

Ρευστομηχανική

Εισαγωγικές έννοιες

Διδάσκων: Αντώνης Σακελλάριος

Email: ansakel13@gmail.com

Phone: 2651007837

Ώρες Γραφείου Διδάσκοντα: καθημερινά 14:00 –
17:00, Εργαστήριο MEDLAB, Ιατρική Σχολή

Περιεχόμενα μαθήματος

- Εισαγωγή
 - Βασικές έννοιες, συνεχές μέσο, είδη, μονάδες διαστάσεις Φυσικών μεγεθών, ιδιότητες, είδη ροής, σύστημα /όγκος ελέγχου
- Κινηματική
 - Πεδία, υλικές και χωρικές συντεταγμένες, Θεώρηση κατά Lagrange / Euler, Χρονικές παράγωγοι
 - Ταχύτητα επιτάχυνση, ρυθμός ροής, παράσταση πεδίου ροής, είδη ροής
 - Ροϊκή συνάρτηση
- Δυνάμεις
 - Τάση/ ιξώδης τάση, επιφανειακές δυνάμεις και πίεση σε ηρεμία, παραμόρφωση
- Νευτώνικα και μη νευτώνικα υγρά
 - Νομός ιξώδους, μη νευτώνικα ρευστά
- Μακροσκοπική ανάλυση ροής
 - Θεώρημα μεταφοράς, μακροσκοπική Εξίσωση συνέχειας, ορμής ενέργειας, μηχανική ενέργεια
- Διαφορική ανάλυση ροής
 - Οριακές συνθήκες, διαφορική Εξίσωση συνέχειας, ορμής ενέργειας, μηχανική ενέργεια
- Διαστατική ανάλυση και Ομοιότητα
 - Θεώρημα Π, αδιάστατες ομάδες, συνήθεις αριθμοί και φυσική σημασία, ομοιότητα και βασικές αρχές
- Άτριβη ροή
 - Αστρόβιλη ροή, εξισώσεις Euler και Bernoulli, πίεση, γραμμές ενέργειας και υδραυλικές γραμμές, δυναμική συνάρτηση
- Τυρβώδης ροή και οριακό στρώμα
- Ροή σε αγωγούς

- • Βιβλιογραφία
- Θ. Άγγελου Παπαϊωάννου «Μηχανική των Ρευστών»
- F. M. White “Fluid Mechanics”, McGraw Hill, 7th Edition, 2009.

Σκοποί ενότητας

Γενικές έννοιες και ορισμοί

- Το ρευστό ως συνεχές μέσο (Μηχανική του Συνεχούς Μέσου).
- Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ρευστών
- Νευτώνεια ρευστά- Μη Νευτώνεια ρευστά – Ιδανικά ρευστά.

Εισαγωγή

- Η **Μηχανική των Ρευστών** ή **Ρευστομηχανική** ή και **Δυναμική των Ρευστών** είναι η επιστήμη που ασχολείται με την ισορροπία και την κίνηση των ρευστών, δηλ. των υγρών και των αερίων.
- Η ουσία του αντικειμένου της Ρευστομηχανικής, δηλ. της ροής των ρευστών, είναι ένας συνεχής συγκερασμός μεταξύ θεωρίας και πειράματος.
- Η θεωρία δεν είναι αποτελεσματική μερικές φορές ως προσέγγιση προβλημάτων Ρευστομηχανικής.

Εισαγωγή

- Ρευστομηχανική ή Μηχανική Ρευστών
 - Ο κλάδος της μηχανική που ασχολείται με την κατανόηση πρόβλεψη και τον έλεγχο της συμπεριφοράς των ρευστών
 - Ρευστά σε ηρεμία
 - Στατική Ρευστών
 - Ρευστά σε κίνηση
 - Δυναμική Ρευστών

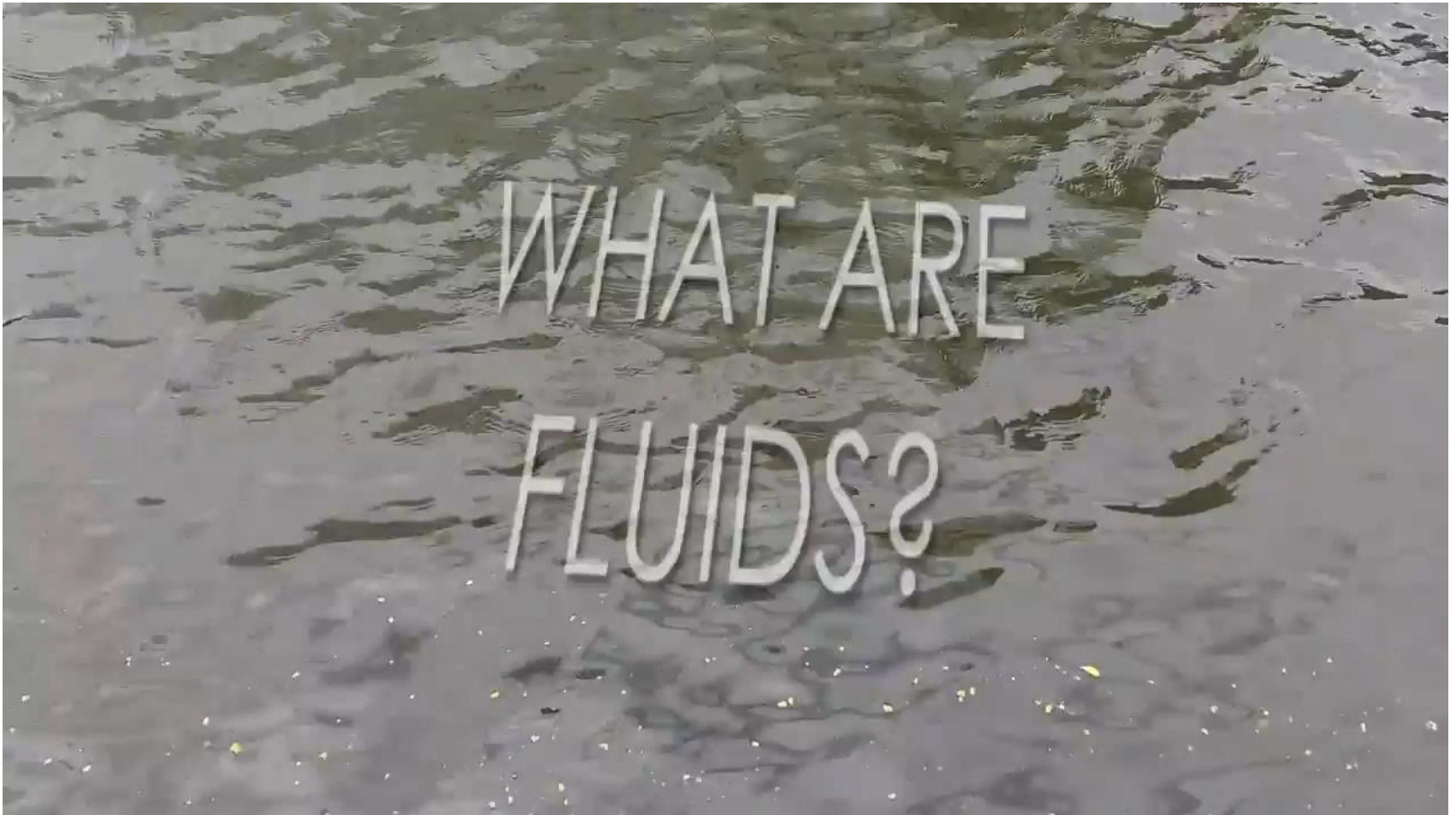
Εισαγωγή

- Τα δύο κύρια εμπόδια για μια άμεση εφαρμόσιμη θεωρία είναι η *γεωμετρία* της ροής και η ιδιότητα των ρευστών η *γνωστή ως συνεκτικότητα*.
- Η γενική θεωρία της ροής των ρευστών είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα με οποιαδήποτε γεωμετρία και έτσι η βιβλιογραφία συνήθως αναφέρεται κύρια σε απλές γεωμετρίες ροής.
- Το δεύτερο εμπόδιο για την θεωρητική προσέγγιση είναι η δράση της συνεκτικότητας που μπορεί να αγνοηθεί μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις.

Εισαγωγή

- Τι είναι ρευστό;
 - Ρευστό είναι το υλικό σώμα που παραμορφώνεται συνεχώς υπό την επίδραση διατμητικής τάσης
 - Το ρευστό αποτελείται από μόρια τυχαία κατανεμημένα στο χώρο που συγκρατούνται από ασθενείς δυνάμεις συνοχής και από εξωτερικές δυνάμεις (π.χ. από τα τοιχώματα του δοχείου)
 - Ρευστά υπάρχουν σε αέρια και υγρή μορφή

Τι είναι το ρευστό;



Ρευστομηχανική

Η ρευστομηχανική έχει τεράστιο εύρος εφαρμογών

- Αεροδυναμική
- Εμβιομηχανική –Βιολογικά συστήματα
- Καύση (σχεδιασμός μηχανών εσωτερικής καύσης)
- Παραγωγή και μετατροπή ενέργειας (π.χ. στροβιλομηχανές)
- Γεωλογία
- Υδραυλική και δίκτυα σωληνώσεων (μεταφορά νερού, φυσικού αερίου, πετρελαίου ...)

