμε μηδενισμό των ροπών στο B.
- Το σύστημα όλων των εξισώσεων που προκύπτει οδηγεί στους απαιτούμενους υπολογισμούς.

Άσκηση 4.1



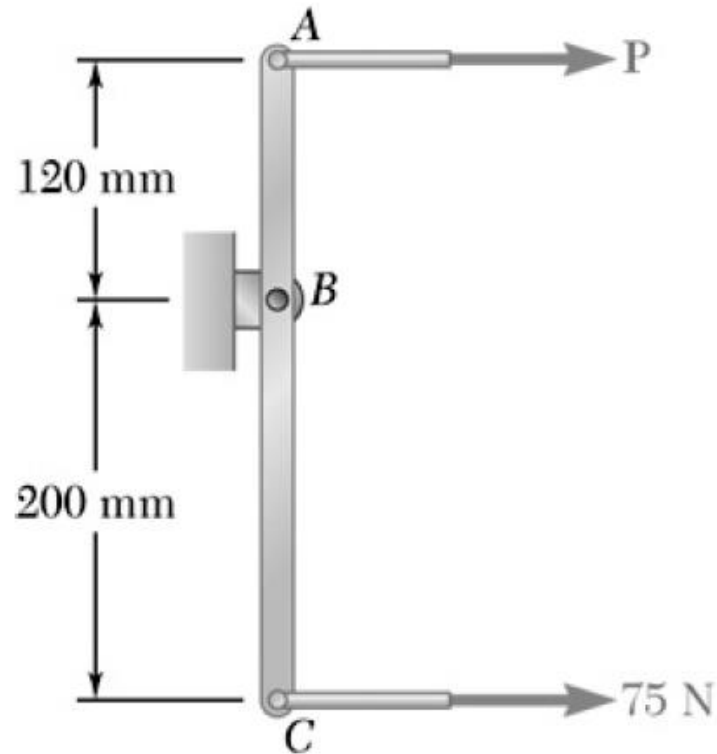
Μια τροχαλία ακτίνας 120 mm με μάζα 5 kg συνδέεται με μία άτρακτο ακτίνας 30 mm , η οποία προσαρμόζεται σε ένα σταθερό έδρανο. Παρατηρείται ότι η τροχαλία θα αρχίσει αμέσως να περιστρέφεται, όταν προστεθεί στο σύστημα A μια μάζα 0.5 kg . Να καθορίσετε το συντελεστή στατικής τριβής ανάμεσα σε άτρακτο και έδρανο.

Άσκηση 4.2



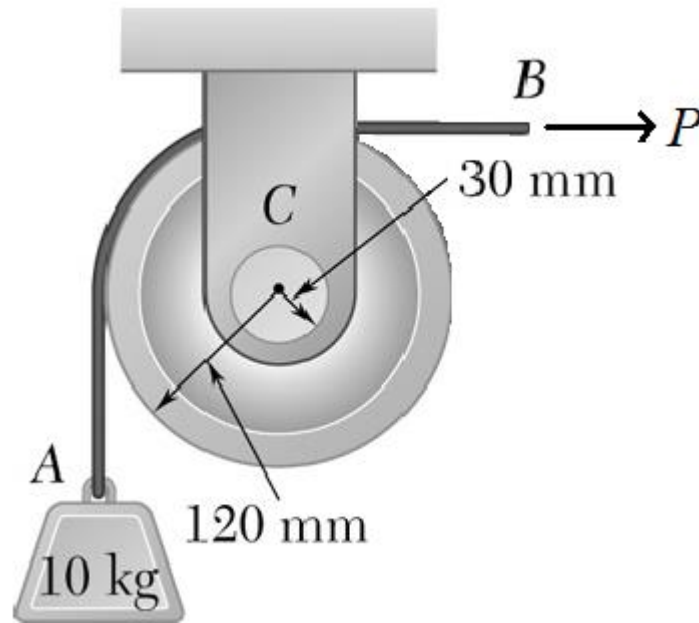
Η διπλή τροχαλία που φαίνεται στο σχήμα συνδέεται με μια άτρακτο ακτίνας 0.5in, η οποία προσαρμόζεται σε ένα σταθερό έδρανο. Γνωρίζοντας ότι ο συντελεστής στατικής τριβής ανάμεσα στην άτρακτο και το ελάχιστα γρασαρισμένο έδρανο είναι 0.40, να καθορίσετε το μέγεθος της δύναμης P που απαιτείται (α) για να ανυψωθεί το φορτίο και (β) για να παρεμποδιστεί η κάθοδος του βάρους.

Άσκηση 4.3



Η διπλή τροχαλία που φαίνεται στο σχέδιο συνδέεται με μια άτρακτο ακτίνας 0.5 in , η οποία προσαρμόζεται σε ένα σταθερό έδρανο. Γνωρίζοντας ότι ο συντελεστής στατικής τριβής ανάμεσα στην άτρακτο και το ελάχιστα γρασαρισμένο έδρανο είναι 0.40 , να καθορίσετε το μέγεθος της δύναμης P που απαιτείται να ανυψωθεί το φορτίο

Άσκηση 4.4



Μια τροχαλία ακτίνας 120mm με αμελητέα μάζα συνδέεται με μία άτρακτο ακτίνας 30mm, η οποία προσαρμόζεται σε ένα σταθερό έδρανο. Να υπολογισθεί ο συντελεστής στατικής τριβής, αν απαιτείται δύναμη $P=12\text{kg}$ για να ανυψωθεί το φορτίο.

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

5. Ωστικά Έδρανα

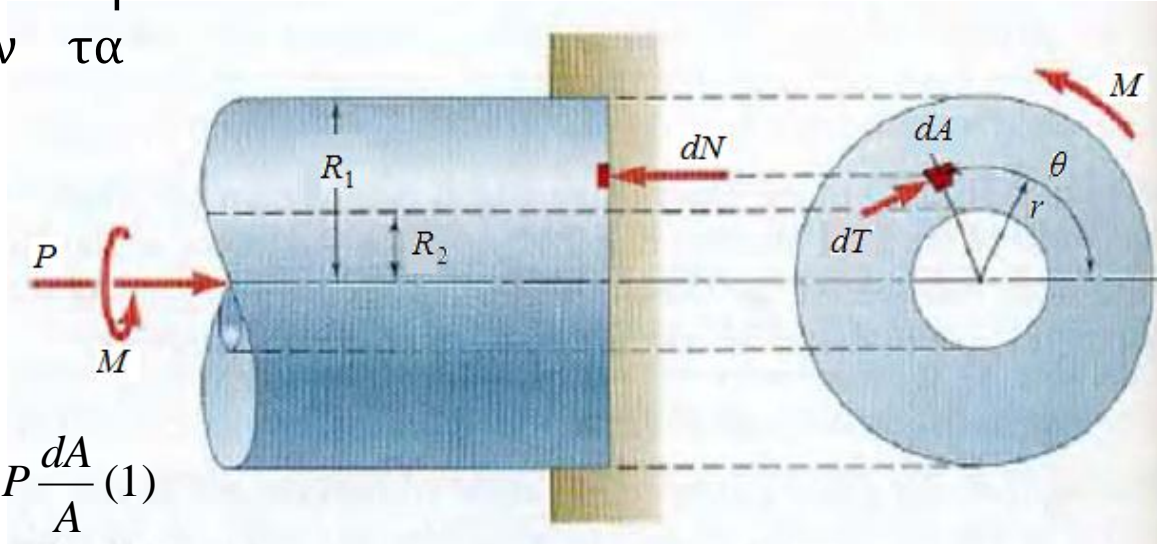
Ωστικά Έδρανα Χωρίς ή Με Περιορισμένο Λιπαντικό

- Χρησιμοποιούνται για να παρέχουν στήριξη σε αξονικές φορτίσεις περιστρεφόμενων ατράκτων.



Απαιτούμενη Ροπή Στρέψης σε Κυλινδρικό Περιστεφόμενο Άξονα

- Αναλύοντας μια στοιχειώδη επιφάνεια dA προκύπτουν τα εξής:



$$\text{πίεση} = \text{σταθερή} \Rightarrow \frac{P}{A} = \frac{dN}{dA} \Rightarrow dN = P \frac{dA}{A} \quad (1)$$

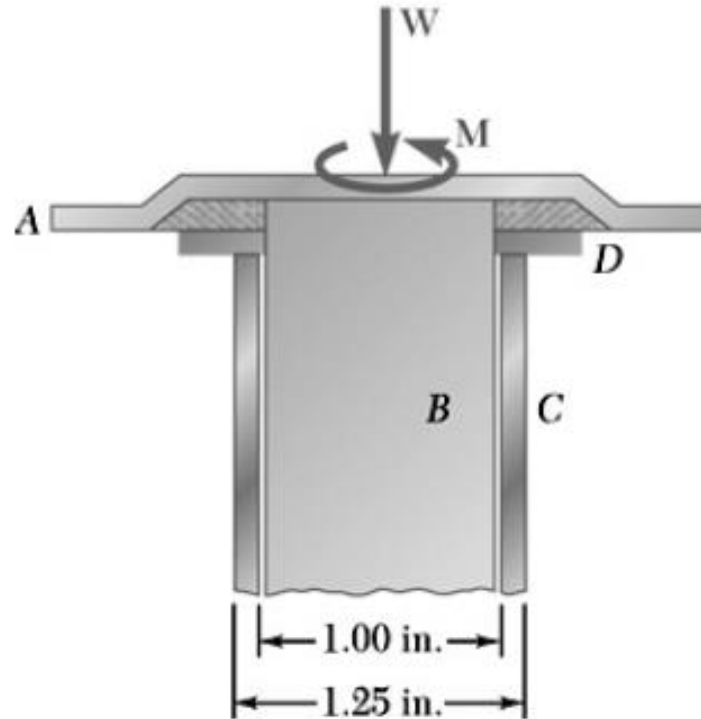
$$A = \pi(R_2^2 - R_1^2) \quad (2)$$

$$\text{Coulomb} : dT = \mu_k dN \quad (3)$$

$$dM = r dT \xrightarrow{(1),(2),(3)} dM = \frac{\mu_k P}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} r dA \xrightarrow{dA=rdrd\theta} M = \frac{\mu_k P}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} r^2 dr d\theta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M = \frac{\mu_k P}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \int_0^{2\pi} \frac{1}{3} (R_2^3 - R_1^3) d\theta \Rightarrow M = \frac{2}{3} \mu_k P \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_2^2 - R_1^2}$$

Άσκηση 5.1



Το περιστροφικό σύστημα μιας καρέκλας γραφείου αποτελείται από ένα χαλύβδινο έλασμα A, το οποίο στηρίζει την καρέκλα, έναν χαλύβδινο άξονα B ο οποίος είναι συγκολλημένος στην πλάκα A και ο οποίος περιστρέφεται ελεύθερα στο σωληνοειδές μέλος C και το πλαστικό έδρανο D. Αν το άτομο που κάθεται ακριβώς πάνω από τον άξονα έχει βάρος 180lb, να υπολογιστεί η ροπή που απαιτείται για να περιστραφεί γνωρίζοντας ότι ο στατικός συντελεστής τριβής μεταξύ του σωληνοειδούς μέλους και του πλαστικού είναι 0.15.

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

6. Τριβή Τροχού – Αντίσταση Κύλισης

Τριβή Κύλισης

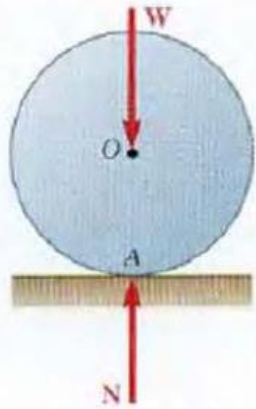
Οφείλεται:

- Σε μια συνδυαστική επίδραση της τριβής στον άξονα και την στεφάνη.
- Στο γεγονός ότι ο τροχός και το έδαφος παραμορφώνονται, με αποτέλεσμα η επαφή μεταξύ τους να πραγματοποιείται σε μια συγκεκριμένη περιοχή και όχι σε ένα μοναδικό σημείο.

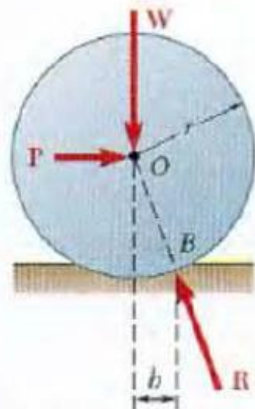


Ανάλυση Δυνάμεων σε Τροχό υπό Κύλιση

- Στα κυλιόμενους τροχούς η συνισταμένη R της αντίδρασης επαφής N και δύναμης τριβής T , διέρχεται από το κέντρο του τροχού, από ένα σημείο B προς την κατεύθυνση κίνησης, που απέχει οριζοντίως από το O κατά απόσταση b .
- Η απόσταση b ονομάζεται ευρύτερα συντελεστής της αντιστάσεως κυλίσεως, δε θεωρείται αδιάστατος συντελεστής αφού παριστάνει ένα μήκος και εκφράζεται σε mm ή in. Λαμβάνει π.χ. τιμή 0.25mm για Χαλύβδινο τροχό-σιδηροτροχιά και 125mm για Χαλύβδινο τροχό-Χώμα.



Ακίνητος Τροχός



Κυλιόμενος Τρόχος

$$\overset{\leftarrow+}{\Sigma} M_B = 0 \Rightarrow -Pr + Wb = 0 \Rightarrow Pr = Wb$$

Επίλυση Τροχού που Τείνει ή Βρίσκεται σε Κύλιση

- Κατασκευάζουμε το Δ.Ε.Σ. του τροχού.
- Χρησιμοποιούμε σημείο επαφής B προς την πλευρά που επίκειται κύλιση ή κυλίεται ο άξονας ούτως ώστε αυτό να μην διέρχεται κατακορύφως από το κέντρο του τροχού αλλά να απέχει οριζοντίως απόσταση b από αυτό.
- Αντί για την αντίδραση N και την Τριβή T σημειώνουμε τη συνιστάμενη τους R στο σημείο B έτσι ώστε να είναι αντίθετη στη συνισταμένη των υπολοίπων δυνάμεων και να δείχνει το κέντρο του τροχού.
- Γράφουμε το νόμο του Coulomb εκφρασμένο ως εξής: $\mu = b$, όπου μ είναι ο κατάλληλος συντελεστής τριβής και b η οριζόντια απόσταση μεταξύ κέντρου και σημείου εφαρμογής της R.
- Γράφουμε επίσης όλες τις απαιτούμενες εξισώσεις ισορροπίας ή κίνησης που εμπλέκουν τόσο δυνάμεις όσο και ροπές. Είναι βολικό να θέτουμε μηδενισμό των ροπών στο B.
- Το σύστημα όλων των εξισώσεων που προκύπτει οδηγεί στους απαιτούμενους υπολογισμούς.

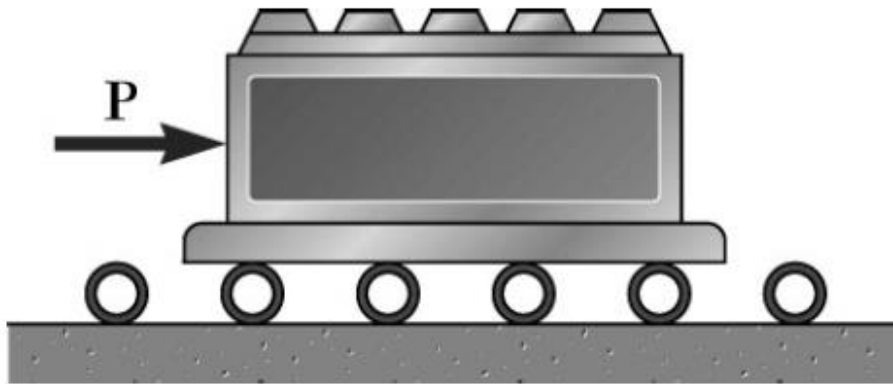
Άσκηση 6.1

Γνωρίζοντας ότι ένας δίσκος 120mm ολισθαίνει με σταθερή ταχύτητα σε ένα 2% κεκλιμένο επίπεδο, να καθορίσετε το συντελεστή κυλίσεως μεταξύ δίσκο και κεκλιμένο επίπεδο.

Άσκηση 6.2

Να καθορίσετε την οριζόντια δύναμη που απαιτείται για να μετακινηθεί 1Mg αυτοκίνητο με ελαστικά διαμέτρου 460mm κατά μήκος οριζοντίου δρόμου με σταθερή ταχύτητα. Να παραλείψετε όλους τους τύπους τριβής εκτός της τριβή κύλισης για την οποία θεωρείστε συντελεστή 1mm.

Άσκηση 6.3



Μία μηχανική βάση 2000lb κυλάει κατά μήκος ενός δαπέδου από σκυρόδεμα, χρησιμοποιώντας μια σειρά από ατσάλινους σωλήνες με εξωτερικές διαμέτρους 5in. Αν ο συντελεστής κυλίσεως είναι 0.025in ανάμεσα στους σωλήνες και τη βάση και 0.0625in μεταξύ σωλήνων και δαπέδου, να καθορίσετε το μέγεθος της δύναμης P που απαιτείται για να κινηθεί ομαλά η βάση κατά μήκος του δαπέδου.