Διαχείριση υδάτινων πόρων

- Υδροδυναμική
- Μετεωρολογία
- Θαλάσσια και παράκτια μηχανική
- Υδατικοί πόροι

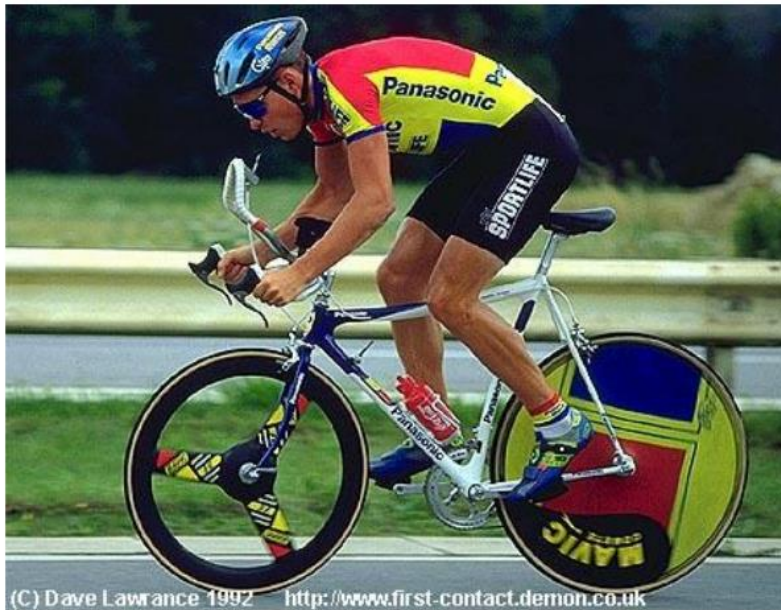
Αεροδυναμική



Dryden Flight Research Center ECN-4243 Photographed 1974
747 wake vortex research with smoke generators. A
Learjet and T-37 Cessna fly through the wake. NASA photo

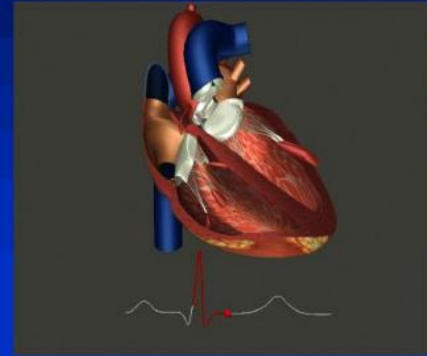




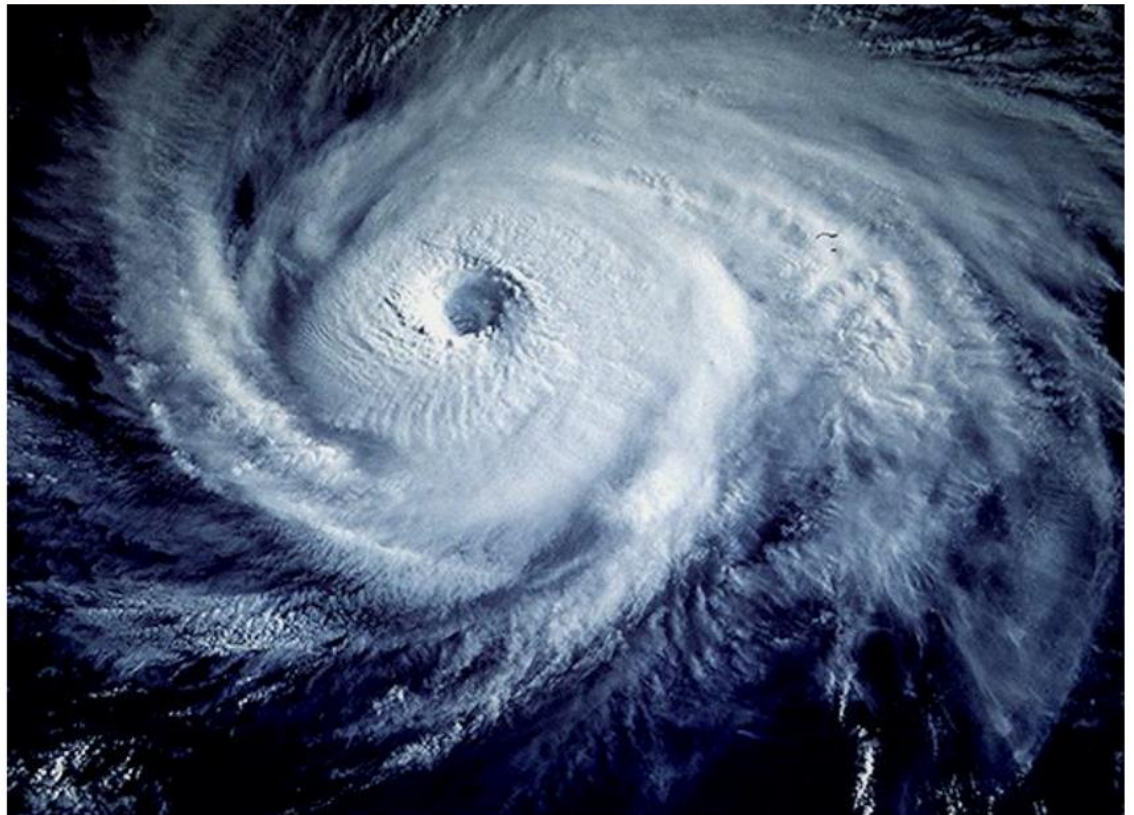




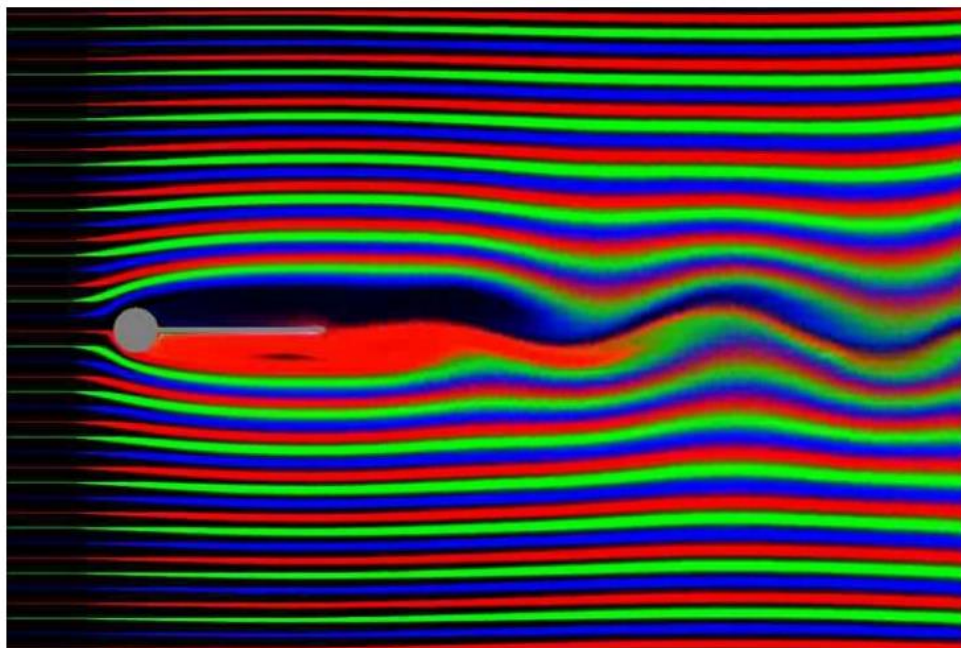
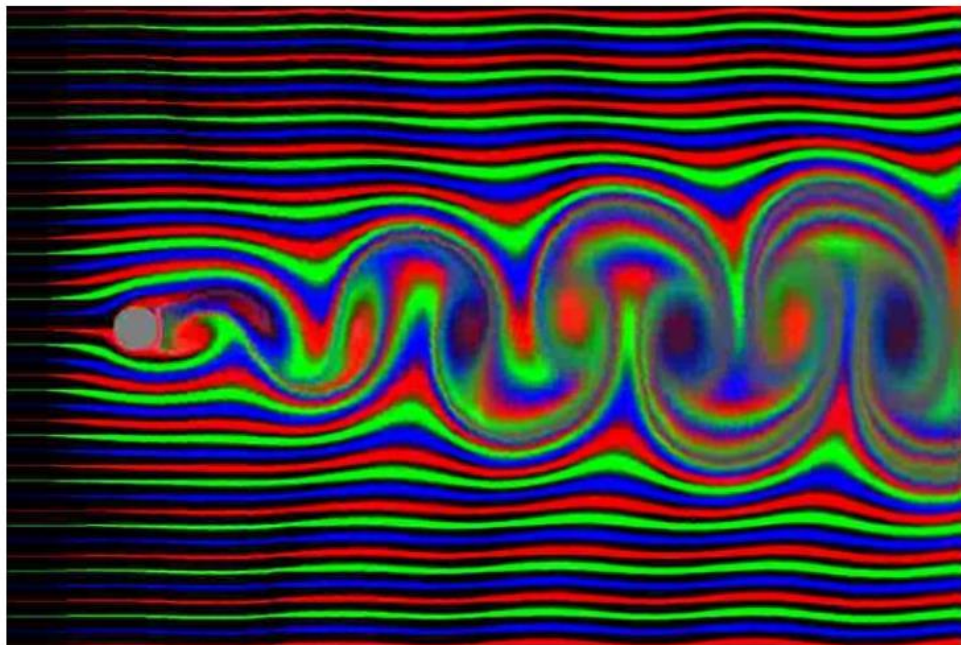
Human Heart