Άσκηση 6.4

Ένα φορτωμένο σιδηροδρομικό βαγόνι βάρους 35t υποστηρίζεται σε 8 τροχούς διαμέτρου 32in και αντίστοιχους άξονες διαμέτρου 5in. Ο στατικός συντελεστής τριβής, ο κινητικός συντελεστής τριβής και ο συντελεστής τριβής κύλισης είναι αντίστοιχα 0.02, 0.015 και 0.02in. Να υπολογιστεί η οριζόντια δύναμη που απαιτείται για να

- Παρεμποδιστεί η κίνηση του βαγονιού.
- Να συνεχιστεί η κίνηση του βαγονιού.

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

7. Λίπανση

Γενικά

- Ως λίπανση ορίζεται η παρεμβολή μεταξύ των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή τρίτου κατάλληλου σώματος, του λιπαντικού, για τον περιορισμό της τριβής και της συνεπακόλουθης φθοράς.



Είδη Λίπανσης

- Ανάλογα με την κατάσταση του χρησιμοποιούμενου λιπαντικού, η λίπανση διακρίνεται σε:
 - Στερεά (κονίες, επικαλύψεις, γραφίτης, διθειούχο μολυβδαίνιο, κλπ.)
 - Υγρή (τα πιο συνηθισμένα λιπαντικά είναι υγρά, νερό, φυτικά-ζωικά λίπη, ορυκτέλαια, συνθετικά λιπαντικά, γράσα, κλπ.)
 - Αέρια (μικρό φορτίο με υψηλές στροφές, ηλεκτρομαγνητικά έδρανα κλπ.)



Υγρά Λιπαντικά

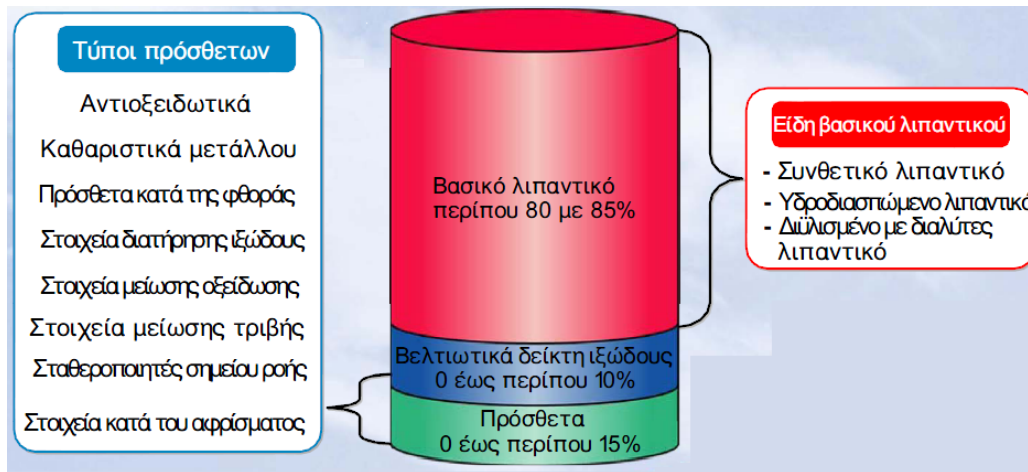
- Τα υγρά λιπαντικά χρησιμοποιούνται για την ομαλή λειτουργία των μηχανών και των μηχανισμών και αποσκοπούν στην ελάττωση της τριβής και της φθοράς των κινούμενων μερών
- Με τη χρήση των λιπαντικών μετατρέπουμε την ξηρά τριβή μεταξύ δύο επιφανειών σε υγρή ώστε να μειώσουμε τις δυνάμεις τριβής και τη φθορά
- Η διάρκεια ζωής ενός μηχανήματος εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του σωστού λιπαντικού και τη σωστή χρήση του

Ιδιότητες Υγρών Λιπαντικών

- Λιπαντική ικανότητα: Μειώνουν τις τριβές
- Ψυκτική ικανότητα: Ικανότητα απαγωγής θερμότητας και ψύξης επιφανειών
- Σταθερότητα: Η ικανότητα του λιπαντικού να μην αλλοιώνεται από τη χρήση
- Παθητικότητα: Η ιδιότητα του λιπαντικού να μην προκαλεί διαβρωτικά φαινόμενα στις γειτνιαζουσες επιφάνειες
- Αντιοξειδωτική προστασία στις γειτνιαζουσες επιφάνειες
- Καθαρισμός γειτνιαζουσών επιφανειών
- Στεγανοποίηση
- Υψηλό σημείο αυτανάφλεξης

Σύσταση Λιπαντικών

- Τα λιπαντικά είναι αποτέλεσμα ανάμειξης βασικών ελαίων και χημικών προσθέτων, σε συγκεκριμένες αναλογίες, και διασφαλίζουν τις απαιτήσεις των προδιαγραφών των μηχανημάτων που λιπαίνουν που υπηρετούν.
 - *Ορυκτέλαια*: προϊόντα διύλισης του αργού πετρελαίου.
 - *Συνθετικά έλαια*: προϊόντα χημικής σύνθεσης, με διεργασίες που στοχεύουν, κύρια, στη βελτιστοποίηση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών.
 - *Ημισυνθετικά έλαια*: Συνδυασμός ορυκτέλαιων και συνθετικών.
 - *Έλαια με Χημικά βελτιωτικά πρόσθετα*: προϊόντα ειδικής σύνθεσης που προσδίδουν στο λιπαντικό ειδικά χαρακτηριστικά/ ιδιότητες, οι οποίες καθορίζονται από τις προδιαγραφές της συγκεκριμένης εφαρμογής.



Φθορά Λιπαντικών

- Το λιπαντικό φθείρεται και απαιτείται η αντικατάσταση του για τους ακόλουθους λόγους:
 - Συσσώρευση βρωμιάς
 - Αλλοίωση από μόρια νερού
 - Θερμική διάβρωση του λιπαντικού
 - Καύση των πρόσθετων

Ιξώδες Λιπαντικών

- Ονομάζουμε ιξώδες την αντίσταση που παρουσιάζει ένα υγρό στη ροή του (δυσρευσιτότητα). Το ιξώδες ενός υγρού είναι το κριτήριο που διακρίνουμε αν το υγρό είναι λεπτόρρευστο ή παχύρρευστο.
- Το ιξώδες ενός ρευστού μειώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία.



Χαμηλό ιξώδες

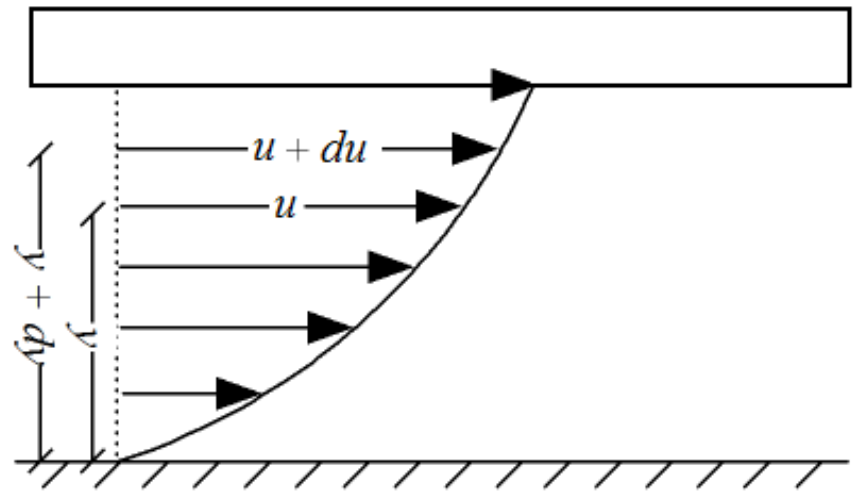
Υψηλό Ιξώδες

Δυναμικό Ιξώδες

- Το δυναμικό ιξώδες (μ) είναι ανάλογο με τη δύναμη που απαιτείται για την υπερνίκηση των εσωτερικών τριβών (νόμος του Newton):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

- τ : διατμητική τάση
- u : ταχύτητα
- y : κατακόρυφη συνιστώσα



- Μονάδες δυναμικού ιξώδους: $1 \text{ Pascal} \cdot \text{Second} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{S}$
- $1 \text{ Poise} = 1 \text{ P} = 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{S}$
- $1 \text{ Centipoise} = 1 \text{ cP} = 10^{-2} \text{ P} = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{S}$
- $1 \text{ reyn} = 6890 \text{ Pa} \cdot \text{S}$

Κινηματικό Ιξώδες

- Το κινηματικό ιξώδες (ν) είναι το πηλίκο του δυναμικού ιξώδους (μ) προς την πυκνότητα του λιπαντικού (ρ) σε μια δεδομένη θερμοκρασία.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

- Μονάδες κινηματικού ιξώδους: $1\text{meter}^2/\text{Second} = 1\text{m}^2/\text{S}$
- $1\text{Stoke} = 1\text{ST} = 10^{-4}\text{m}^2/\text{S}$
- $1\text{Centistoke} = 1\text{cST} = 10^{-2}\text{ST} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{S}$

Τυποποίηση Λιπαντικών

- Η τυποποίηση και ενοποίηση των λιπαντικών έχει γίνει από οργανισμούς όπως:
 - SAE (Society of Automotive Engineers)
 - ISO VG (International Standardization Organization – Viscosity Grade)
 - API (American Petroleum Institute)
 - ILSAC (International Lubricant Standardization and Approval Committee)
 - ACEA (European Automobile Manufacturers Association)
 - ASLE (American Society of Lubrication Engineers)
 - NIGI (National Lubricating Grease Institute) κ.α.

Τυποποίηση SAE

- Σύμφωνα με την τυποποίηση SAE, τα λιπαντικά διακρίνονται σε:
 - Μονότυπα λιπαντικά, τα οποία προσαρμόζουν το ιξώδες σε μικρό φάσμα θερμοκρασιών (π.χ. SAE 10W, SAE 30)
 - Πολύτυπα λιπαντικά, τα οποία προσαρμόζουν και διατηρούν τη ρευστότητά τους σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών (π.χ. SAE 10W/40, SAE 20W 50)

5W-30

Ιξώδες χαμηλής θερμοκρασίας

Τα μικρά νούμερα είναι κατάλληλα για ψυχρές περιοχές.

0W 5W 10W 15W 20W 25W

μαλακό

σκληρό

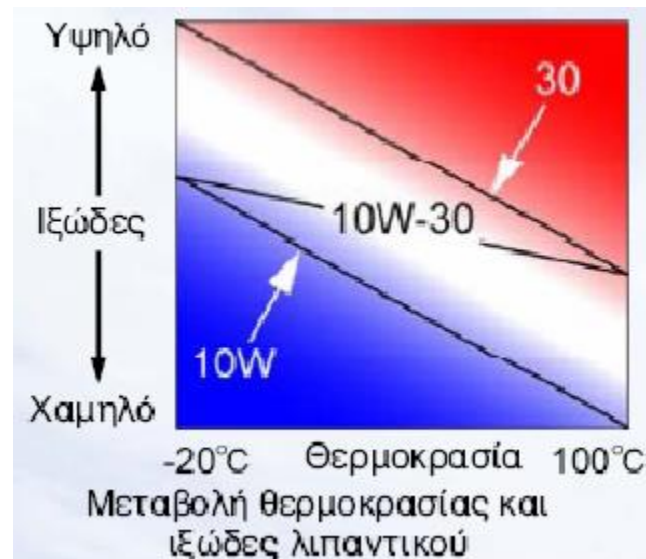
Ιξώδες υψηλής θερμοκρασίας

Τα υψηλότερα νούμερα είναι κατάλληλα για θερμές περιοχές.

20 30 40 50 60

μαλακό

σκληρό

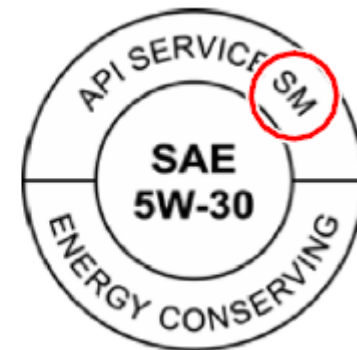
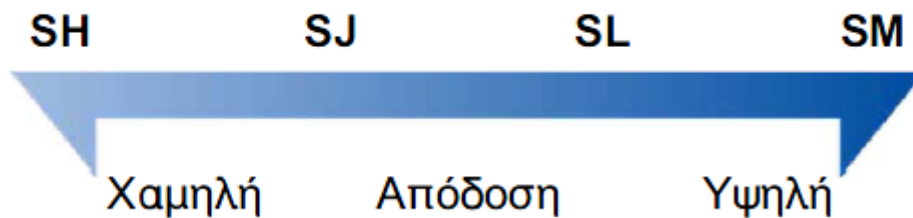


Τυποποίηση ISO

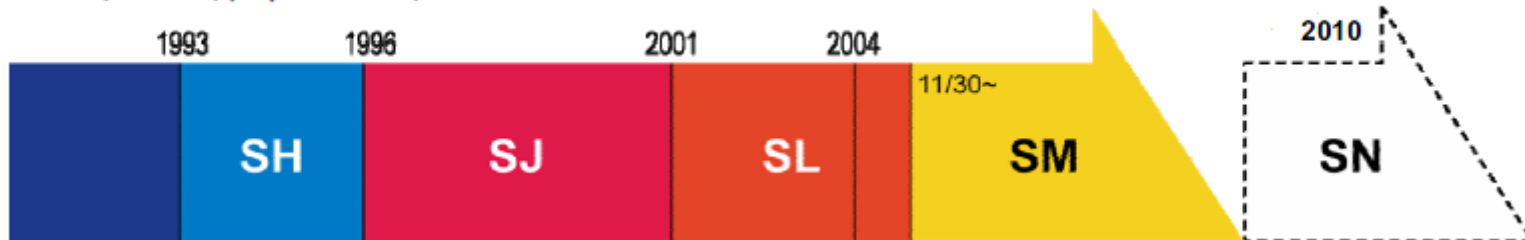
ISO Viscosity Grade	Midpoint Kinematic Viscosity mm ² /s at 40°C (104°F)	Kinematic Viscosity Limit mm ² /s at 40°C (104°F) Minimum	Kinematic Viscosity Limit mm ² /s at 40°C (104°F) Maximum
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06
ISO VG 7	6.8	6.12	7.46
ISO VG 10	10	9.00	11.0
ISO VG 15	15	13.5	16.5
ISO VG 22	22	19.8	24.2
ISO VG 32	32	29.8	35.2
ISO VG 46	46	41.4	50.6
ISO VG 68	68	61.2	74.8
ISO VG 100	100	90.0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650
ISO VG 2200	2200	1980	2420
ISO VG 3200	3200	2880	3520

Τυποποίηση API

Κατηγοριοποιήσεις API για λιπαντικά βενζινοκινητήρων:

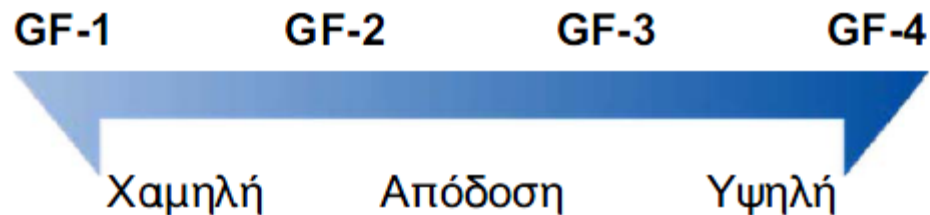


Πρόοδος κατηγοριοποιήσεων API:



Τυποποίηση ILSAC

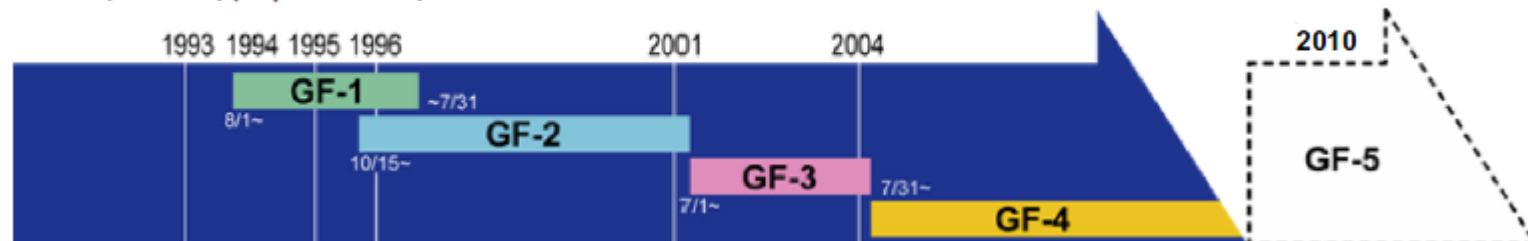
Κατηγοριοποιήσεις ILSAC για λιπαντικά βενζινοκινητήρων:



Μαρκάρισμα ILSAC



Πρόοδος κατηγοριοποιήσεων ILSAC:



Τυποποίηση ACEA

Δείγμα κατηγοριοποίησης ACEA

C4-07

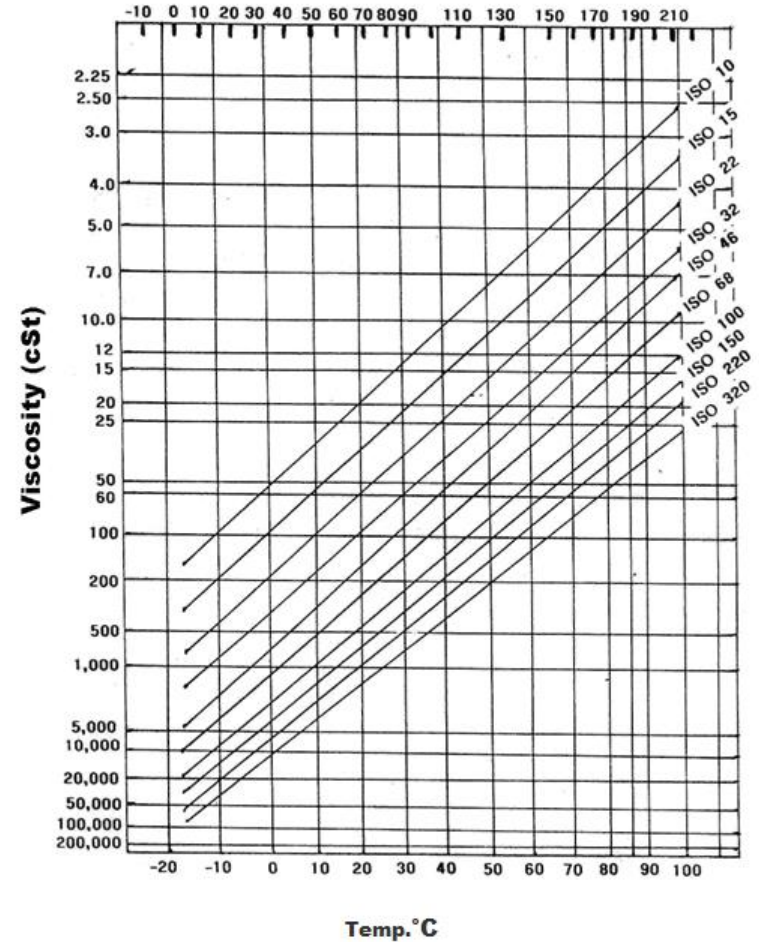
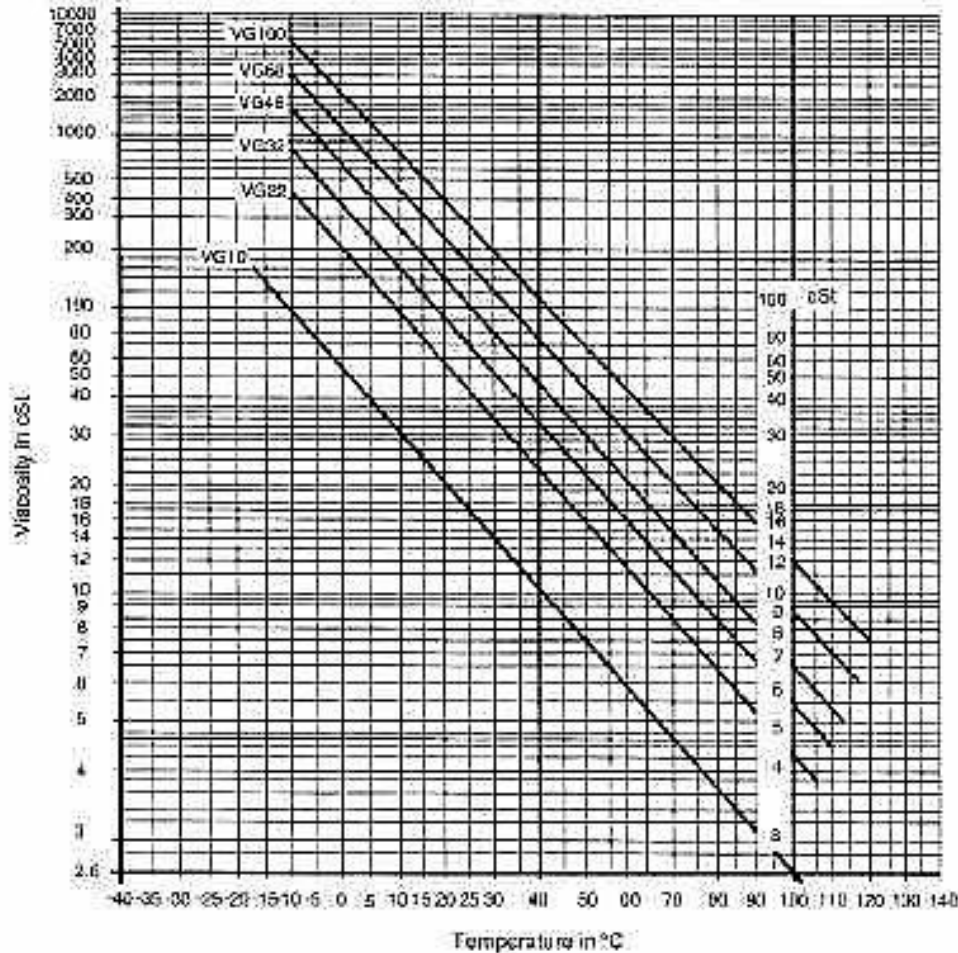
Έτος καθορισμού

Π.χ.: Εάν αναθεωρήθηκε το 2007, αναγράφεται 07

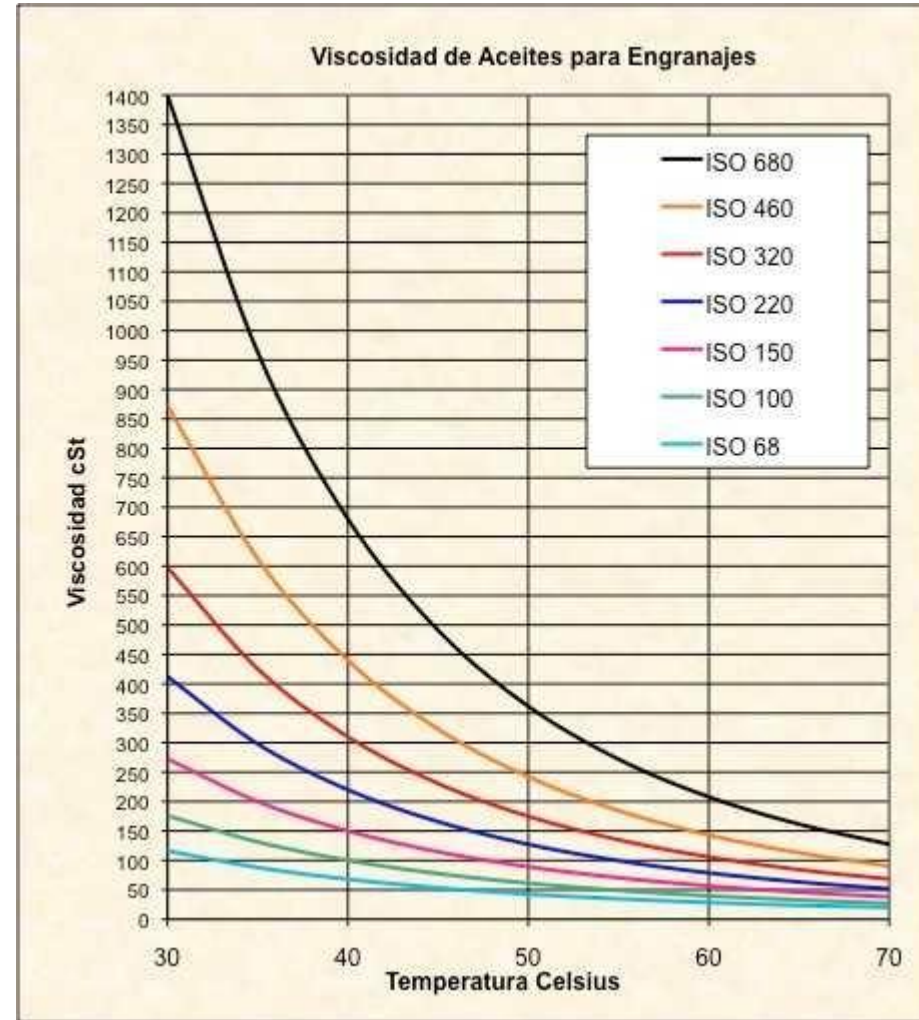
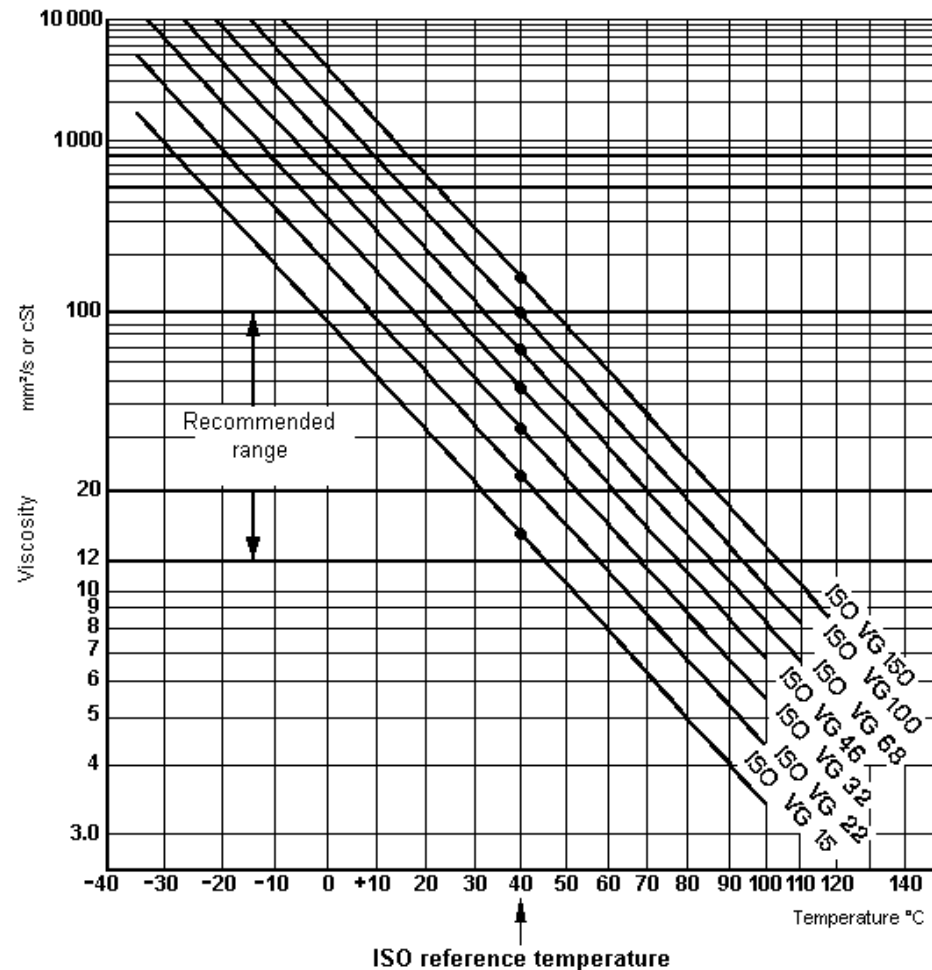
Ιξώδες

- Κατηγορία A/B
Κινητήρες που ισχύει: Βενζιν/ρες και μικροί πετρ/ήρες
Ιξώδες: A1/B1, A3/B3, A3/B4, A5/B5
- Κατηγορία C
Κινητήρες που ισχύει: Βενζιν/ρες και πετρελ/ήρες με συσκευές καθαρισμού (βενζιν/ρες και μικροί πετρ/ήρες)
Ιξώδες: C1, C2, C3, C4
- Κατηγορία E
Κινητήρες που ισχύει: Πετρελαιοκινητήρες βαρέως τύπου
Ιξώδες: E2, E4, E6, E7

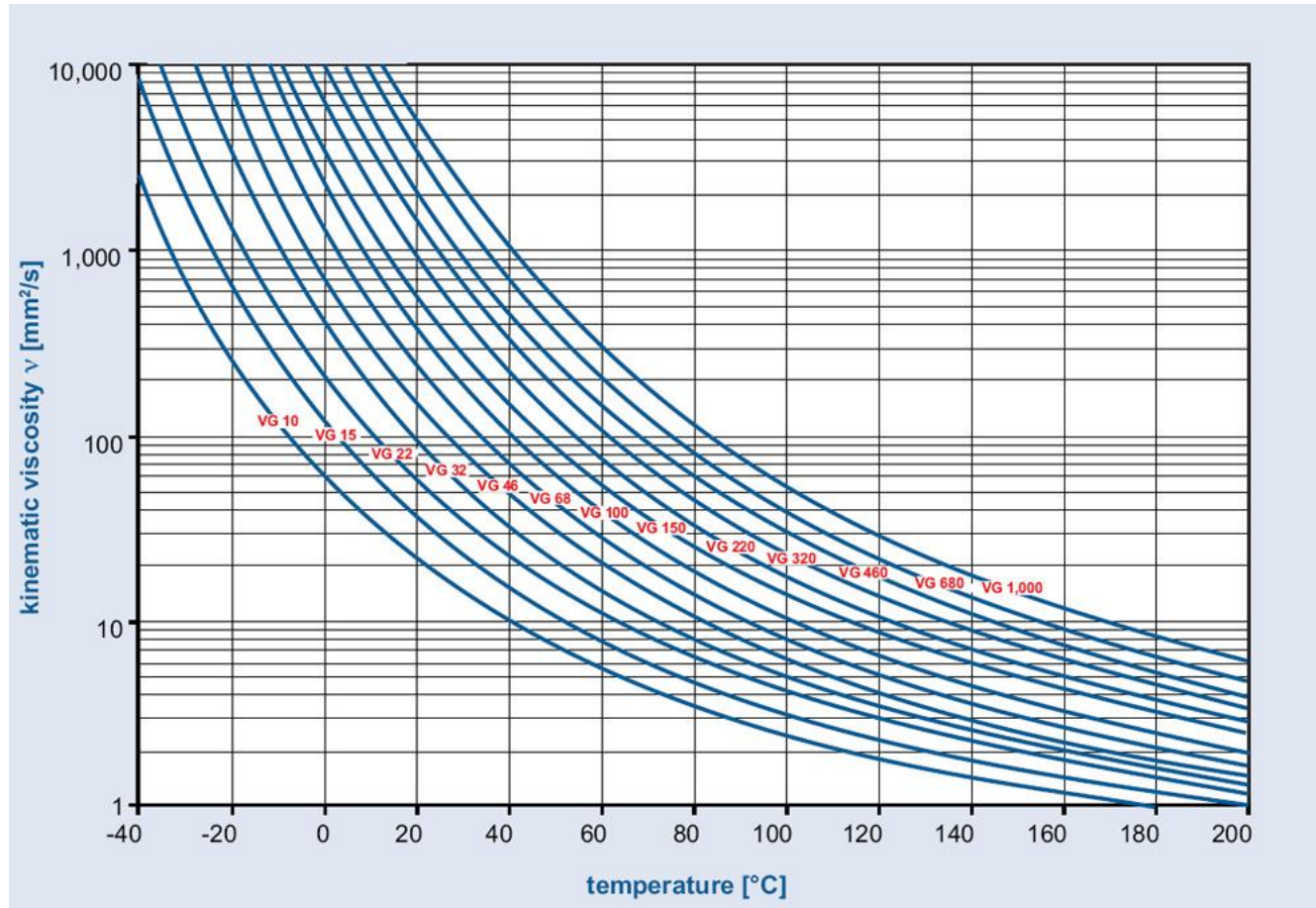
Επίδραση Θερμοκρασίας στο Δυναμικό Ιξώδες (ISO λιπαντικά)



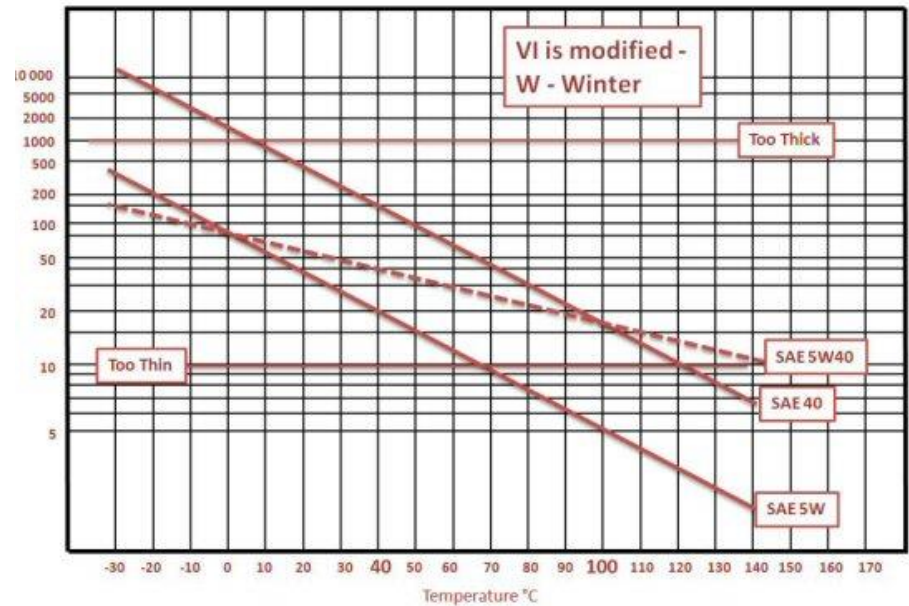
...Επίδραση Θερμοκρασίας στο Δυναμικό Ιξώδες (ISO λιπαντικά)