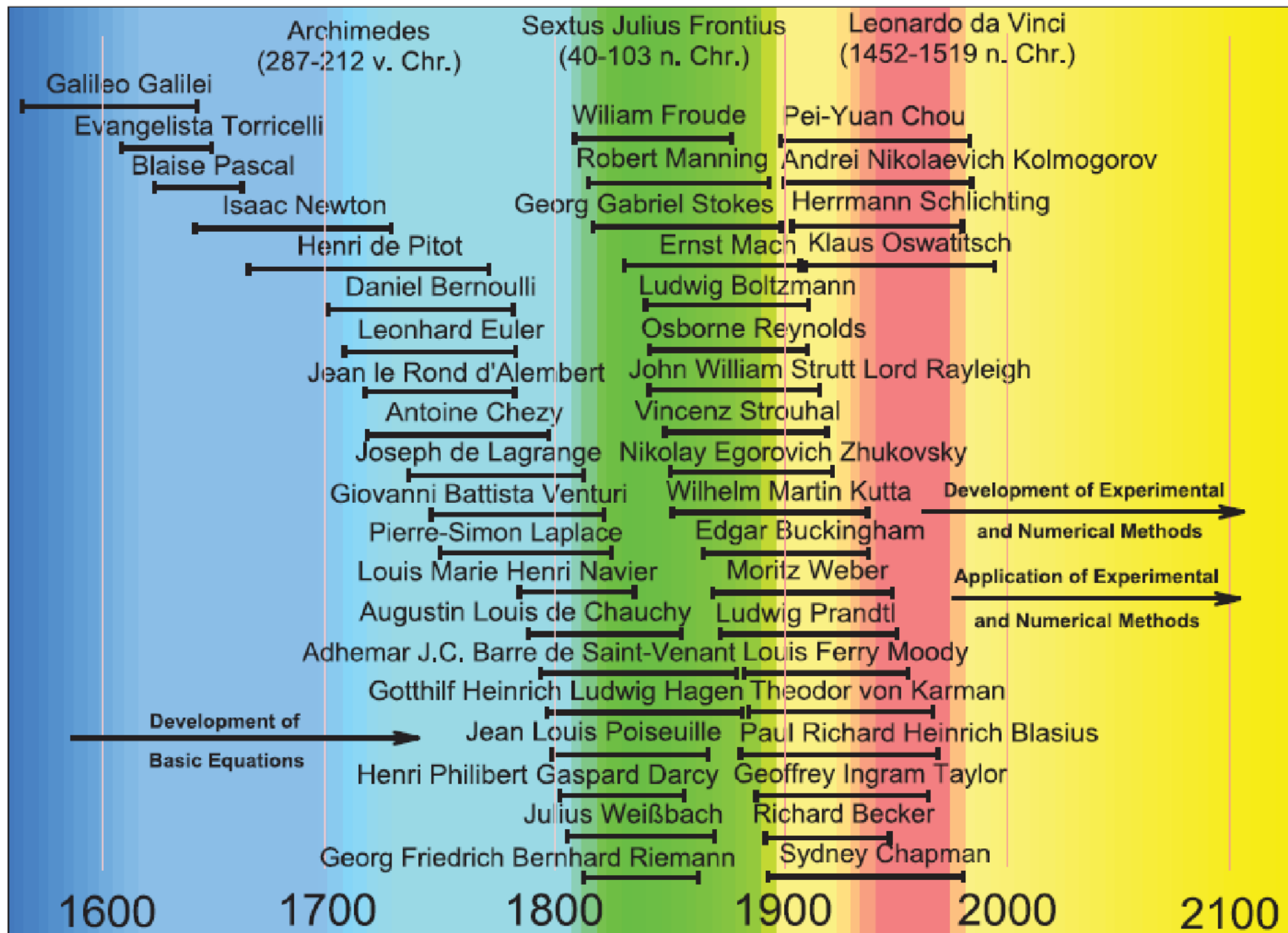


A BVS blood pump



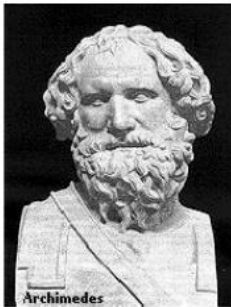






The Greatest Minds of Fluid Mechanics

- Faces of Fluid Mechanics : some of the greatest minds of history have tried to solve the mysteries of fluid mechanics