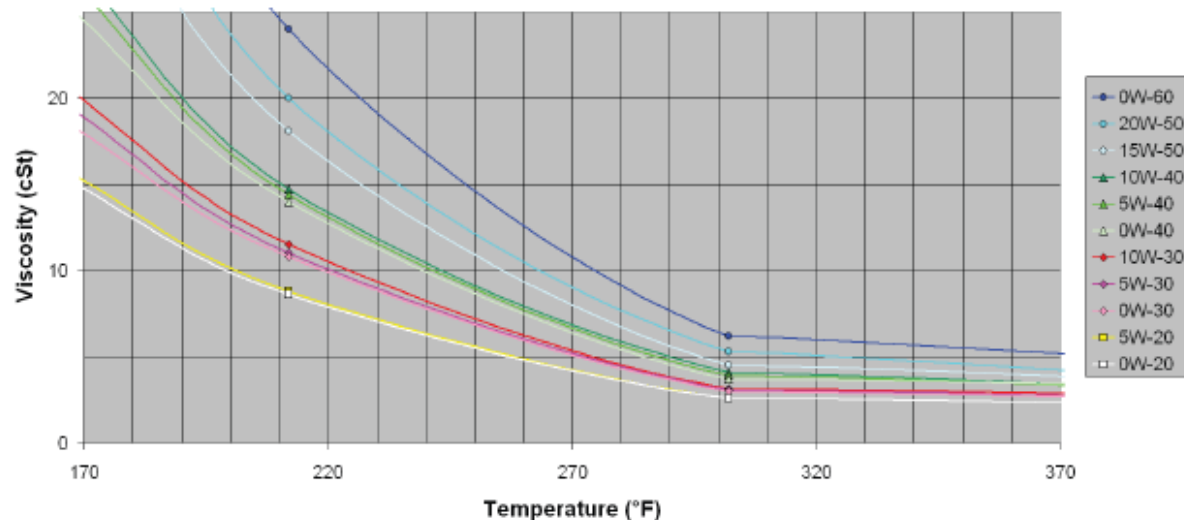
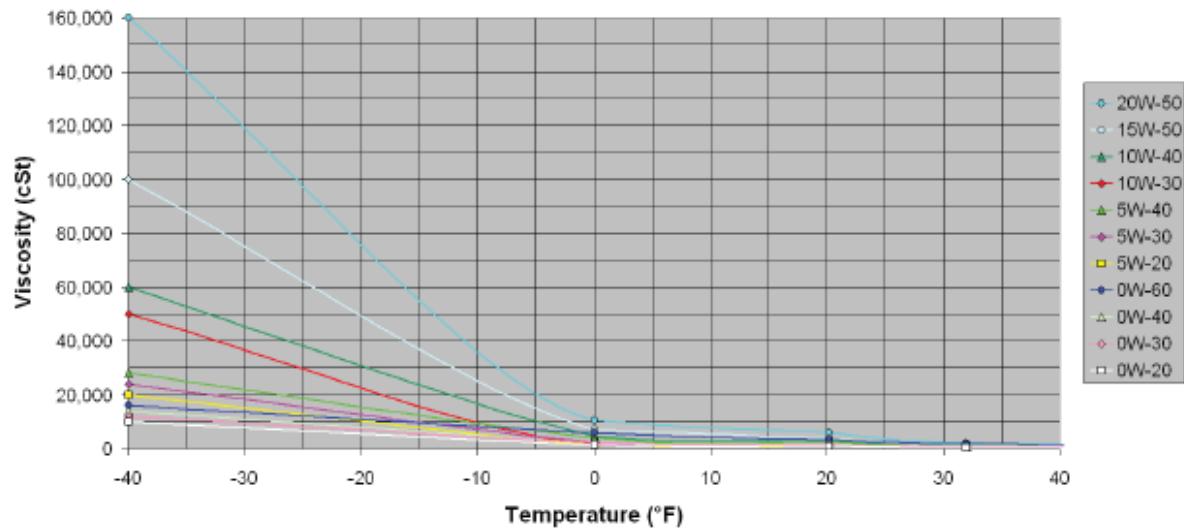
...Επίδραση Θερμοκρασίας στο Δυναμικό Ιξώδες (ISO λιπαντικά)



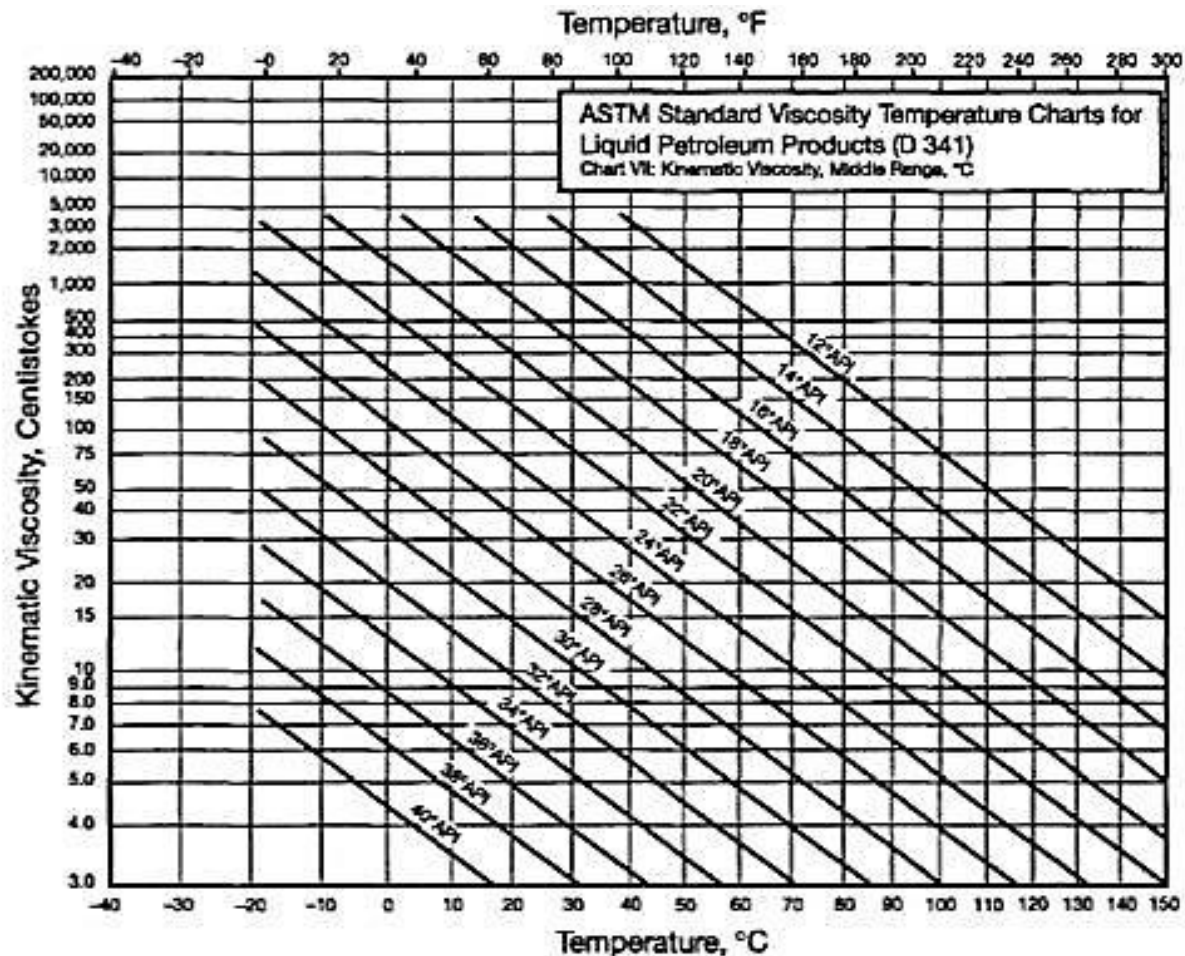
Επίδραση Θερμοκρασίας στο Δυναμικό Ιξώδες (SAE λιπαντικά)



...Επίδραση Θερμοκρασίας στο Δυναμικό Ιξώδες (SAE λιπαντικά)



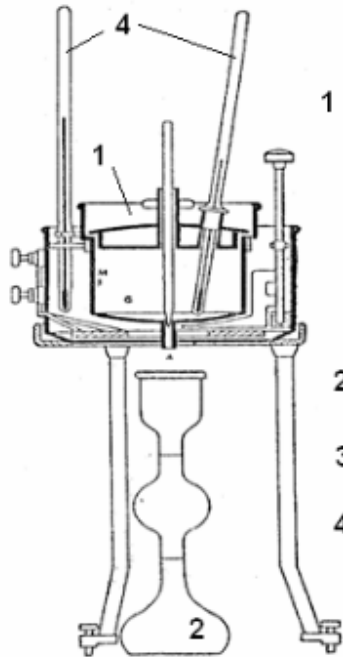
Επίδραση Θερμοκρασίας στο Δυναμικό Ιξώδες (API λιπαντικά)



Πειραματική Μέτρηση Ιξώδους

➤ Γίνεται με διάφορες πειραματικές διατάξεις (ιξωδόμετρα) και προκύπτουν αντίστοιχα συστήματα μονάδων:

➤ Engler (E):



- 1 Ένα ορειχάλκινο επιχρυσωμένο δοχείο το οποίο έχει έναν κεντρικό οχετό εκροής στο εσωτερικό. Στο ένα τμήμα του δοχείου τοποθετείται νερό και στο άλλο το προς μέτρηση λιπαντικό. Και τα δύο τμήματα θερμαίνονται στην ίδια θερμοκρασία η οποία θα πρέπει να είναι σταθερή. Το δοχείο που περιέχει το λιπαντικό έχει ένα κάλυμμα. Ο οχετός εκροής κλείνεται από ένα ξύλινο κωνικό αποφρακτικό στέλεχος το οποίο μπορεί να αφαιρεθεί χωρίς να βγει το κάλυμμα.
- 2 Το δοχείο περισυλλογής του λιπαντικού, περιεκτικότητας 200cm³.
- 3 Χρονόμετρα κλίμακας 1/5 του δευτερολέπτου.
- 4 Θερμόμετρα υδραγωγικού τύπου τυποποιημένα κατά Engler.

$$\text{βαθμοί E} = \frac{\text{χρόνος εκροής λιπαντικού}}{\text{χρόνος εκροής νερού}}$$

➤ Redwood I (R.I.)

➤ Saybolt Universal (S.U.), κλπ.

Αντιστοιχία Τιμών Ιξώδους σε Διάφορες Κλίμακες Μέτρησης

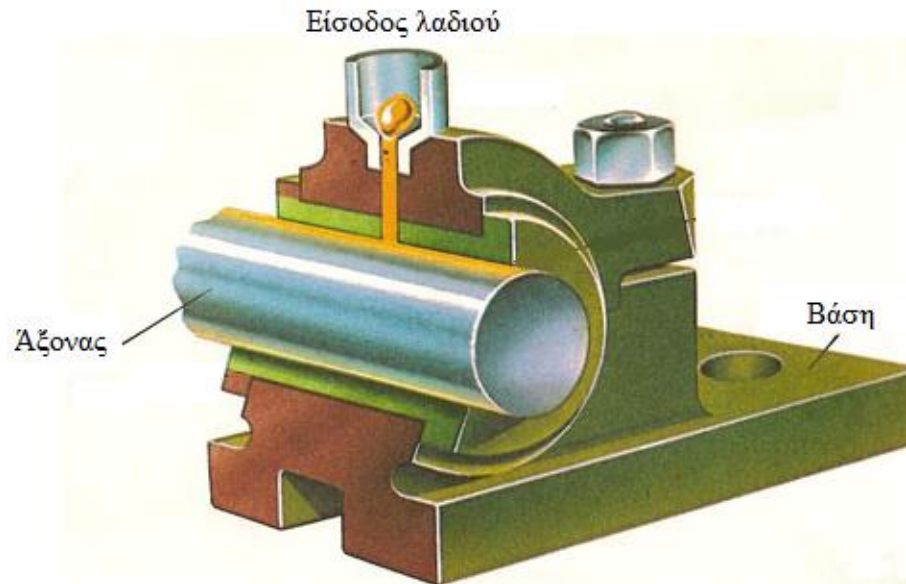
cSt	°E	RI	SSU	cSt	°E	RI	SSU	cSt	°E	RI	SSU	cSt	°E	RI	SSU
1,0	1,04	29	29,5	35,5	4,78	147	167,4	91	12,01	373	424,5	255	33,7	1046	1190
1,5	1,08	30	31,1	36,0	4,84	149	169,7	92	12,14	377	429,5	260	34,3	1066	1213
2,0	1,12	31	32,8	36,5	4,91	151	172,0	93	12,28	381	434,0	265	35,0	1087	1237
2,5	1,17	32	34,5	37,0	4,97	153	174,3	94	12,41	385	438,5	270	35,6	1107	1260
3,0	1,22	33	36,2	37,5	5,03	155	176,6	95	12,54	390	443,5	275	36,3	1128	1283
3,5	1,26	35	37,8	38,0	5,09	157	178,8	96	12,67	394	448,0	280	37,0	1148	1307
4,0	1,31	36	39,5	38,5	5,16	159	181,1	97	12,80	398	452,5	285	37,6	1169	1330
4,5	1,35	37	41,1	39,0	5,22	161	183,4	98	12,94	402	457,5	290	38,3	1189	1353
5,0	1,39	39	42,7	39,5	5,29	163	185,7	99	13,07	406	462,0	295	39,0	1210	1377
5,5	1,44	40	44,3	40,0	5,35	165	188,0	100	13,20	410	466,5	300	39,6	1230	1400
6,0	1,48	41	45,9	40,5	5,42	167	190,3	102	13,46	418	476,5	310	40,9	1271	1447
6,5	1,52	42	47,5	41,0	5,48	169	192,6	104	13,73	426	485	320	42,2	1312	1493
7,0	1,57	44	49,1	41,5	5,55	171	194,9	106	13,99	435	495	330	43,6	1353	1540
7,5	1,61	45	50,8	42,0	5,61	173	197,2	108	14,26	443	504	340	44,9	1394	1587
8,0	1,65	46	52,4	42,5	5,68	175	199,5	110	14,52	451	513	350	46,2	1435	1633
8,5	1,70	48	54,1	43,0	5,74	177	201,8	112	14,78	459	523	360	47,5	1476	1680
9,0	1,74	49	55,8	43,5	5,81	179	203,5	114	15,05	467	532	370	48,8	1517	1727
9,5	1,79	51	57,5	44,0	5,87	181	206,0	116	15,31	476	541	380	50,2	1558	1773
10,0	1,83	52	59,2	44,5	5,94	183	208,5	118	15,58	484	551	390	51,5	1599	1820
10,5	1,88	53,5	62,0	45,0	6,00	185	211,0	120	15,84	492	560	400	52,8	1640	1867
11,0	1,93	55	62,8	45,5	6,07	187	213,5	122	16,10	500	569	410	54,1	1681	1913
11,5	1,98	57	64,7	46,0	6,13	189	216,0	124	16,37	508	579	420	55,4	1722	1960
12,0	2,03	58,5	66,5	46,5	6,20	191	217,5	126	16,63	517	588	430	56,8	1763	2007
12,5	2,07	60	68,4	47,0	6,26	193	220,0	128	16,90	525	597	440	58,1	1804	2053
13,0	2,12	62	70,2	47,5	6,33	195	222,0	130	17,16	533	607	450	59,4	1845	2100
13,5	2,17	63,5	72,1	48,0	6,39	197	224,0	132	17,42	541	616	460	60,7	1886	2147
14,0	2,22	65	74,0	48,5	6,46	199	226,5	134	17,69	549	625	470	62,0	1927	2193
14,5	2,27	66,5	76,0	49,0	6,52	201	229,0	136	17,95	558	635	480	63,4	1968	2240
15,0	2,33	68	77,9	49,5	6,59	203	231,5	138	18,22	566	644	490	64,7	2009	2287
15,5	2,38	70	79,9	50,0	6,65	205	234,0	140	18,48	574	653	500	66,0	2050	2334
16,0	2,43	72	81,9	51	6,78	209	238,5	142	18,74	582	663	510	67,3	2091	2380
16,5	2,49	73,5	83,9	52	6,91	213	243,0	144	19,01	590	672	520	68,6	2132	2427
17,0	2,54	75	85,9	53	7,04	217	247,5	146	19,27	598	681	530	70,0	2173	2474
17,5	2,60	77	88,0	54	7,17	222	252,0	148	19,54	607	691	540	71,3	2214	2520
18,0	2,65	79	90,1	55	7,30	226	256,5	150	19,80	615	700	550	72,6	2255	2567
18,5	2,71	80,5	92,2	56	7,43	230	261,0	152	20,06	623	709	560	73,9	2296	2614
19,0	2,76	82	94,3	57	7,56	234	266,0	154	20,33	631	719	570	75,2	2337	2660
19,5	2,82	84	96,4	58	7,69	238	271,0	156	20,59	640	728	580	76,6	2378	2707
20,0	2,88	86	98,5	59	7,82	242	275,5	158	20,86	648	737	590	77,9	2419	2754
20,5	2,93	88	100,6	60	7,95	246	280,0	160	21,12	656	747	600	79,2	2460	2800
21,0	2,99	90	102,7	61	8,08	250	284,5	162	21,38	664	756	610	80,5	2501	2847
21,5	3,05	92	104,9	62	8,21	254	289,0	164	21,65	672	765	620	81,8	2542	2893
22,0	3,11	94	107,0	63	8,34	258	294,0	166	21,91	681	775	630	83,2	2583	2940
22,5	3,17	95,5	109,2	64	8,47	262	299,0	168	22,18	689	784	640	84,5	2624	2987
23,0	3,23	97	111,4	65	8,60	268	303,5	170	22,44	697	793	650	85,8	2665	3034
23,5	3,29	99	113,6	66	8,73	271	308,0	172	22,70	705	803	660	87,1	2706	3080
24,0	3,35	101	115,8	67	8,86	275	312,5	174	22,97	713	812	670	88,4	2747	3127
24,5	3,41	103	118,0	68	8,99	279	317,0	176	23,23	722	821	680	89,8	2788	3174
25,0	3,47	105	120,2	69	9,12	283	321,5	178	23,50	730	830	690	91,1	2829	3220
25,5	3,53	107	122,4	70	9,25	287	326,0	180	23,76	738	840	700	92,4	2870	3267
26,0	3,59	109	124,6	71	9,38	291	331,5	182	24,02	746	849	710	93,7	2911	3314
26,5	3,65	111	126,8	72	9,51	295	336,0	184	24,29	754	859	720	95,0	2952	3360
27,0	3,71	113	129,0	73	9,64	299	340,5	186	24,55	763	868	730	96,4	2993	3407
27,5	3,77	115	131,3	74	9,77	303	345,0	188	24,82	771	877	740	97,7	3034	3454
28,0	3,83	117	133,5	75	9,90	307	350,0	190	25,08	779	887	750	99,0	3075	3500
28,5	3,90	119	135,8	76	10,03	311	354,5	192	25,34	787	896	800	106	3280	3734
29,0	3,96	121	138,0	77	10,16	316	359,5	194	25,61	795	905	850	112	3485	3967
29,5	4,02	123	140,3	78	10,30	320	364,0	196	25,87	804	915	900	119	3690	4200
30,0	4,08	125	142,5	79	10,43	324	368,5	198	26,14	812	924	950	125	3895	4434
30,5	4,15	127	144,8	80	10,56	328	373,0	200	26,40	820	933	1000	132	4100	4667
31,0	4,21	129	147,0	81	10,69	332	378,0	205	27,1	841	957	1100	145	4510	5134
31,5	4,27	131	149,3	82	10,82	336	382,5	210	27,7	861	980	1200	158	4920	5600
32,0	4,33	133	151,5	83	10,96	340	387,5	215	28,4	882	1003	1300	172	5330	6067
32,5	4,40	135	153,8	84	11,09	344	392,0	220	29,0	902	1027	1400	185	5740	6534
33,0	4,46	137	156,0	85	11,22	349	396,5	225	29,7	923	1050	1500	198	6150	7001
33,5	4,52	139	158,3	86	11,35	353	401,5	230	30,4	943	1073	1600	211	6560	7467
34,0	4,58	141	160,6	87	11,48	357	406,0	235	31,0	964	1097	1700	224	6970	7934
34,5	4,65	143	162,9	88	11,62	361	410,5	240	31,7	984	1120	1800	238	7380	8401
35,0	4,71	145	165,1	89	11,75	365	415,5	245	32,3	1005	1143	1900	251	7790	8867
35,0	4,71	145	16	90	11,88	369	420,0	250	33,0	1025	1167	2000	264	8200	9334

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

8. Κατηγορίες Λίπανσης-Έδρανα Ολίσθησης

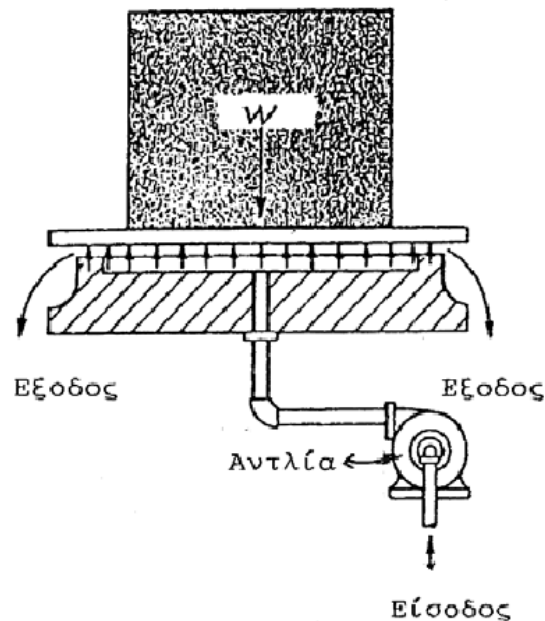
Υδροδυναμική Λίπανση

- Κατά την **υδροδυναμική λίπανση**, το λιπαντικό στρώμα και η πίεση που αναπτύσσεται είναι αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης των γειτονικών επιφανειών. Οι επιφάνειες δεν λιπαίνονται όταν βρίσκονται σε ακινησία. Όταν όμως υφίσταται σχετική κίνηση μεταξύ των επιφανειών, μπορεί να δημιουργηθεί λιπαντικό στρώμα με δυνατότητα ανάπτυξης πολύ υψηλών πιέσεων, καθώς το λιπαντικό τροφοδοτείται με χαμηλή πίεση ή παρασύρεται από την κίνηση των επιφανειών.



Υδροστατική Λίπανση

- Όταν η ταχύτητα των γειτονικών επιφανειών είναι μηδενική ή πολύ μικρή, τότε έχουμε πίεση μηδενική ή σχεδόν μηδενική. Υπάρχουν κατασκευές (π.χ. τηλεσκόπια), όπου η σχετική ταχύτητα είναι πολύ μικρή και με την εφαρμογή υδροδυναμικής λίπανσης, το λιπαντικό δεν μπορεί να αναπτύξει πίεση που θα αντισταθμίσει τα φορτία της κατασκευής. Σε τέτοιες περιπτώσεις επιβάλλεται η εφαρμογή **υδροστατικής λίπανσης**, όπου με τη βοήθεια αντλίας τροφοδοτούμε το χώρο ανάμεσα στις λιπαινόμενες επιφάνειες, με λιπαντικό υπό πίεση.



Οριακή Λίπανση

- Σε ένα υδροδυναμικό έδρανο κατά την έναρξη και το τέλος της λειτουργίας, οι τιμές της ταχύτητας αρχίζουν από μια μηδενική και φτάνουν σε μια μηδενική τιμή. Έτσι δεν έχουμε ανάπτυξη πίεσης στο λιπαντικό, ικανής να αντισταθμίσει τα φορτία που δέχεται το έδρανο. Ένα μέρος του φορτίου αντισταθμίζεται από το λιπαντικό και ένα μέρος από την επαφή των στερεών επιφανειών έχουμε δηλαδή ημιυγρή τριβή.
- Το παχύ λιπαντικό στρώμα δεν μπορεί να διατηρηθεί και έχουμε μόνο μια λεπτή λιπαντική μεμβράνη πάχους μερικών μορίων. Τη **λίπανση** υπό τέτοιες συνθήκες την ονομάζουμε **οριακή**. Ο συντελεστής τριβής στην οριακή λίπανση είναι αρκετά μεγάλος όπως επίσης και η φθορά είναι σημαντική.

Ελαστοϋδροδυναμική Λίπανση

- Στην πράξη συναντάμε περιπτώσεις επαφής κύλισης (π.χ. λίπανση οδοντωτών τροχών,), όπου ενώ δεν μπορεί να έχουμε υδροδυναμική λίπανση, η φθορά των υλικών είναι τόσο μικρή σαν είχαμε υδροδυναμική λίπανση. Η μελέτη τέτοιων φαινομένων είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη της θεωρίας της **ελαστοϋδροδυναμικής λίπανσης**.
- Κατά την ερμηνεία των φαινομένων της υδροδυναμικής λίπανσης θεωρούμε ότι δεν έχουμε μόνιμη παραμόρφωση των επιφανειών. Η θεωρία της ελαστοϋδροδυναμικής λίπανσης θεωρεί, ότι έχουμε ελαστική παραμόρφωση των επιφανειών και ότι το ιξώδες μεταβάλλεται με την πίεση.



Έδρανα με Λίπανση

- Τα έδρανα είναι τα στοιχεία μηχανών, στα οποία στηρίζονται οι στροφείς των ατράκτων και των αξόνων ώστε να επιτυγχάνεται η περιστροφή τους.
- Μέσω αυτών μεταβιβάζονται τα φορτία που εφαρμόζονται στις ατράκτους, στο έδαφος ή σε άλλες κατασκευές.
- Οι διαστάσεις τους είναι, συνήθως, τυποποιημένες και πάντοτε ορίζονται με βάση τη διάμετρο της ατράκτου που στηρίζουν.
- Υπάρχουν δύο είδη εδράνων, τα έδρανα ολίσθησης όπου κατά την περιστροφή της ατράκτου αναπτύσσεται τριβή ολίσθησης και τα έδρανα κύλισης στα οποία αναπτύσσεται τριβή κύλισης, που επιτυγχάνεται με την παρεμβολή μεταξύ του κινητού και του ακίνητου μέρους τους, στοιχείων που εξαναγκάζονται σε κύλιση, όπως είναι οι σφαίρες.
- Η τριβή κύλισης είναι πολύ μικρότερη από την τριβή ολίσθησης οπότε γίνεται προσπάθεια, όπου είναι δυνατό, τα έδρανα ολίσθησης να αντικατασταθούν από έδρανα κύλισης, ώστε να υπάρχουν μικρότερες απώλειες ενέργειας και καλύτερη απόδοση.

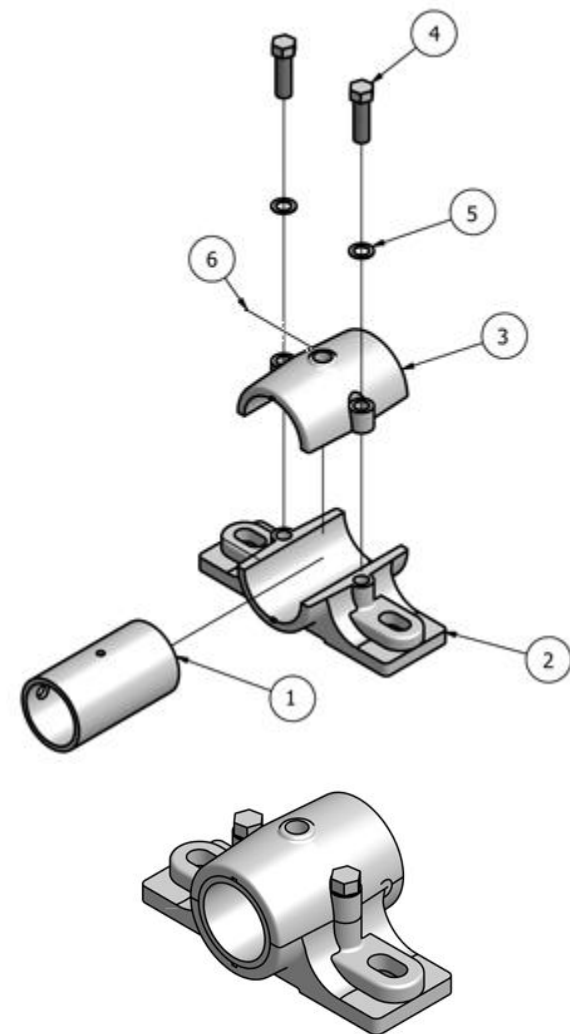
Έδρανα Ολίσθησης

- Στην περίπτωση της τριβής ολίσθησης εμφανίζονται τρεις καταστάσεις τριβής, η ξηρή τριβή με ή χωρίς ενδιάμεσα υλικά, κατά την οποία τα στερεά σώματα έρχονται σε άμεση επαφή ή πάνω στις επιφάνειες τους βρίσκεται στρώση ξένων σωμάτων ή στερεών λιπαντικών σωμάτων, η υγρή τριβή κατά την οποία οι δύο τριβόμενες επιφάνειες δεν έρχονται απευθείας σε επαφή αλλά μεσολαβεί ένα στρώμα φέροντος υγρού και μέσω του ιξώδους του δημιουργείται τριβή, τέλος, υπάρχει η μικτή τριβή η οποία δημιουργείται όταν υπάρχει εν μέρει τριβή στερεού σώματος και εν μέρει υγρού, **εάν η απαραίτητη πίεση δημιουργείται μέσω της κίνησης η τριβή ονομάζεται υδροδυναμική, ενώ αν αναπτύσσεται με αντλία ονομάζεται υδροστατική.**
- Τα έδρανα, γενικά, κατατάσσονται σε ακτινικά και αξονικά.
- Τα έδρανα ολίσθησης προτιμώνται στις εδράσεις με πολλές στροφές, υψηλά φορτία και μεγάλη διάρκεια ζωής. Επίσης, προτιμώνται σε εδράσεις οι οποίες σε στάση ή σε λίγες στροφές δέχονται υψηλές κρούσεις και κραδασμούς και σε εδράσεις με μικρές απαιτήσεις, τέλος, προτιμώνται όταν απαιτείται αθόρυβη λειτουργία, υπάρχει περιορισμός στις διαστάσεις, απαιτείται απλή κατασκευή με μικρό κόστος και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν έδρανα κύλισης.

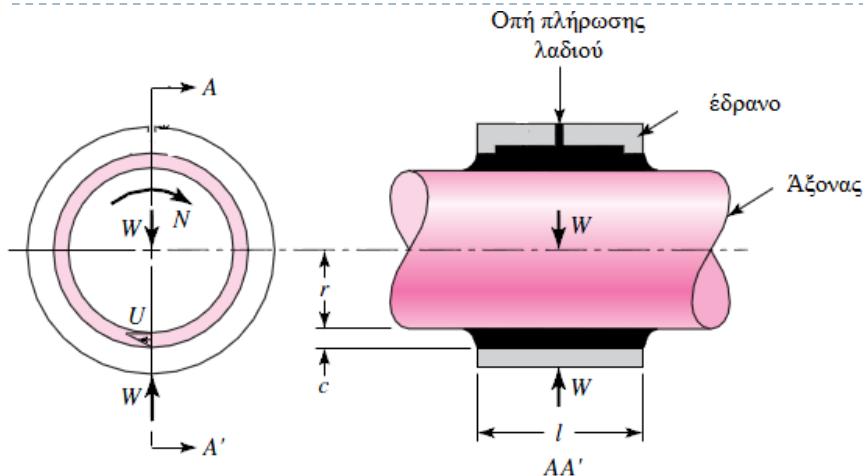
Μέρη Εδράνων Ολίσθησης

➤ Τα έδρανα ολίσθησης αποτελούνται από:

1. Τον τριβέα που είναι ένα κυλινδρικό σώμα με οπή στο μέσο ώστε να δέχεται το στροφέα της ατράκτου. Ο τριβέας, συνήθως, αποτελείται από δύο μέρη (διαιρούμενος), αλλά μπορεί να είναι και μονοκόμματος και κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο ή μπρούντζο. Το πλέον ευαίσθητο τμήμα ενός εδράνου είναι ο τριβέας και πρέπει να δίνεται προσοχή στο υλικό του, στην ποιότητα επιφάνειας του, στον τρόπο λίπανσης του και στις διαστάσεις του.
2. Το σώμα επάνω στο οποίο στερεώνεται ο τριβέας και το οποίο κατά κανόνα κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο.
3. Το κάλυμμα που αποτελεί το επάνω μέρος του σώματος του εδράνου και το οποίο κατασκευάζεται επίσης από χυτοσίδηρο.
4. Τους κοχλίες σύσφιξης οι οποίοι ενώνουν το κάλυμμα, τον τριβέα και το σώμα.
5. Τις ροδέλες ασφαλείας των κοχλιών.
6. Την οπή εισόδου του λιπαντικού.
7. Την πλάκα έδρασης επάνω στην οποία τοποθετείται το έδρανο. Αυτή διαμορφώνεται ώστε να πατά μόνο σε περιφερειακό τμήμα, ώστε να εξασφαλίζεται καλύτερη έδραση καθώς αυξάνεται η πίεση στις επιφάνειες επαφής και να αποφεύγεται ο κίνδυνος ανομοιόμορφης έδρασης από στρεβλές επιφάνειες.