Archimedes



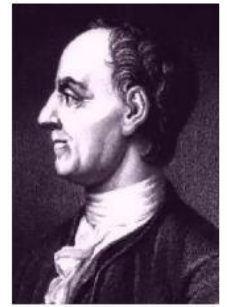
Da Vinci



Newton



Leibniz



Euler



Bernoulli



Navier



Stokes

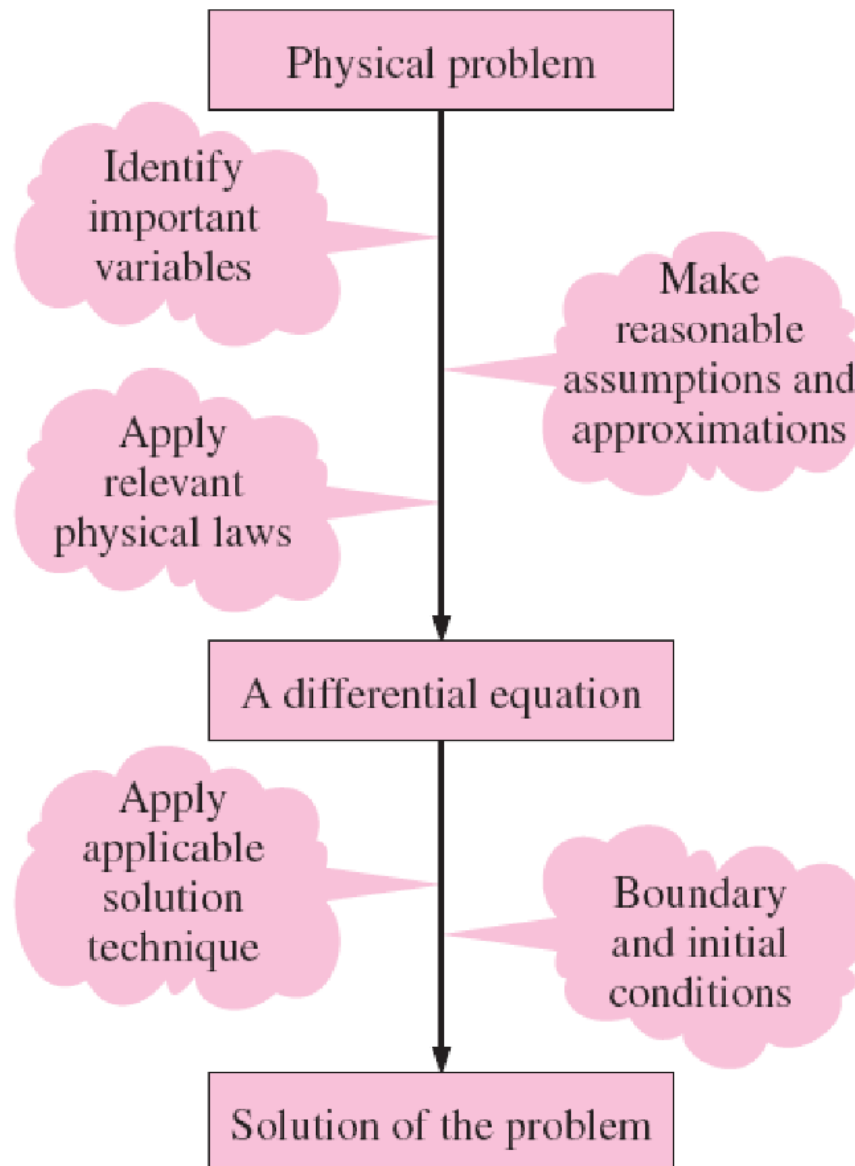


Reynolds



Prandtl

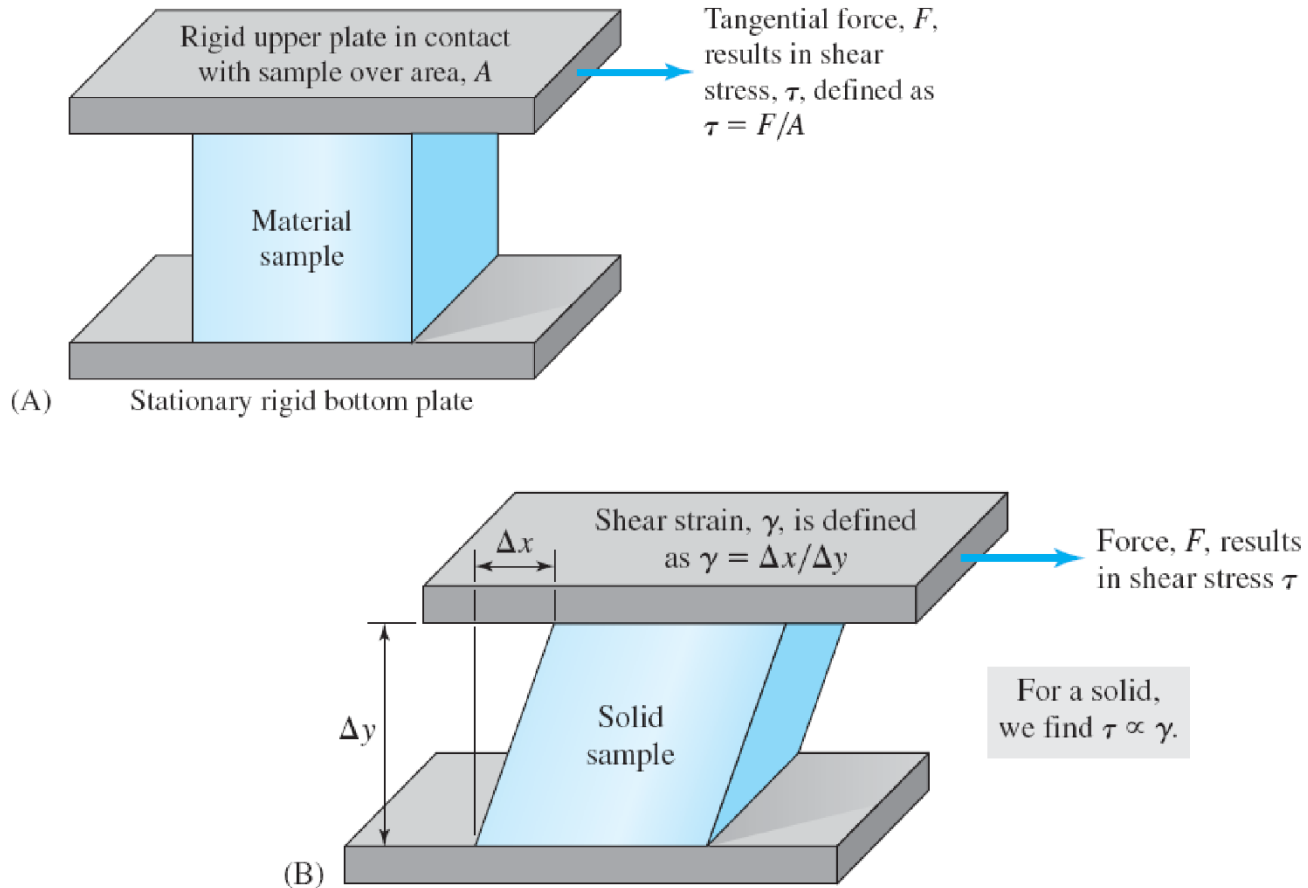
Μοντελοποίηση Φυσικών Συστημάτων



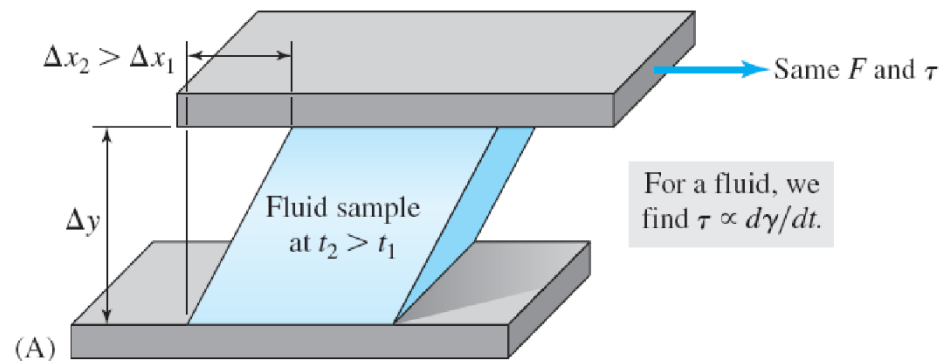
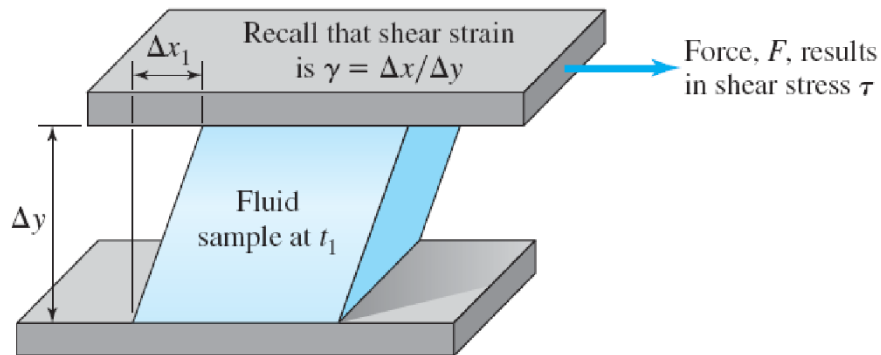
Αλγόριθμος

Βήμα	Αναλυτική Προσέγγιση	Αριθμητική προσέγγιση
1	Διατύπωση προβλήματος/ γεωμετρίας (διαστάσεις παράμετροι)	
2	Υποθέσεις, προσεγγίσεις, απλοποιήσεις και οριακές συνθήκες	
3	Απλοποίηση ΜΔΕ	Διακριτοποίηση ΜΔΕ
4	Ολοκλήρωση	Επίλυση αλγεβρικού συστήματος με συνυπολογισμό των οριακών συνθηκών
5	Εφαρμογή οριακών συνθηκών για τον προσδιορισμό σταθερών	
6	Επαλήθευση	Επαλήθευση

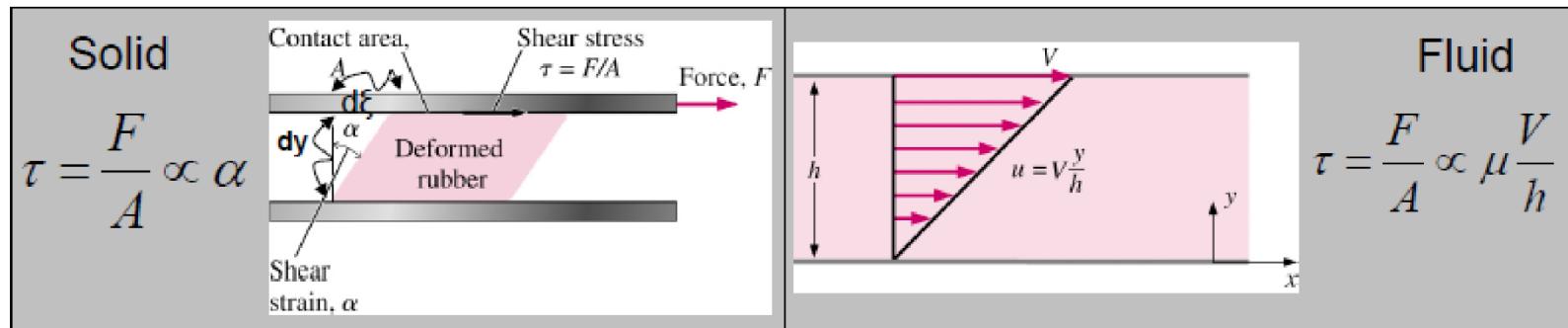
Στερεά vs Ρευστά



Στερεά vs Ρευστά



Στερεά vs Ρευστά



ξ : μετατόπιση στην x διεύθυνση

$$\tau = G\alpha = G \frac{\xi + \frac{\partial \xi}{\partial y} dy - \xi}{dy} = G \frac{\partial \xi}{\partial y} = G \tan a \approx Ga$$

G : μέτρο διάτμησης a : παραμόρφωση

u : ταχύτητα στην x διεύθυνση

$$\tau = \mu \dot{\alpha} = G \frac{u + \frac{\partial u}{\partial y} dy - u}{dy} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \frac{d}{dt} (\tan a) \approx \mu \dot{a}$$

μ : ιξώδες $\dot{a}$: ρυθμός παραμόρφωσης

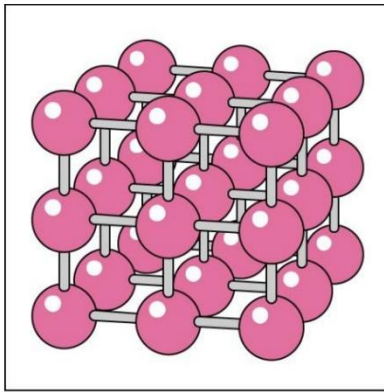
- Τα στερεά σώματα αντέχουν την εφαρμοζόμενη διάτμηση παραμορφούμενα και μετακινούμενα σε νέα θέση ισορροπίας – Η τάση είναι συνήθως ανάλογη της παταμορφωσης (νόμος Hook)
- Τα υγρά δεν αντέχουν την εφαρμοζόμενη διάτμηση και συνεχίζουν να παραμορφώνονται όσο ασκείται η διάτμηση- Η τάση είναι συνήθως ανάλογη του ρυθμού παραμόρφωσης (Νευτώνικά ρευστά)

Στερεό – Υγρό – Αέριο

Στερεά

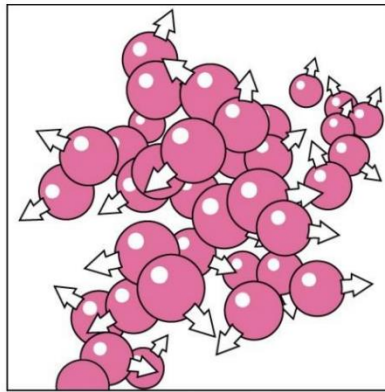
Ρευστά

Υγρά Αέρια



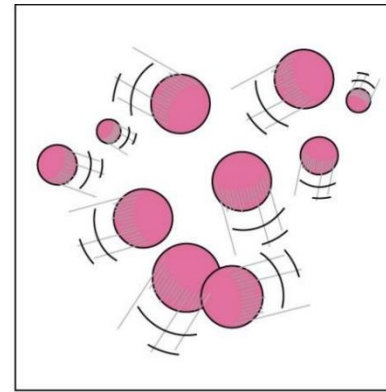
(a)

Στερεό



(b)

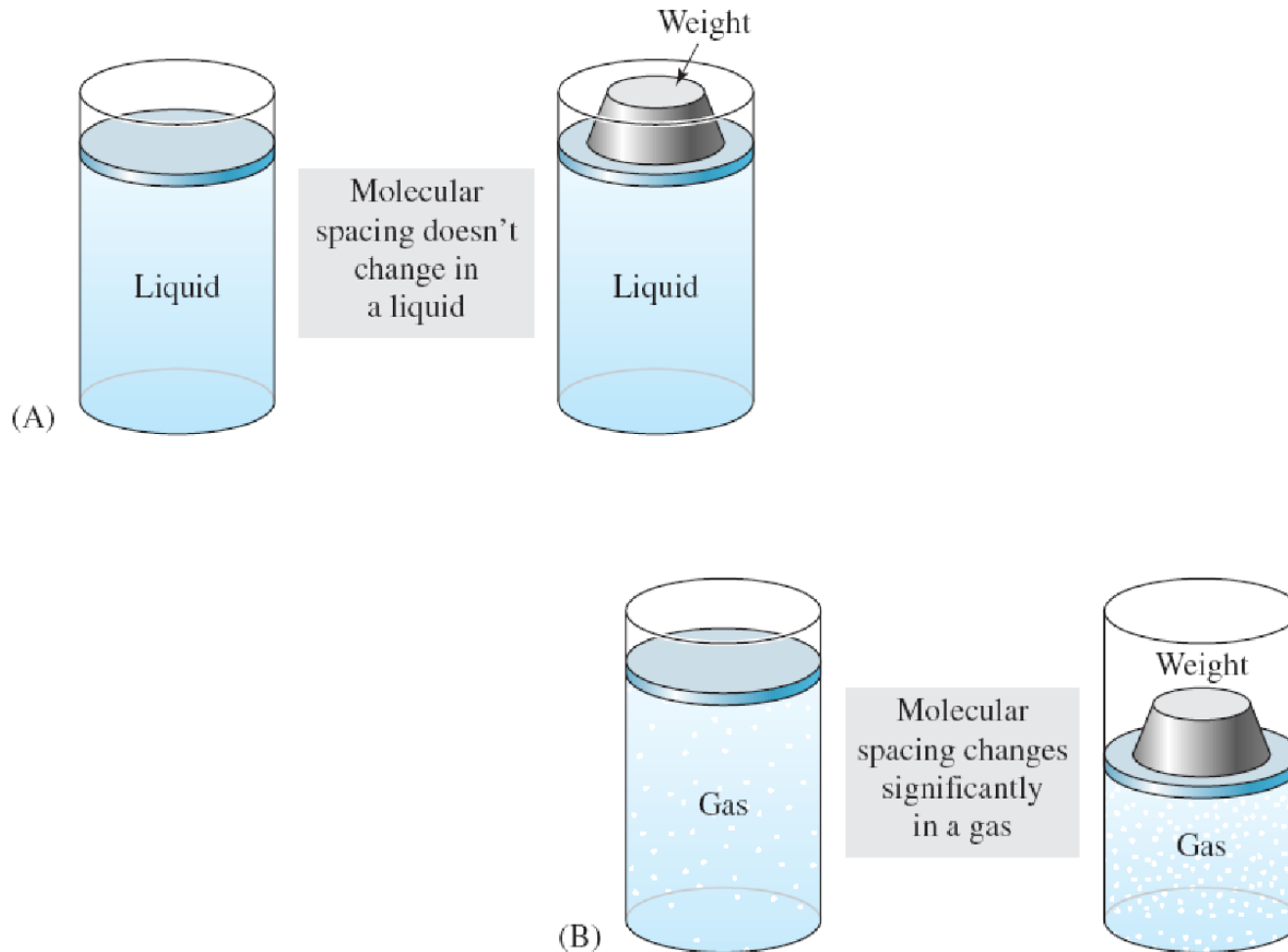
Υγρό



(c)