Αριθμός Sommerfeld



- W = κατακόρυφο φορτίο στον άξονα
- r = ακτίνα άξονα
- l = μήκος εδράνου
- c = χάρη μεταξύ άξονα και εδράνου
- N = περιστροφική ταχύτητα άξονα σε rev/S
- U = μέγιστη περιφερειακή ταχύτητα λιπαντικού
- f = συντελεστής τριβής

$$\text{Newton : } \tau = \mu \frac{du}{dy} \Rightarrow (\text{γραμμική μεταβολή τάσης}) \Rightarrow \tau = \mu \frac{U}{c} \Rightarrow \tau = \mu \frac{2\pi r N}{c} \Rightarrow \tau = \frac{2\pi r \mu N}{c} \quad (1)$$

$$\text{Ροπή : } T = (\tau)(A)r \Rightarrow (1) \Rightarrow T = \left(\frac{2\pi r \mu N}{c} \right) (2\pi r l) r \Rightarrow T = \frac{4\pi^2 r^3 l \mu N}{c} \quad (2)$$

$$\text{Μέση Πίεση : } P = W/2rl \quad (3)$$

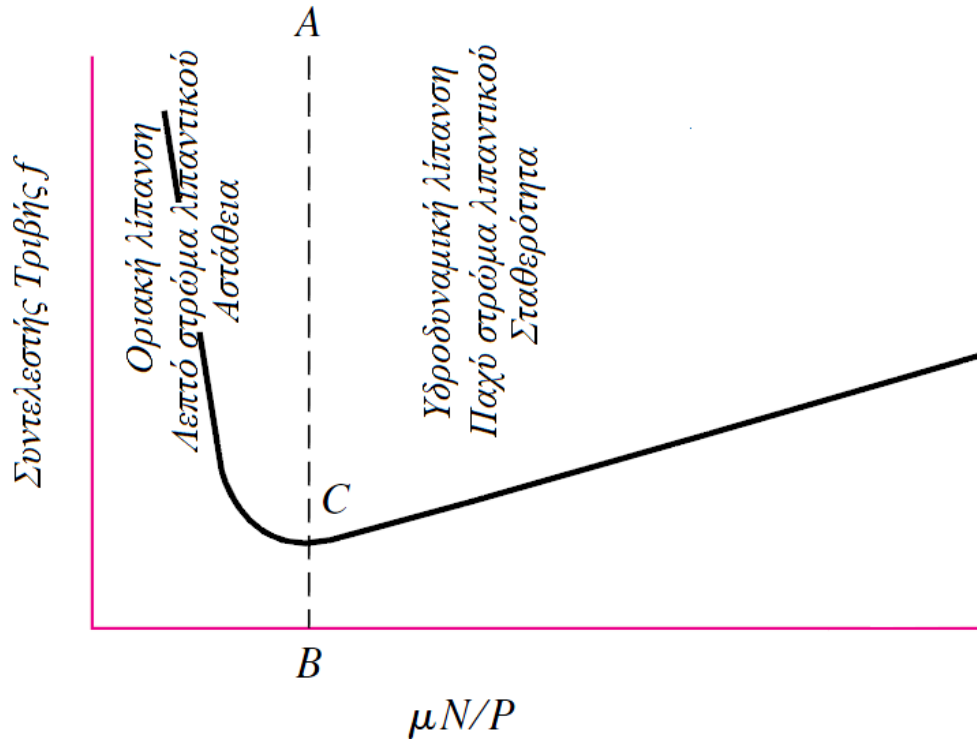
$$\text{Ροπή : } T = f(W)r = (3) = f(2rlP)r = 2fr^2lP \quad (4)$$

$$(2), (4) \Rightarrow f = 2\pi^2 \frac{\mu N}{P} \frac{r}{c} \quad (5) \rightarrow \text{εξίσωση Petroff}$$

$$\text{Αριθμός Sommerfeld : } S = \left(\frac{r}{c} \right)^2 \frac{\mu N}{P} \quad (6)$$

$$(5), (6) \Rightarrow f \frac{r}{c} = 2\pi^2 \frac{\mu N}{P} \left(\frac{r}{c} \right)^2 = 2\pi^2 S$$

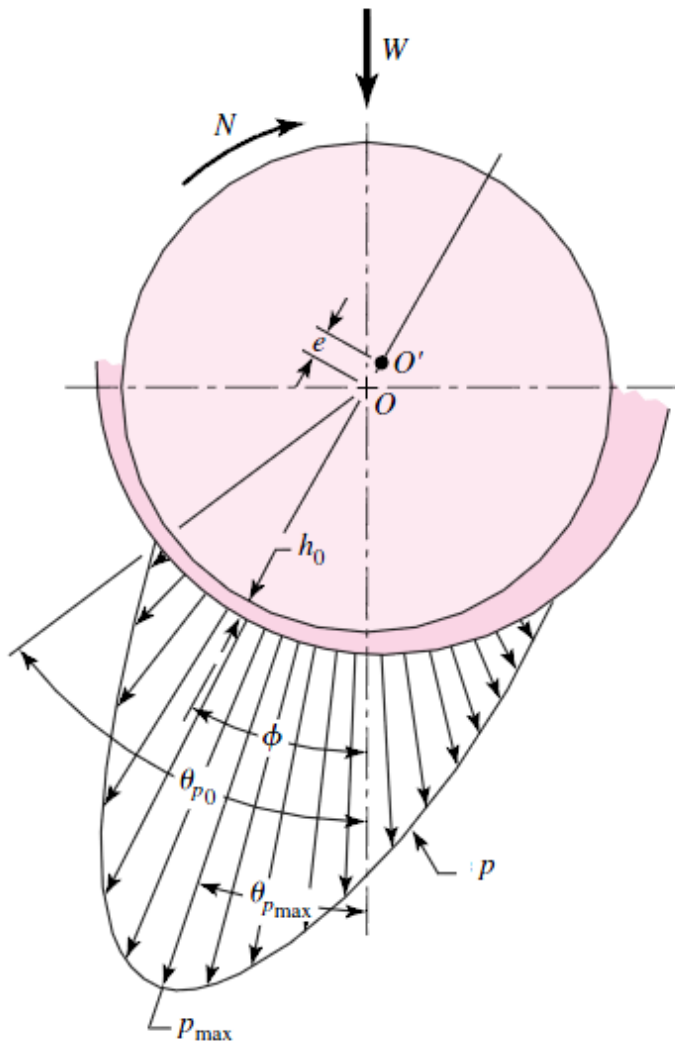
Σταθερή Λίπανση



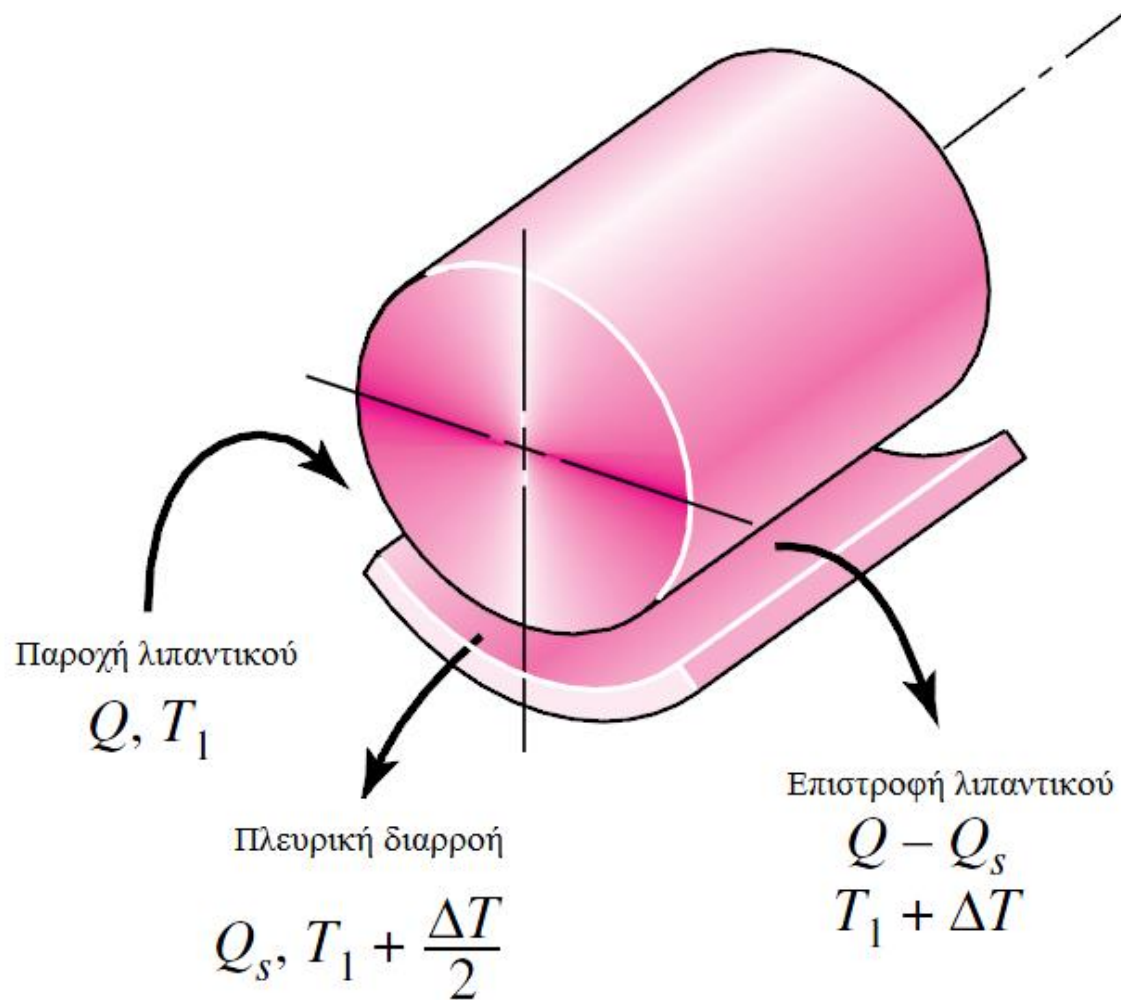
$$\text{Όταν : } \frac{\mu N}{P} \geq 1.7 \times 10^{-6}$$

Έχουμε σταθερή υδροδυναμική λίπανση χωρίς να ακουμπά μέταλλο με μέταλλο

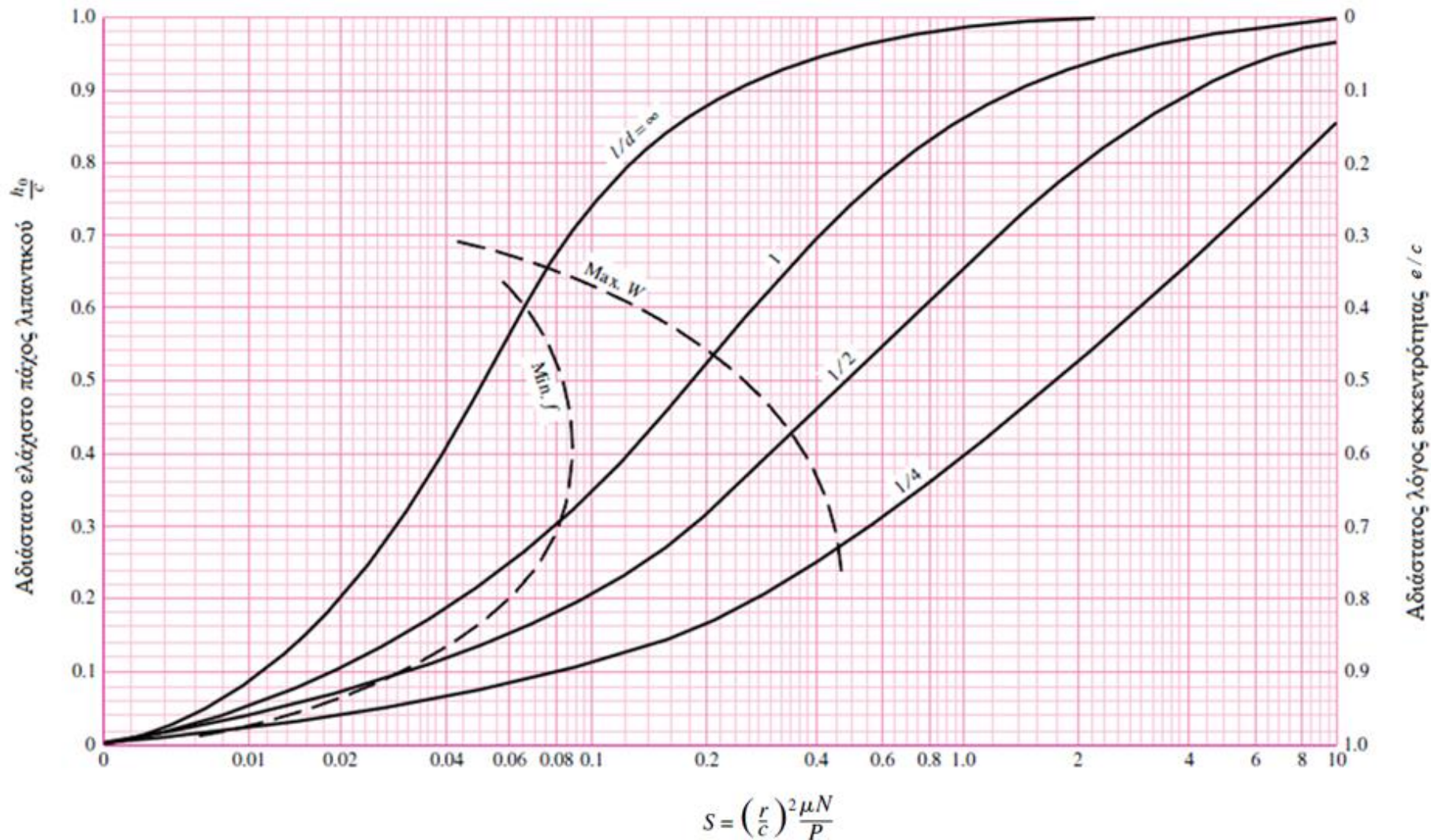
Κατανομή Πίεσης Λιπαντικού



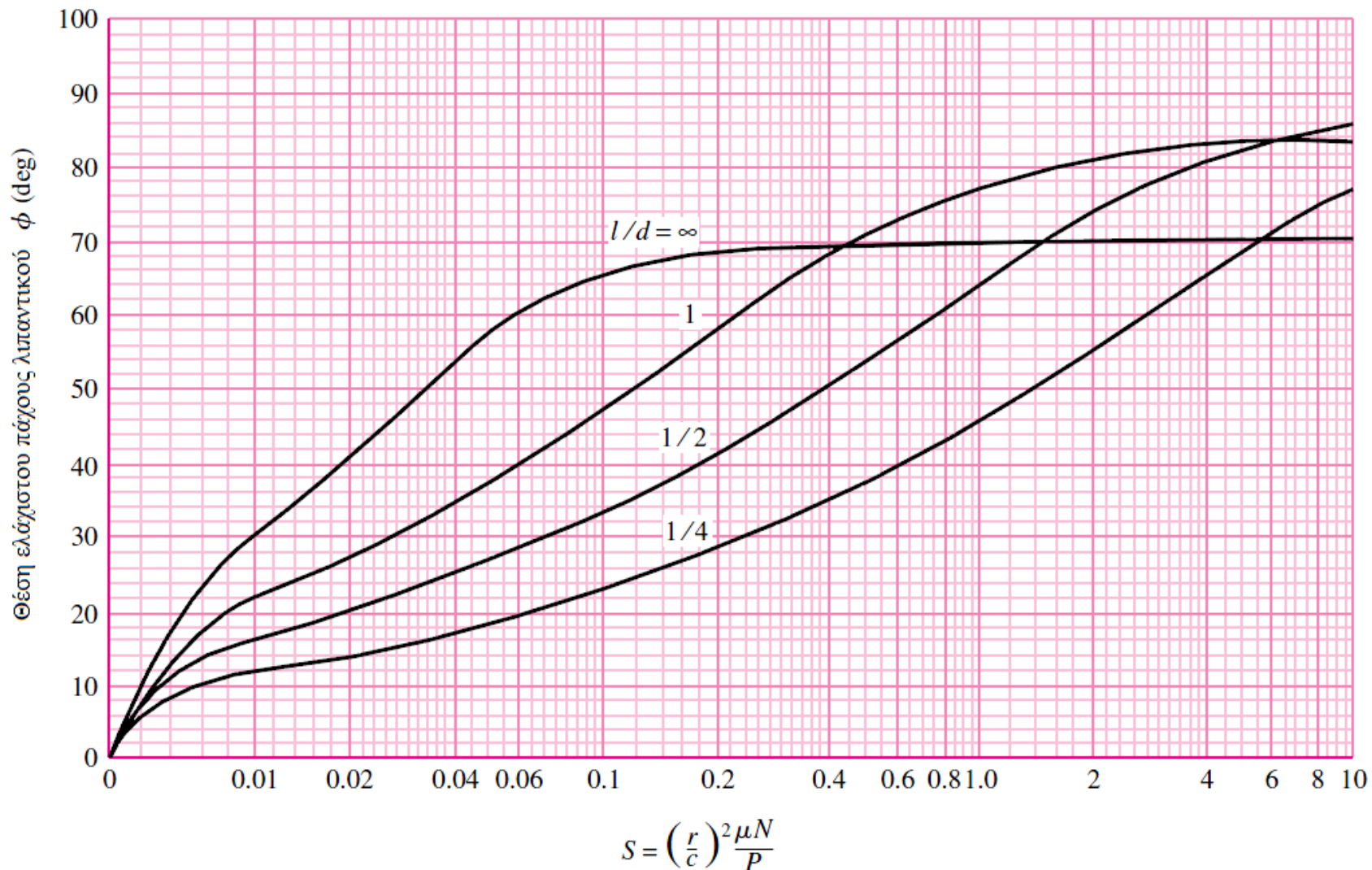
Ροή Λιπαντικού & Αύξηση Θερμοκρασίας Λιπαντικού



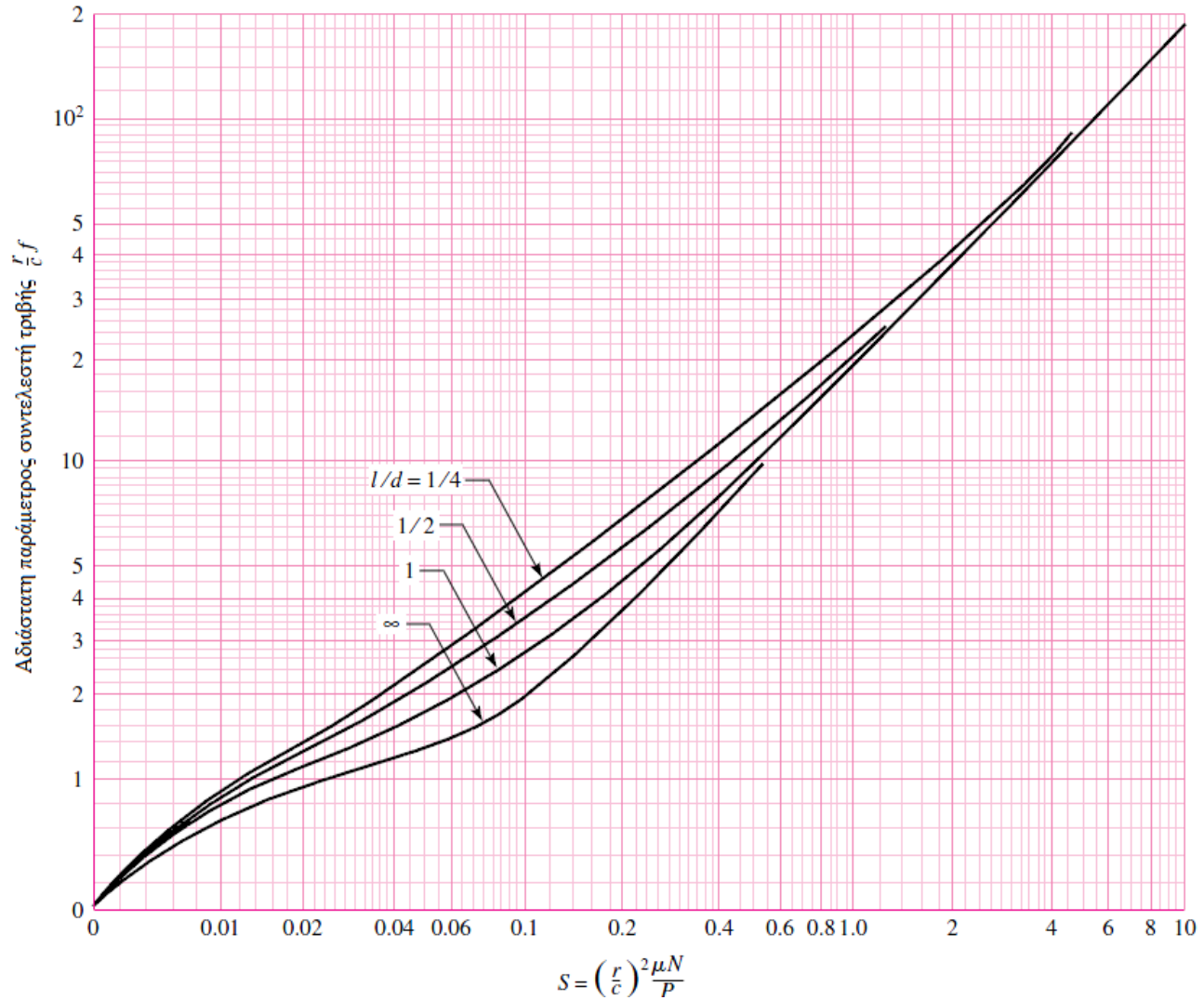
Ελάχιστο Πάχος Λιπαντικού & Εκκεντρότητα



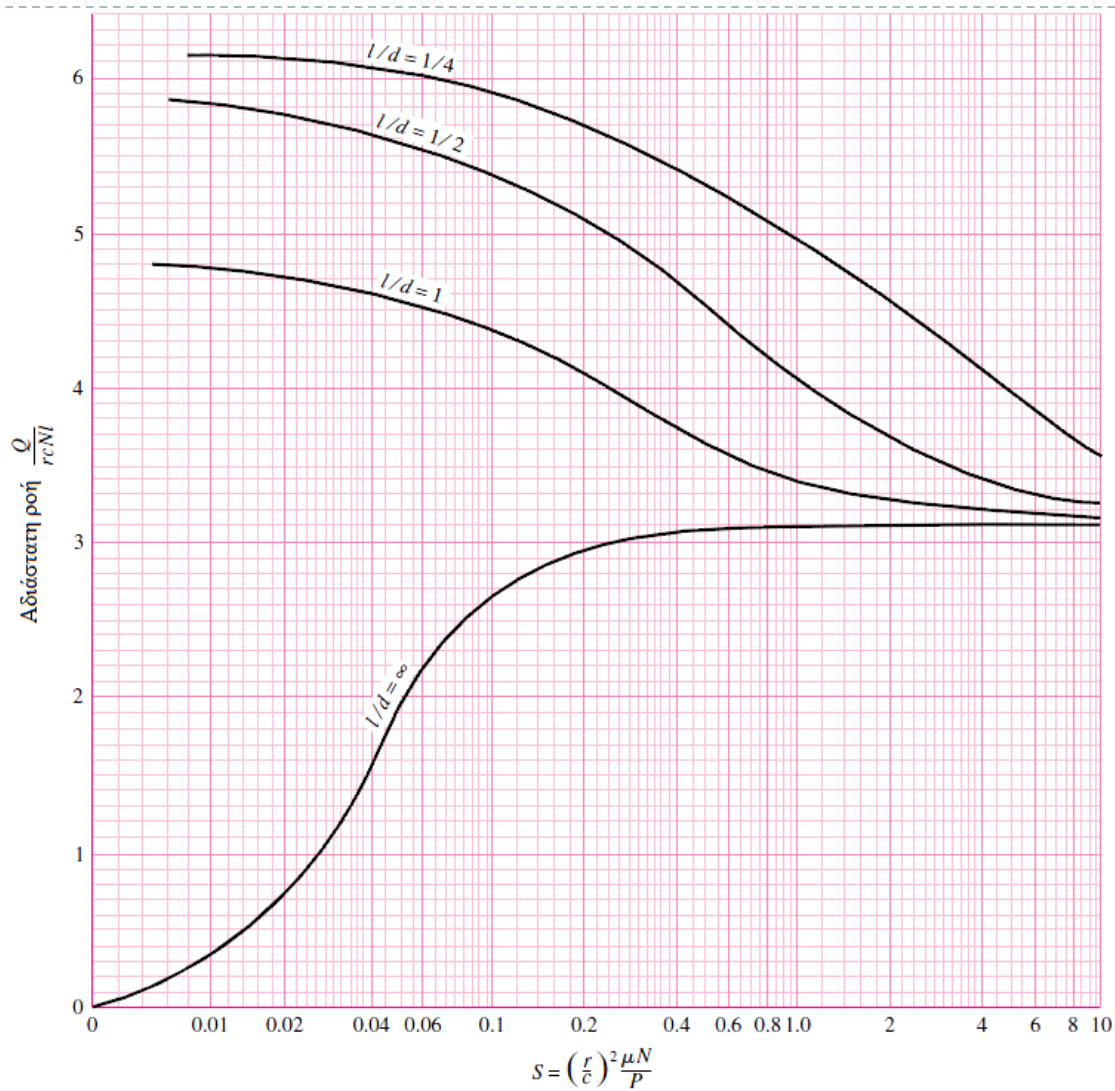
Θέση Ελάχιστου Πάχους Λιπαντικού



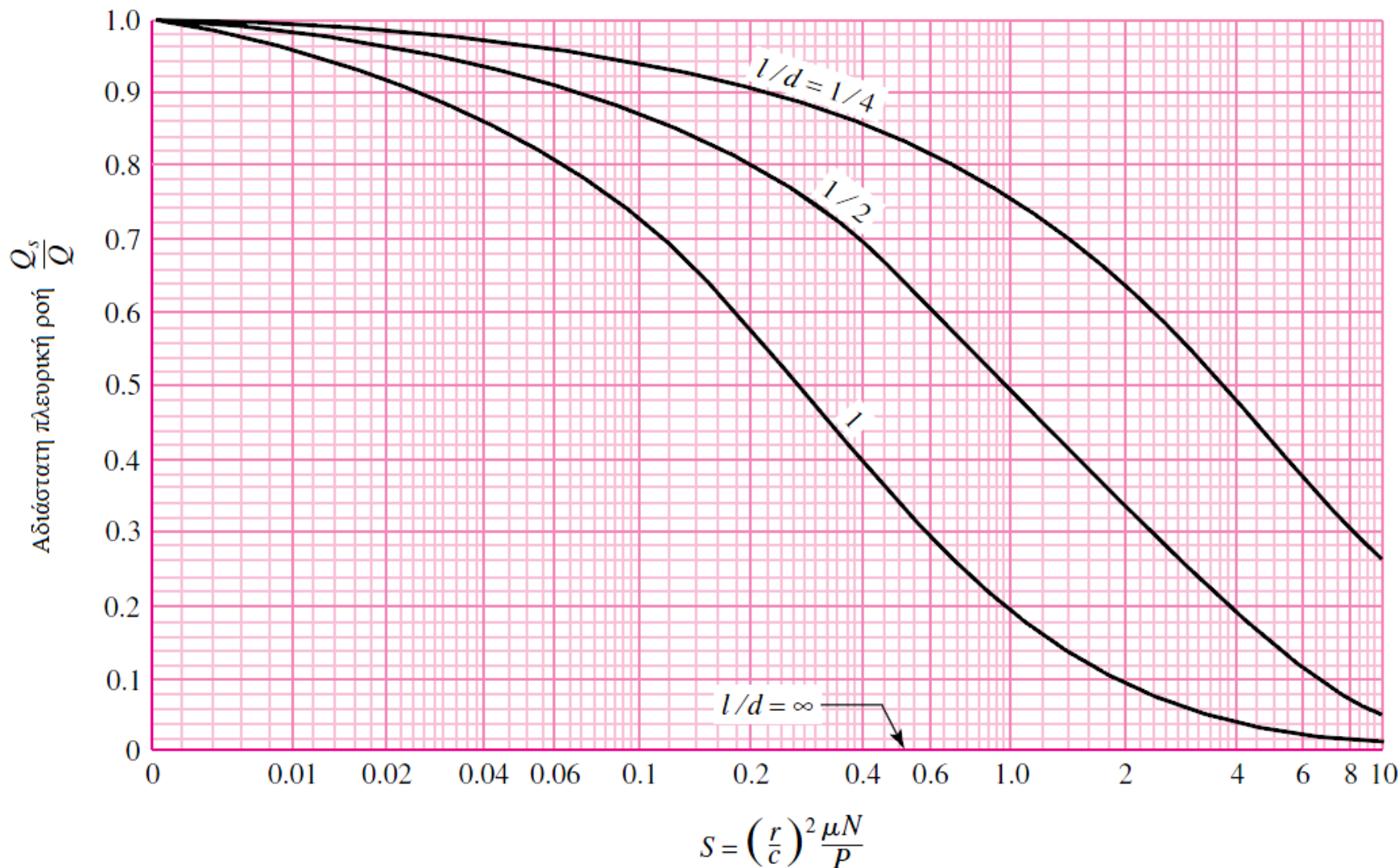
Συντελεστής Τριβής



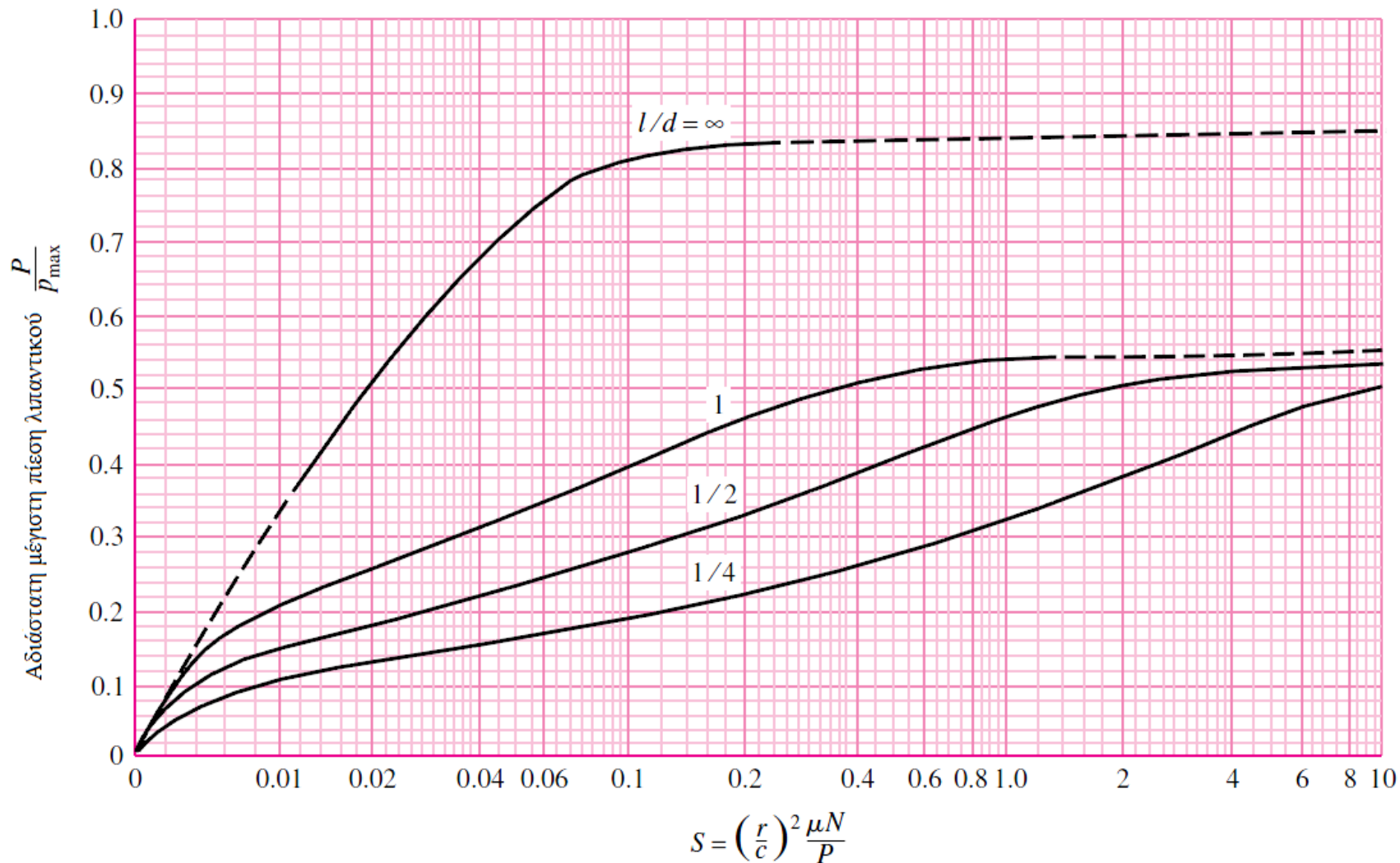
Ροή Λιπαντικού



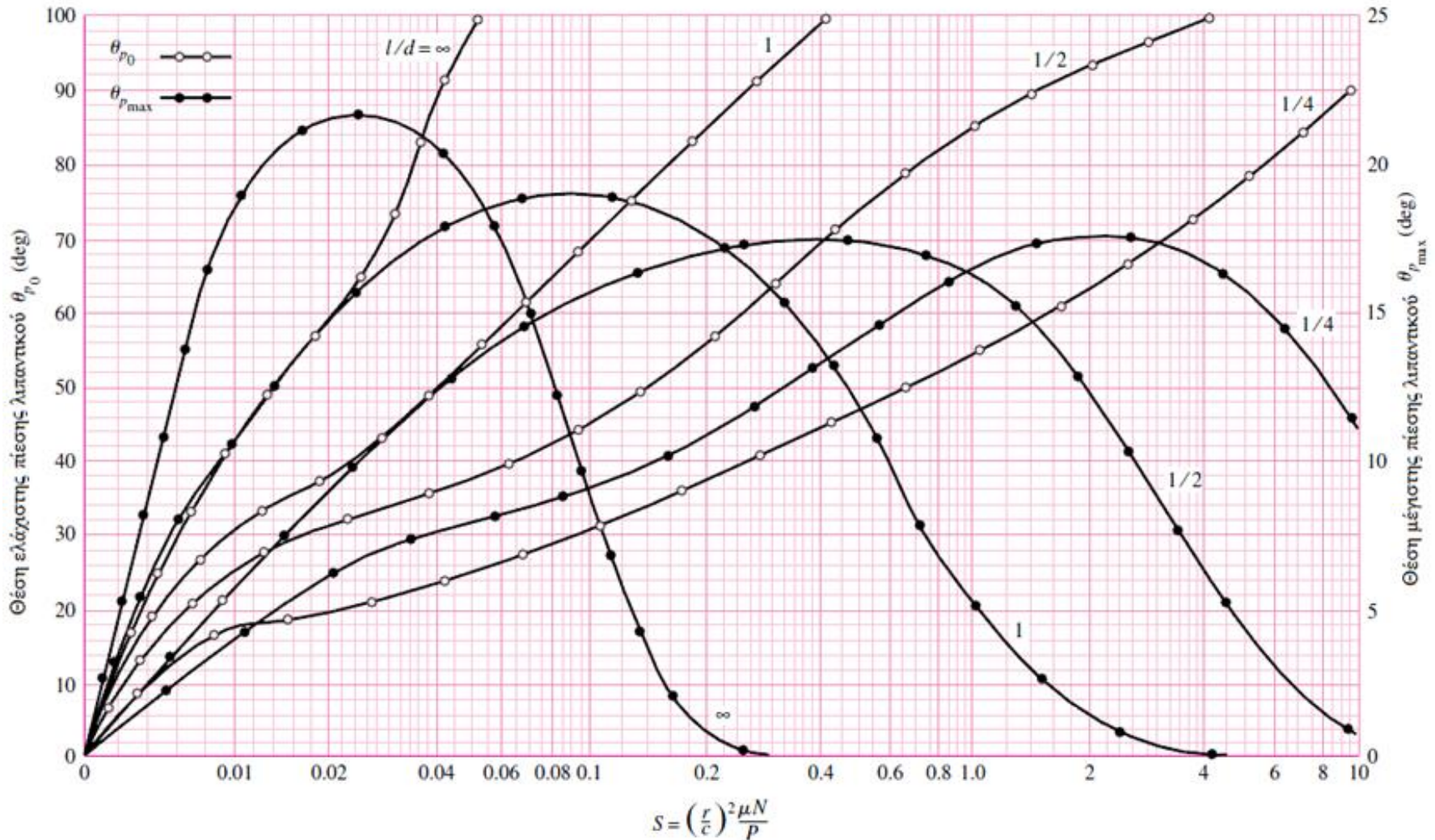
Πλευρική Ροή Λιπαντικού



Μέγιστη Πίεση Λιπαντικού



Θέση Ελάχιστης & Μέγιστης Πίεσης Λιπαντικού



Αύξηση Θερμοκρασίας Λιπαντικού

Για κοινά πετρελαιοειδή λάδια:

$$\Delta T_{c^{\circ}} = \frac{8.30 P_{MPa}}{[1 - 0.5(Q_s / Q)]} \frac{(r / c) f}{(Q / rcNl)}$$