Αέριο

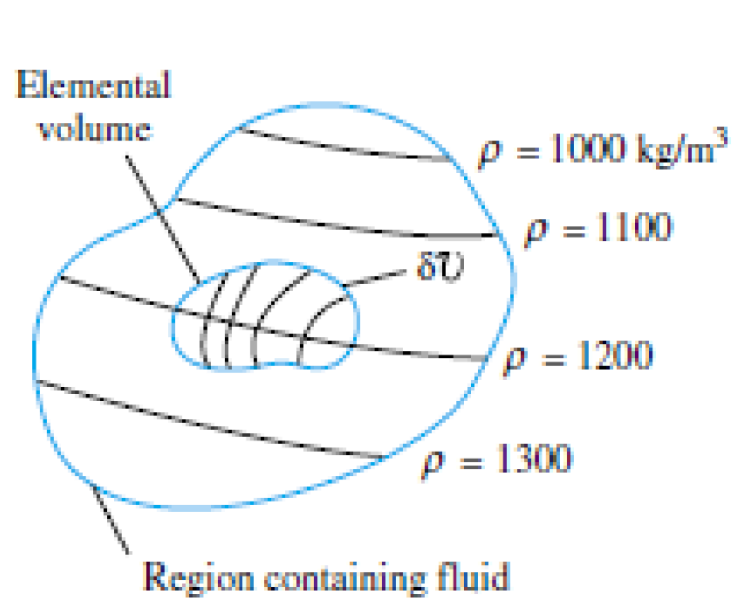
Υγρό – Αέριο



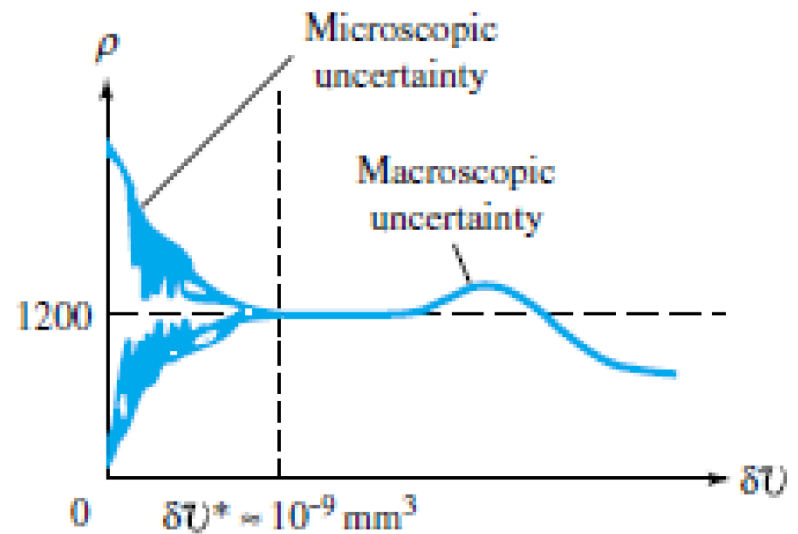
Στερεό – Υγρό – Αέριο

	Fluids		
Characteristic	Solids (crystalline)	Liquids	Gases
Response to a shear stress, τ	$\tau = G\gamma$ (resists deformation)	$\tau = \mu(d\gamma/dt) = \mu(du/dy)$ (resists rate of deformation)	
Distance between adjacent molecules	Smallest	Small	Large
Molecular arrangement	Ordered	Semiordered (short-range order only)	Random
Strength of molecular interaction	Strong	Intermediate	Weak
Ability to conform to the shape of a container	No	Yes	Yes
Capacity to expand without limit	No	No	Yes
Able to exhibit a free surface	Yes	Yes	No
Able to resist a small tensile stress	Yes	Theoretically yes, practically no	No
Compressibility	Essentially zero	Virtually incompressible	Highly compressible

Το συνεχές μέσο

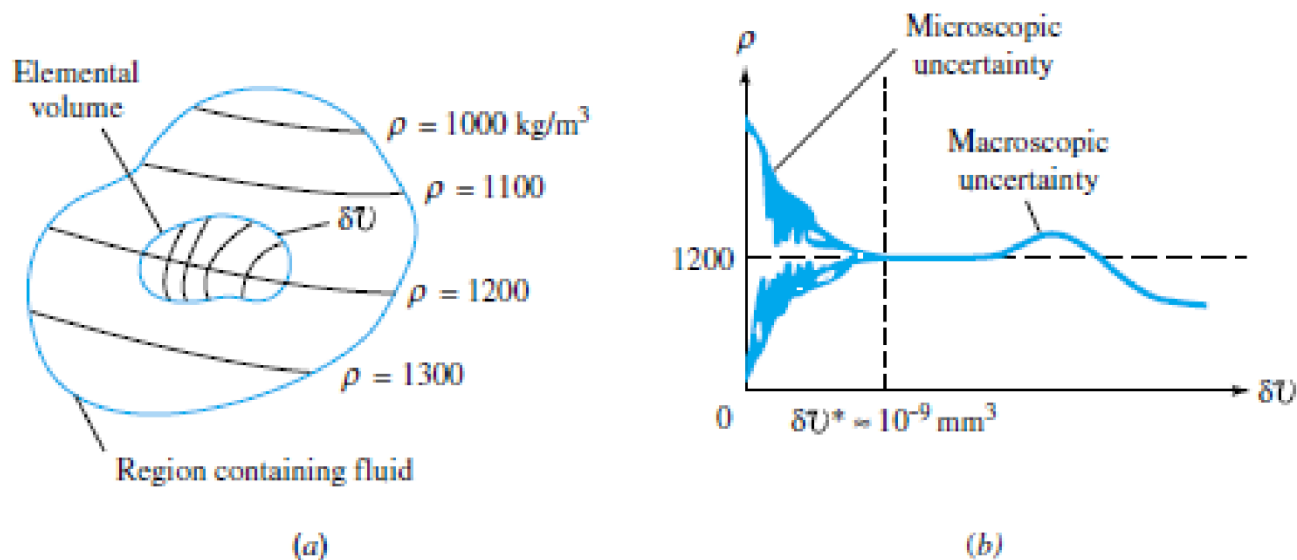


(a)



(b)

Το συνεχές μέσο



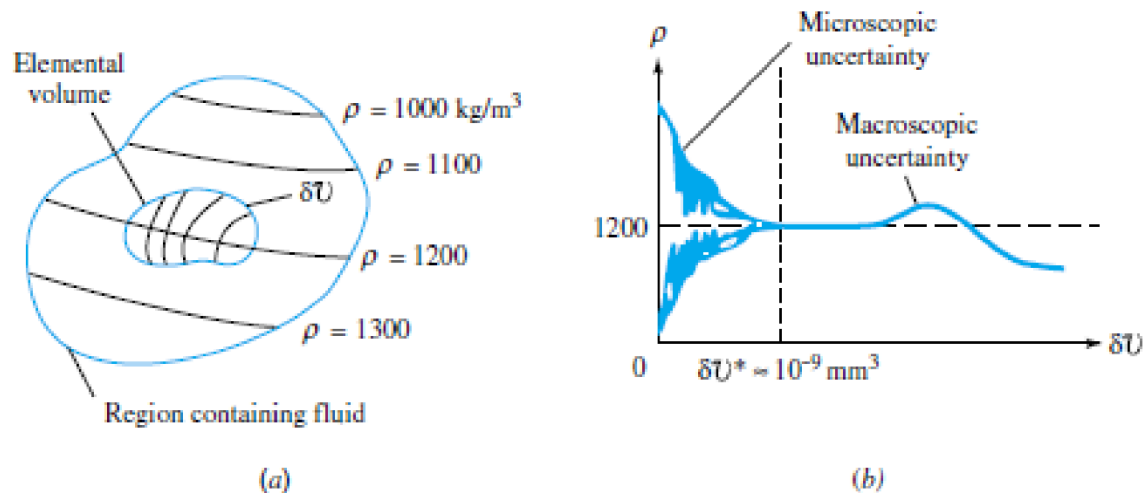
$$\rho \equiv \lim_{\delta V \rightarrow \delta V^*} \frac{\delta m}{\delta V}, \quad \delta V^* \approx 10^{-9} \text{ mm}^3 \rightarrow \delta x^* \approx 10^{-3} \text{ mm} = 1 \mu\text{m}$$

δV^* είναι μικρό αλλά όχι 0 λόγω της ασυνέχειας της ύλης

$\delta V \gg \delta V^*$: μακροσκοπικές μεταβολές της πυκνότητας

$\delta V \ll \delta V^*$: μεταβολές της πυκνότητας λόγω τυχαιότητας
σε μοριακό επίπεδο

Το συνεχές μέσο



- Το δV^* πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να εμπεριέχει ικανό αριθμό μορίων για να ληφθούν μέσες τιμές, και αρκετά μικρότερο από το μέγεθος του ροϊκού πεδίου που εξετάζουμε, $\lambda \ll \delta x^* \ll L$

λ : μέση ελεύθερη διαδρομή μορίων ρευστού

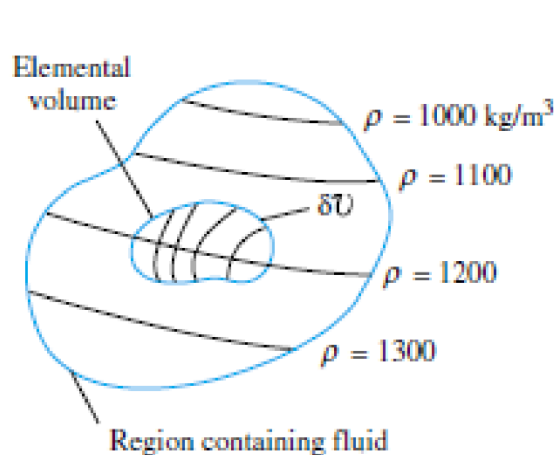
L : χαρακτηριστικό μήκος ροϊκού πεδίου υπό εξέταση