Άσκηση 8.1

Ένα πλήρες έδρανο ολίσθησης έχει διάμετρο 30mm και $l/d = 1$. Το φορτίο του εδράνου είναι 1440N και ο άξονας περιστρέφεται στις 1200 rpm. Αν η ακτινική χάρη είναι 20 μ m και μια μέση τιμή για το ιξώδες είναι 50mPa·S, να βρείτε το ελάχιστο πάχος του λιπαντικού, τις απώλειες ισχύος και την πλευρική ροή λιπαντικού.

Άσκηση 8.2

Ένα κυλινδρικό έδρανο ολίσθησης έχει διάμετρο 80mm, λόγο $l/d = 1$ και λειτουργεί στις 8rev/S. Χρησιμοποιείται λιπαντικό SAE 30 σε θερμοκρασία εισόδου 60°C. Το ακτινικό φορτίο είναι 3000N και η ακτινική χάρη είναι 40μm. Να προσδιορίσετε την αύξηση της θερμοκρασίας στο έδρανο, το ελάχιστο πάχος λιπαντικού, το σημείο ισορροπίας του άξονα στο έδρανο, τις απώλειες ισχύος και την πλευρική ροή του λιπαντικού.

Άσκηση 8.3

Για ένα έδρανο δίνονται τα ακόλουθα στοιχεία: Λιπαντικό SAE 30, θερμοκρασία λειτουργίας 65°C στροφές 1800rpm , ακτίνα στροφέα $r = 20\text{ mm}$, διάκενο $c = 0.04\text{ mm}$ και μήκος εδράνου $l = 40\text{ mm}$. Να βρεθούν τα υπόλοιπα στοιχεία του εδράνου, αν το φορτίο του είναι $W = 2200\text{ N}$.

Άσκηση 8.4

Ένα έδρανο ολίσθησης με λάδι λειτουργεί σε καθαρό αέρα. Η διάμετρος του άξονα είναι $d = 7.62\text{cm}$ και το μήκος του επίσης $l = 7.62\text{cm}$. Το έδρανο υποβάλλεται σε φορτίο $W = 454.5\text{kp}$ και ο άξονας περιστρέφεται με $N = 500\text{rpm}$. Η ακτινική χάρη είναι $c = 6.35 \times 10^{-3}\text{cm}$, το λάδι είναι SAE 30 και η θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_\alpha = 26.6^\circ\text{C}$. Βρείτε το ιξώδες του λαδιού.

Υδροστατική Λίπανση

Τα υδροστατικά έδρανα μπορούν να λειτουργήσουν με ελάχιστη ή καθόλου σχετική εφαπτομενική κίνηση με μεγάλο πάχος φιλμ λιπαντικού. Οι επιφάνειες έδρασης διαχωρίζονται μέσω της παροχής ρευστού (υγρού ή αέριου) υπό πίεση στη διεπαφή, χρησιμοποιώντας εξωτερική πηγή πίεσης (αντλία), παρέχοντας υψηλή δυσκαμψία και απόσβεση.

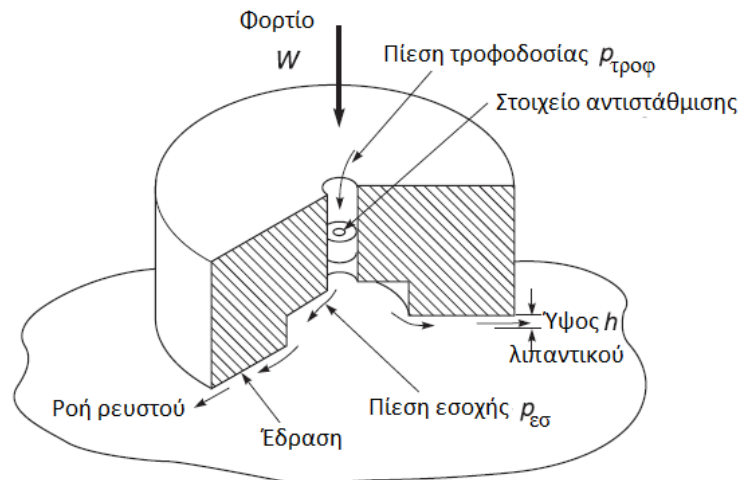
Δεν υπάρχει φυσική επαφή κατά τη διάρκεια εκκίνησης και απενεργοποίησης όπως στην υδροδυναμική λίπανση.

Τα υδροστατικά έδρανα παρέχουν υψηλή απόδοση και ικανότητα φόρτισης σε χαμηλές ταχύτητες και επομένως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν λειτουργία με υψηλά φορτία και χαμηλές ταχύτητες, όπως σε μεγάλα τηλεσκόπια και μονάδες παρακολούθησης ραντάρ.

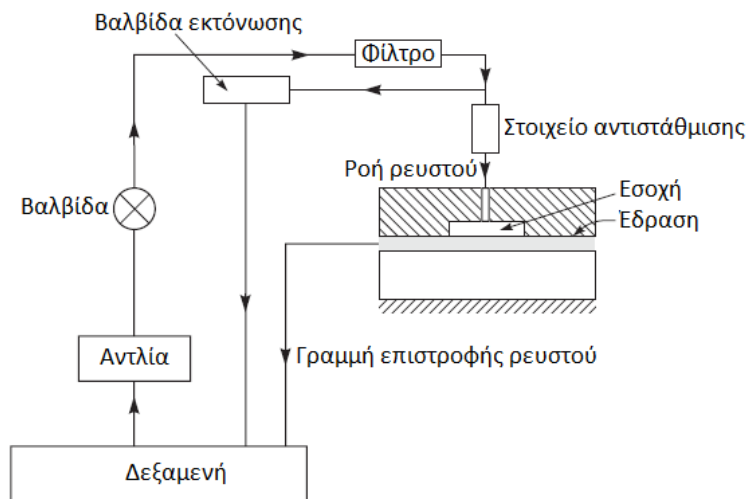
Η υψηλή δυσκαμψία και η απόσβεση αυτών των εδράνων παρέχει επίσης υψηλή ακρίβεια όταν τοποθετούνται και σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και μικρού φορτίου, όπως σε εργαλειομηχανές, οδοντιατρικά τρυπάνια υψηλής ταχύτητας, γυροσκόπια και υπερφυγοκεντρητές.

Ωστόσο, το σύστημα λίπανσης στα υδροστατικά έδρανα είναι πιο περίπλοκο από ότι στα υδροδυναμικά έδρανα. Τα υδροστατικά έδρανα απαιτούν αντλίες υψηλής πίεσης και εξοπλισμό για τον καθαρισμό ρευστών γεγονός που οδηγεί σε μεγάλες απαιτήσεις χώρου και κόστους.

Υδροστατικό ωστικό έδρανο κυκλικού σχήματος και συστήματος παροχής λιπαντικού



(a)



Υπολογισμοί υδροστατικού ωστικού κυκλικού εδράνου

$$\frac{\text{Πίεση}}{\text{Πίεση εσοχής}} : \frac{p}{p_{\epsilon\sigma}} = \frac{\ln(r_0/r)}{\ln(r_0/r_i)}$$

$$\text{Ακτινική παροχή λιπαντικού ανά μονάδα περιμέτρου: } q = \frac{h^3 p_{\epsilon\sigma}}{12 \eta r \ln(r_0/r_i)}$$

$$\text{Συνολική παροχή: } Q = 2 \pi r q$$

$$\text{Πίεση έδρασης (στο φιλμ λιπαντικού): } p = \frac{6 \eta Q}{\pi h^3} \ln(r_0/r)$$

$$\text{Κάθετο φορτίο: } W = \frac{\pi p_{\epsilon\sigma} (r_0^2 - r_i^2)}{2 \ln(r_0/r_i)}$$

$$\text{Κάθετο φορτίο: } W = \frac{3 \eta Q}{h^3} (r_0^2 - r_i^2)$$

$$\text{Δυσκαμψία φιλμ λιπαντικού: } k = -\frac{3W}{h}$$

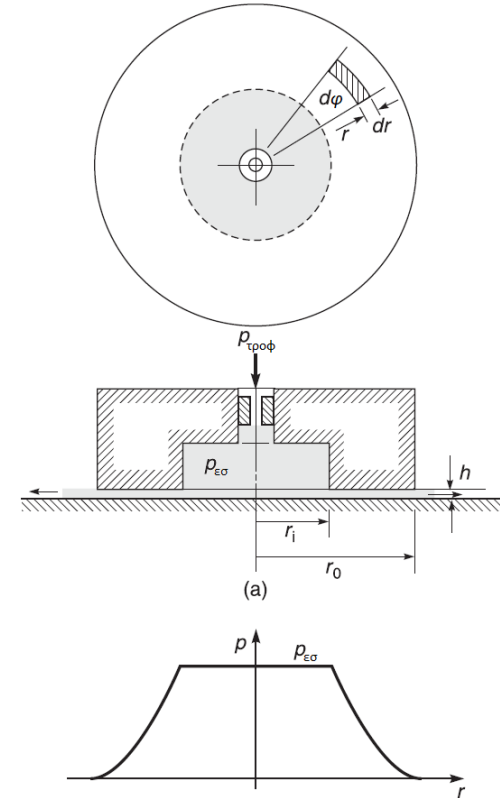
$$\text{Ροπή τριβής: } M = \frac{\pi \eta \omega}{2 h} (r_0^4 - r_i^4)$$

$$\text{Ισχύς απωλειών τριβής: } P_{\tau} = M \omega$$

$$\text{Ισχύς απωλειών άντλησης: } P_{\alpha} = p_{\epsilon\sigma} Q$$

$$\text{Συνολική ισχύς απωλειών } P_{\text{ολ}} = P_{\tau} + P_{\alpha} = \frac{\pi \eta \omega^2}{2 h} (r_0^4 - r_i^4) + \frac{\pi h^3 p_{\epsilon\sigma}^2}{6 \eta \ln(r_0/r_i)}$$

$$\text{Αύξηση θερμοκρασίας } \Delta\theta = \frac{P_{\text{ολ}}}{Q \rho c_p}$$



r : ακτίνα

r_0 : εξωτερική ακτίνα κυκλικού εδράνου

r_i : εσωτερική ακτίνα κυκλικού εδράνου

η : ιξώδες

h : πάχος φιλμ λιπαντικού έδρασης

C_p : ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση

ρ : πυκνότητα λιπαντικού

ω : γωνιακή ταχύτητα

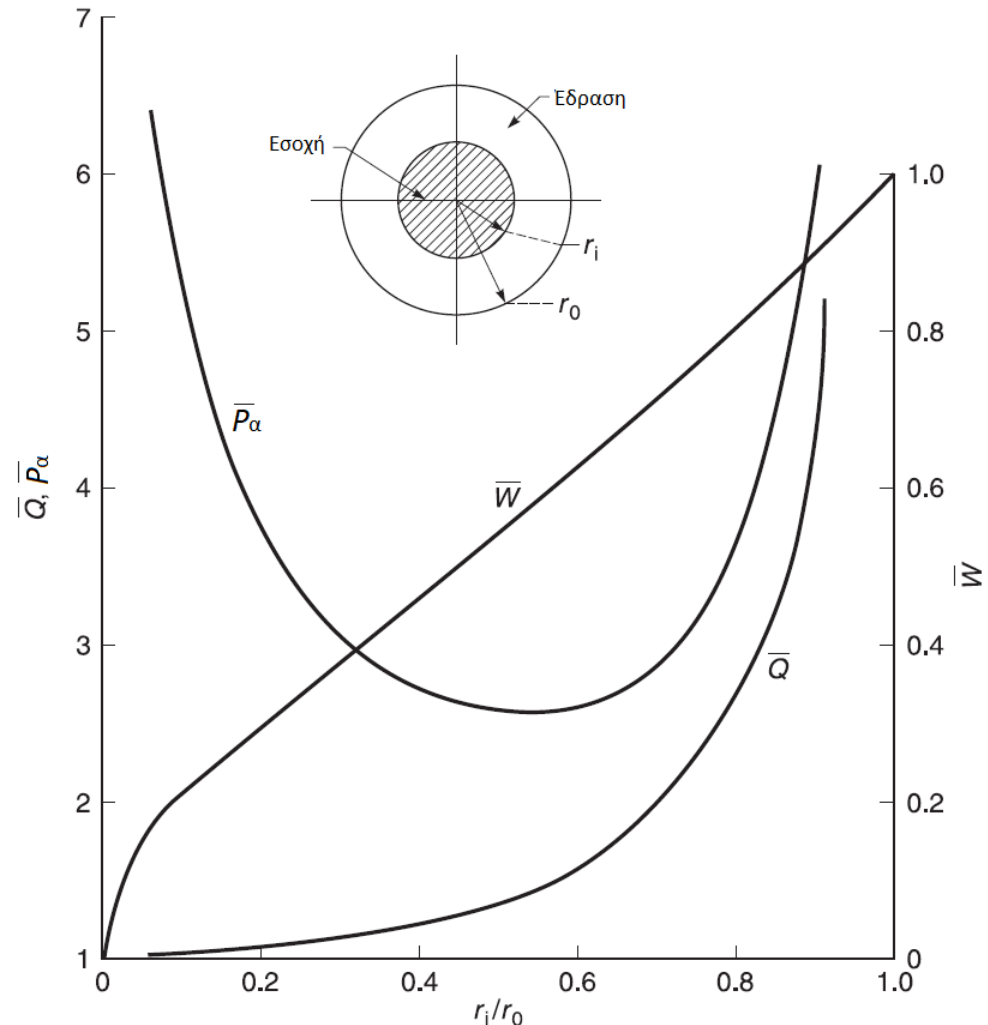
Υπολογισμοί των αδιάστατων μεγεθών υδροστατικού ωστικού κυκλικού εδράνου

Συνολική επιφάνεια έδρασης: $A = \pi r_0^2$

$$\bar{W} = \frac{W}{A p_r} = \frac{1 - (r_i/r_0)^2}{2 \ln(r_0/r_i)}$$

$$\bar{Q} = \frac{Q}{(W/A)(h^3/\eta)} = \frac{\pi}{3 [1 - (r_i/r_0)^2]}$$

$$\bar{P}_\alpha = \frac{P_\alpha}{(W/A)^2 (h^3/\eta)} = \frac{2\pi \ln(r_0/r_i)}{3 [1 - (r_i/r_0)^2]^2}$$



Άσκηση 8.5

Ένα υδροστατικό ωστικό έδρανο κυκλικού σχήματος έχει εξωτερική διάμετρο 400mm και διάμετρο εσοχής 250mm.

(α) Υπολογίστε την πίεση της εσοχής για φορτίο ώσης 100.000N.

(β) Υπολογίστε την παροχή του λιπαντικού για να διατηρηθεί το πάχος του φιλμ στα 150μm αν το ιξώδες του λιπαντικού είναι 30cP.

(γ) Υπολογίστε την δυσκαμψία του φιλμ πάχους λειτουργίας 150μm και για εφαρμοζόμενο φορτίο 100.000N.

(δ) Υπολογίστε τις απώλειες άντλησης και την αύξηση της θερμοκρασίας του λιπαντικού. Η πυκνότητα του λιπαντικού είναι 880 kg/m^3 και η ειδική θερμότητά του είναι $1,88 \text{ J/g K}$.