Στον αέρα όγκος δV^* εμπεριέχει 3×10^7 μόρια ενώ η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι $\lambda \approx 6 \times 10^{-5} \text{ mm}$

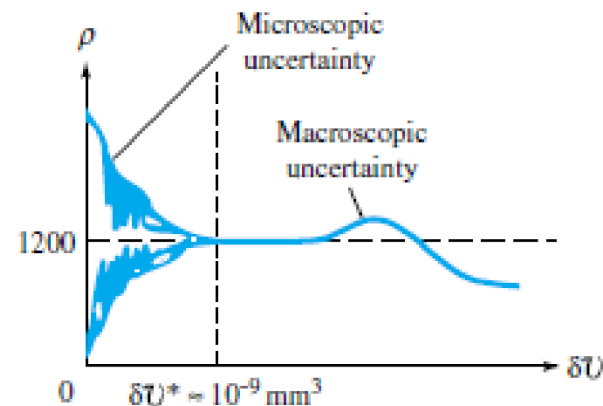
Υπό αυτές τις συνθήκες μπορούμε να μιλάμε για συνεχές μέσο και να μεταχειριζόμαστε τις ιδιότητες της ύλης ως συνεχείς συναρτήσεις του χώρου

Το ρευστό ως συνεχές μέσο

- Η τιμή της ιδιότητας του ρευστού ταυτίζεται με τη μέση στατιστική τιμή της ιδιότητας σε μια φυσική περιοχή του όγκου δV_0 που θεωρούμε ότι αποτελεί το *σωματίδιο του Ρευστού*

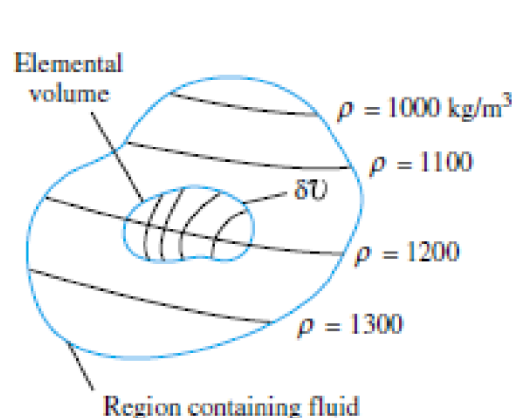


(a)

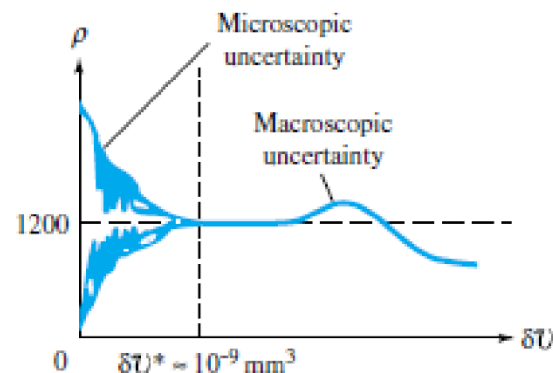


(b)

Ισχύει παντού η υπόθεση του συνεχούς μέσου;



(a)



(b)

- Σε εφαρμογές της νανοτεχνολογίας το L είναι πολύ μικρό, $\lambda \sim L$, οπότε δεν ισχύει η υπόθεση συνεχούς μέσου
- Για μελέτη ροής στα απώτατα στρώματα της ατμόσφαιρας $\lambda \sim 1 \text{ m}$ και συνεπώς πάλι $\lambda \sim L$ και δεν ισχύει η υπόθεση συνεχούς μέσου (π.χ. πρόβλημα επαναφοράς διαστημικών οχημάτων στην γήινη ατμόσφαιρα)

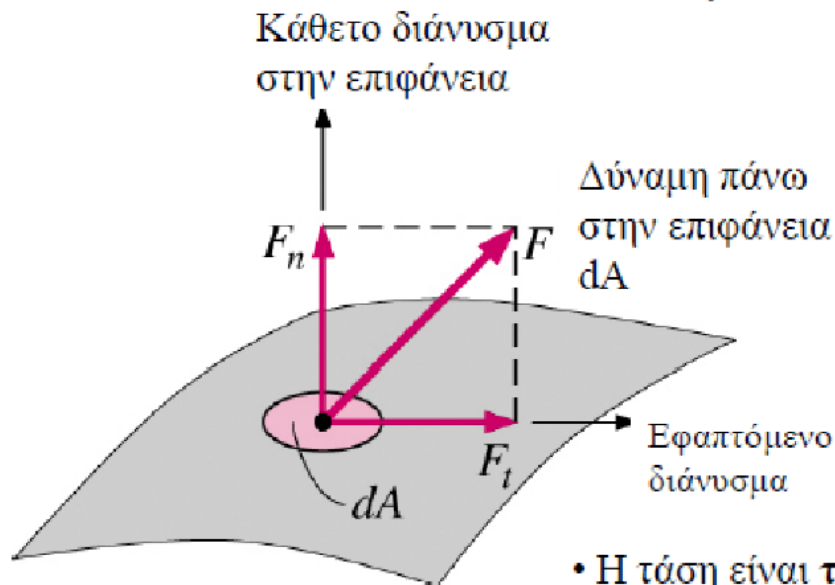
Είδη/ μονάδες / Διαστάσεις

- Είδη μεγεθών
 - Βαθμωτό: ορίζεται από τη τιμή και τη μονάδα του
 - Ανυσματικό: ορίζεται από τη τιμή, τη μονάδα τη διεύθυνση και τη φορά
 - Τανυστής 2^{ης} τάξης: γραμμικός συνδυασμός δυάδων (διατεταγμένα ζεύγη ανυσμάτων που παραμένουν διακεκριμένα)

Είδη/ μονάδες / Διαστάσεις

- Συνιστώσες μεγεθών στον Ευκλείδειο χώρο τριών διαστάσεων:
 - Βαθμωτό: μία
 - Ανυσματικό: τρείς
 - Τανυστής 2^{ης} τάξης: εννέα

Φύση των Τάσεων



- Η τάση είναι το πηλίκο της δύναμης προς την επιφάνεια που την υφίσταται
- Η δύναμη και η επιφάνεια είναι **διανυσματικές ποσότητες** και συνεπώς ο ορισμός της τάσης δεν είναι προφανής

$$\tau = \lim_{|\delta \vec{A}| \rightarrow 0} \frac{\delta \vec{F}}{\delta \vec{A}} \rightarrow \tau : \text{τανυστής 2ης τάξης}$$

$$\delta \vec{A} = \|\delta \vec{A}\| \vec{n} \quad \vec{n} : \text{κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια}$$

- Η τάση είναι **τανυστής 2ης τάξης**
- Η δύναμη πάνω σε μια επιφάνεια μπορεί να αναλυθεί στην κάθετη και στην εφαπτομενική συνιστώσα ως προς την επιφάνεια

Για ρευστό που ηρεμεί υπάρχουν μόνο η κάθετη τάση η οποία ταυτίζεται με την πίεση του ρευστού

Η πίεση είναι το ιστροπικό κομμάτι του τανυστή των τάσεων και μπορεί να θεωρηθεί και ως **βαθμωτό μέγεθος**

Η εμφάνιση εφαπτομενικών τάσεων, ή αλλιώς διατμητικών, προϋποθέτει την ύπαρξη βαθμίδας ταχύτητας

Συστήματα Μονάδων και Διαστάσεις Φυσικής Ποσότητας

- Κάθε φυσική ποσότητα χαρακτηρίζεται από διαστάσεις – Το μέτρο κάθε φυσικής ποσότητας λέγεται μονάδα και είναι διαφορετικό αναλόγως του συστήματος μονάδων που χρησιμοποιούμε
- Οι ποσότητες που μελετάμε χαρακτηρίζονται από 4 βασικές διαστάσεις: μήκος L , χρόνο T , μάζα M και θερμοκρασία Θ .
- Οι δευτερογενείς διαστάσεις μπορούν να σχηματισθούν με βάση τις πρωταρχικές: π.χ. ταχύτητα u σε m/s και διάσταση MT^{-1} , όγκος V σε m^3 και διάσταση L^3 και ενέργεια E σε $Nm=kg\ m^2/s^2$ και διάσταση $M\ L^2T^{-2}$.
- Υπάρχουν διάφορα συστήματα μονάδων

Κύρια Διάσταση	Διεθνές SI	Αγγλικό BG	CGS
Μάζα (M)	Kilogram (kg)	slug	Gram (gr)
Μήκος (L)	Meter (m)	Foot (ft)	Centimeter (cm)
Χρόνος (T)	Second (s)	Second (s)	Second (s)
Θερμοκρασία (Θ)	Kelvin (K)	Rankine ($^{\circ}R$)	

Διάσταση	SI	BG	CGS
Μάζα (M)	Kilogram kg	1 slug=14.594 kg	1 gr=10 ⁻³ kg
Μήκος (L)	Meter m	1 ft=0.305 m	1 cm=10 ⁻² m
Χρόνος (T)	Second s	1 s = 1 s	1 s=1 s
Θερμοκρασία (Θ)	Kelvin K	1.8°R=1K °R=°F+459.69	°C+273=K
Δύναμη (F)	Newton, N=kg m/s ²	1 lbf=1 slug 1 ft/s ² =4.45 N	1 gr cm ² /s ² = 1 dyne=10 ⁻⁵ N
Πίεση (P)	Pascal, Pa=N/m ²	1 lbf/ft ² =47.88 Pa	
Ενέργεια (P)	Joule, J=N m	1 lbf ft=1.3558 J	1 erg=10 ⁻⁷ J

- Η διαστατική ομοιογένεια είναι εργαλείο για τον έλεγχο της ορθότητας των παραγόμενων σχέσεων όπου εμπλέκονται διάφορες φυσικές ποσότητες

$$p + \rho \frac{u^2}{2} + \rho g z = \text{Σταθερά}$$

$$\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

Διαστάσεις

Εξίσωση διαστάσεων

- $\{\Phi\}=\{L^a M^b T^c \Theta^d\}$
 - Ποιες είναι οι διαστάσεις τις ταχύτητας;
 - Ποια είναι η διάσταση αδιάστατου μεγέθους;
 - Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε άλλα μεγέθη εκτός των βασικών στην εξίσωση διάστασης;
 - Μπορούν δύο διαφορετικά μεγέθη να έχουν την ίδια διάσταση;

Διαστατική Ομοιογένεια

Παράδειγμα:

Εξίσωση **Darcy–Weisbach**
$$h_f = f_D \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

h_f απώλειες ενέργειας ανά μονάδα βάρους

L μήκος σωλήνα

D υδραυλική διατομή σωλήνα (ταυτίζεται με την πραγματική για κυκλική διατομή)

V μέση ταχύτητα ροής;

g τοπική επιτάχυνση της βαρύτητας;

f_D Συντελεστής τριβής Darcy

Ιδιότητες ρευστών

Κάθε ρευστό χαρακτηρίζεται από μία σειρά ιδιοτήτων όπως η πίεση, P , η θερμοκρασία, T , ο όγκος, V , και η μάζα, M , καθώς και άλλες λιγότερο γνωστές όπως το ιξώδες, μ , η θερμική αγωγιμότητα, k , η επιφανειακή τάση, γ , κτλπ.

Οι ιδιότητες χωρίζονται σε **εντατικές** όπως θερμοκρασία, T , πίεση, P , πυκνότητα, ρ , ιξώδες, μ , θερμική αγωγιμότητα, k , μέτρο ελαστικότητας, E , τάση ατμών, P_v , ο συντελεστής θερμικής διαστολής, β , η επιφανειακή τάση, γ , κτλπ. οι οποίες δεν εξαρτώνται από το μέγεθος του συστήματος

και σε **εκτατικές** των οποίων το μέγεθος εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος όπως ο όγκος, V , η μάζα, M , η ορμή, $\vec{P}$, και η ενέργεια, E , ενός συστήματος.

Από τις εκτατικές ιδιότητες προκύπτουν αντίστοιχες εντατικές, π.χ. ταχύτητα, $\vec{u}$, συγκέντρωση, c , ενέργεια, e , ειδικός όγκος, $v=1/\rho$, που είναι ανοιγμένες στην μονάδα μάζας, π.χ. $e=E/M$.

Ιδιότητες ρευστών

Οι θεμελιώδεις εντατικές ιδιότητες πίεση, θερμοκρασία και πυκνότητα συνδέονται μέσω της καταστατικής σχέσης που παρέχεται από την θερμοδυναμική ανάλυση κάθε ρευστού. Π.χ ο καταστατικός νόμος των τελείων αερίων ισχύει για τα περισσότερα αέρια σε σχετικά χαμηλές πιέσεις και υψηλές θερμοκρασίες

$$PV = nR^*T \rightarrow P = \rho RT \qquad \frac{P}{P_a} = (B+1) \left(\frac{\rho}{\rho_a} \right)^n - B(T), \quad \text{για υγρά}$$

Τα υγρά και τα πυκνά αέρια έχουν συμπεριφορά που αποκλίνει από την ιδανική αλλά περιγράφονται από άλλους πιο περίπλοκους καταστατικούς νόμους

Πυκνότητα

$$\rho \equiv \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V}$$

Ποια είναι η διάσταση της Πυκνότητας;

Ο ειδικός όγκος είναι ο αντίστροφος της πυκνότητας $v=1/\rho$

Πυκνότητα και τα Παράγωγά της

Η πυκνότητα ορίζεται ως ο λόγος της μάζας προς τον όγκο, $\rho=M/V$, και έχει μονάδες kg/m^3 στο SI

Ο ειδικός όγκος είναι ο αντίστροφος της πυκνότητας $v=1/\rho$

Η πυκνότητα εξαρτάται εν γένει από την πίεση και την θερμοκρασία

Η ειδική βαρύτητα ενός ρευστού ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητάς του προς την πυκνότητα ενός τυπικού ρευστού, νερό για υγρά και αέρας για αέρια σε θερμοκρασία 4 °C, $SG=\rho/\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ ή $SG=\rho/\rho_{\text{air}}$

Το ειδικό βάρος $\gamma=\rho g$ έχει διαστάσεις $\text{kg/m}^2/\text{s}^2=\text{N/m}^3$ και χρησιμοποιείται κυρίως σε στατικές μετρήσεις της πίεσης (g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας)

Τα ρευστά διαστέλλονται όταν $T\uparrow$ ή $P\downarrow$ και συστέλλονται όταν $T\downarrow$ ή $P\uparrow$

Χρειάζεται η συσχέτιση μεταβολών όγκου με μεταβολές της πίεσης και της θερμοκρασίας

Από την θερμοδυναμική έχουμε $dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T dP$

Μέτρο συμπιεστότητας : $k = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T = \rho \left(\frac{-1}{\partial P / \partial v} \right)_T = \rho \left(\frac{-1}{\frac{\partial P}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial v}} \right) = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T$

Συντελεστής κυβικής διαστολής : $\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P$

■ Μεταβολές πυκνότητας λόγω μεταβολών της πίεσης - Συμπιεστικότητα

k: συμπιεστικότητα 1/Pa,

E: μέτρο ελαστικότητας

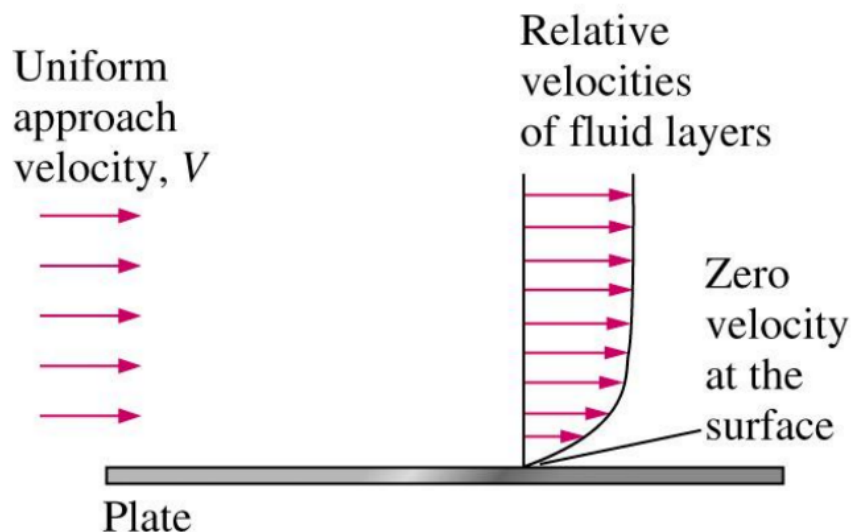
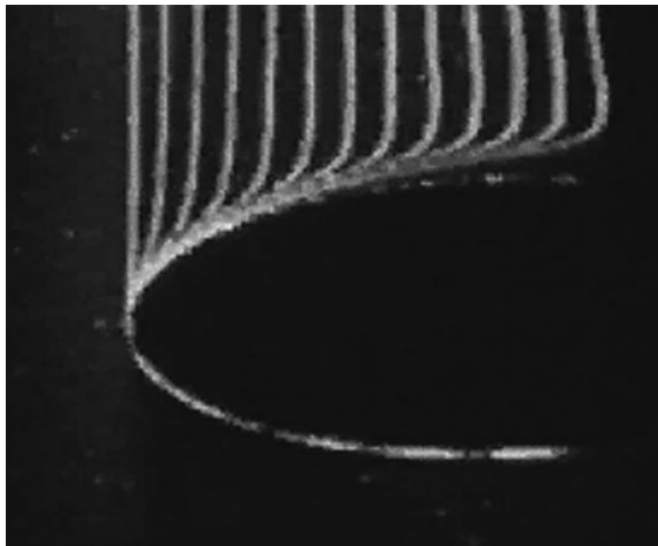
$$k = \frac{1}{E} = \frac{1}{\rho} \left. \frac{\partial \rho}{\partial p} \right|_T$$

Ενδεικτικές τιμές για 1 atm και 20 °C : $k_{\text{νερό}} = 455 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$, $k_{\text{χάλυβας}} = 588 \times 10^{-14} \text{ Pa}^{-1}$

$k_{\text{αέρα}} = 966 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$

Για ιδανικά αέρια $P = \rho RT$ και συνεπώς $k = \frac{1}{\rho} \left. \frac{\partial \rho}{\partial P} \right|_T = \frac{1}{\rho RT} = \frac{1}{P} \frac{P_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}}} \rightarrow k = 9.9 \times 10^{-6}$

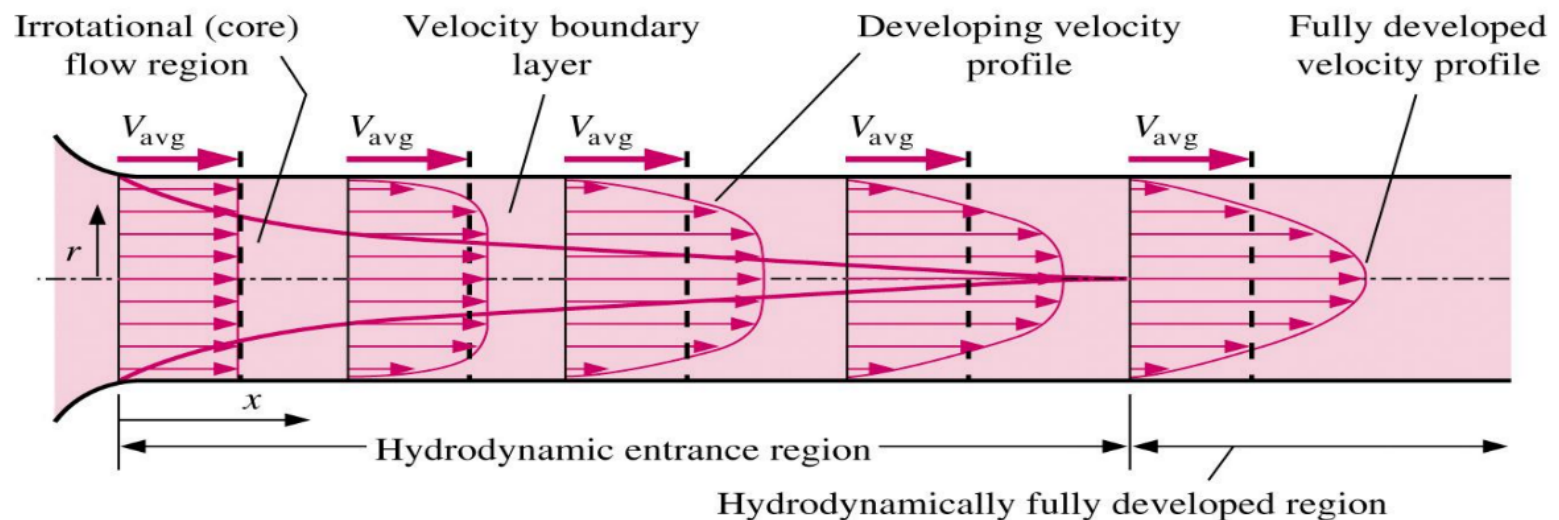
Συνθήκη μη ολίσθησης



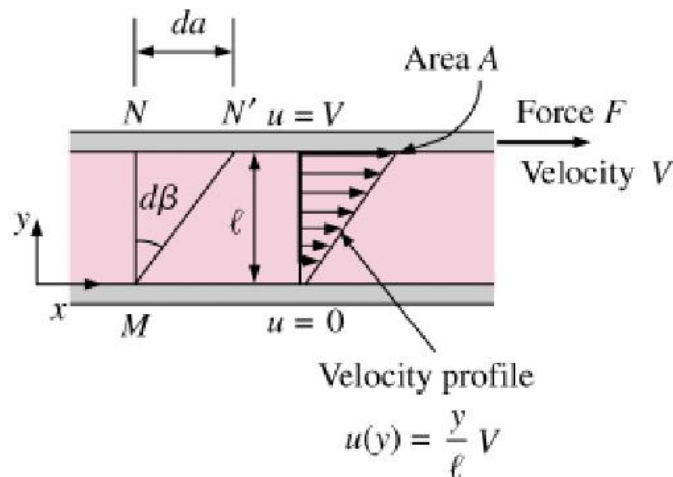
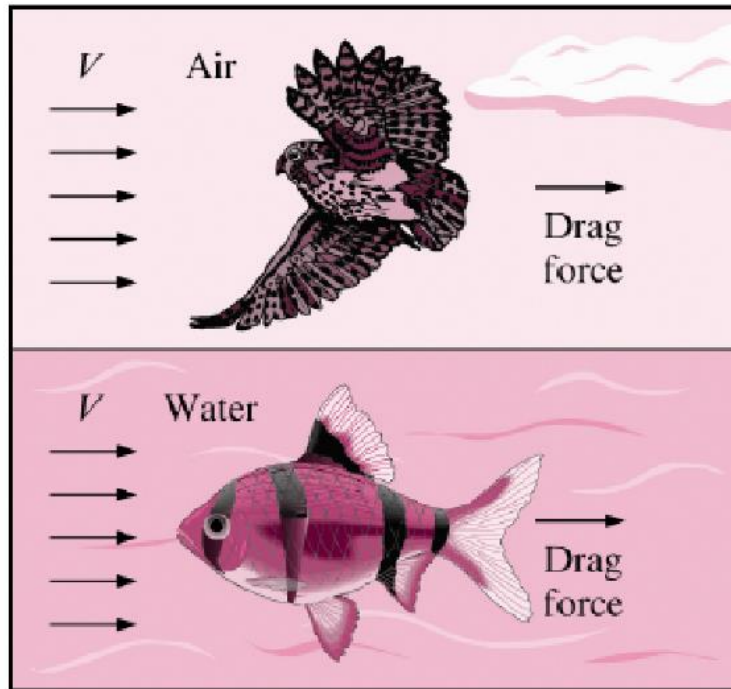
- Λόγω ιξώδους το ρευστό «προσκολλάται» στην επιφάνεια με την οποία έρχεται σε επαφή
- Η ύπαρξη ιξώδους είναι απαραίτητη προϋπόθεση
- Το ιξώδες προκαλεί τη διατμητική τάση τ_w , την δύναμη οπισθέλκουσας $D = \int \tau_w dA$, και την ανάπτυξη οριακού στρώματος
- Η συνθήκη αποτελεί τη αρχική οριακή συνθήκη (IBVP) για την επίλυση των προβλημάτων ροής

Οριακό στρώμα

- Όταν το ρευστό έρχεται σε επαφή με το (ακίνητο) στερεό η ταχύτητά του μηδενίζεται.
- Η ταχύτητα κυμαίνεται από μηδέν στη επιφάνεια του στερεού μέχρι την ταχύτητα ελεύθερης ροής αρκετά μακριά από την επιφάνεια
- Η περιοχή όπου η βαθμίδα της ταχύτητας είναι σημαντική αποκαλείται οριακό στρώμα.
- Το οριακό στρώμα είναι συνέπεια της συνθήκης μη ολίσθησης.



Ιξώδες



- Ιξώδες είναι η ιδιότητα των ρευστών που χαρακτηρίζει την τάση τους να αντιστέκονται σε κάθε δύναμη που προκαλεί παραμόρφωση
- Η δύναμη την οποία ασκεί ένα κινούμενο ρευστό σε σώμα ευρισκόμενο στην διεύθυνση της κίνησής του λέγεται οπισθέλκουσα δύναμη (drag force) και εξαρτάται μερικώς από το ιξώδες του ρευστού
- Έστω στοιβάδα ρευστού μεταξύ δύο μακρών στερεών πλακών που απέχουν μήκος ℓ μεταξύ τους. Στην πάνω πλάκα ασκείται δύναμη F ανά μονάδα επιφάνειας A του ρευστού που αντιστοιχεί σε τάση $\tau = F/A$. Κάνοντας χρήση της συνθήκης μη ολίσθησης $u(0)=0$ και $u(\ell)=V$ προκύπτει προφίλ ταχυτήτων μέσα στο ρευστό $u(y)=Vy/\ell$ και ρυθμός παραμόρφωσης $du/dy=V/\ell$
- Σαν αποτέλεσμα οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο ρευστό δίνονται από την σχέση αναλογίας $\tau = \mu Vy/\ell = \mu du/dy$ για Νευτώνικό ρευστό



Ιξώδες

- Διαστάσεις; (poise)
- Δυναμικό μ vs. Κινηματικό ιξώδες ν :

$$\nu = \mu / \rho$$

Εισήχθη από τον Maxwell (1860)

Μονάδες SI: m / s^2

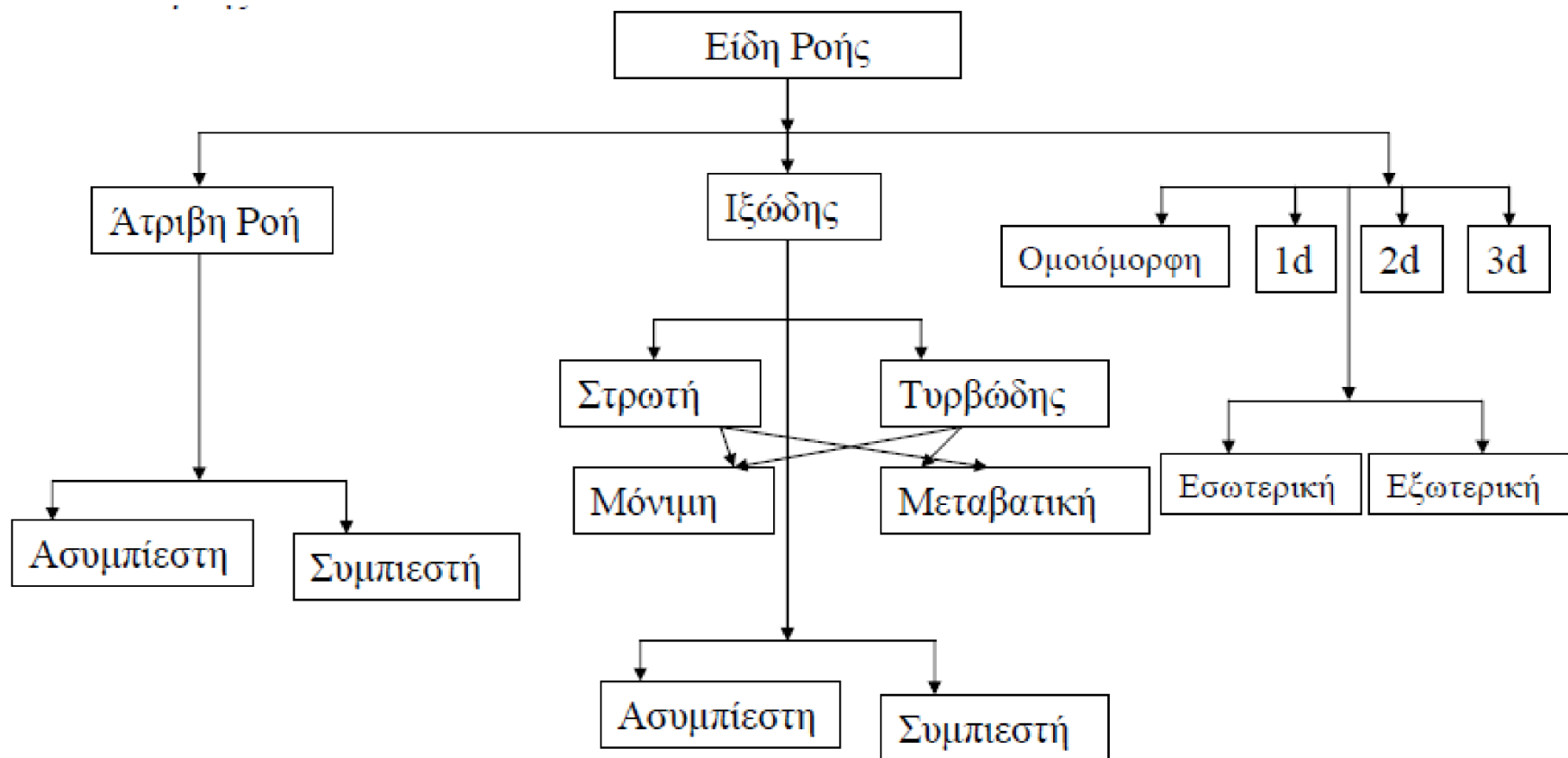
stokes (st): $10^{-4} \text{ m} / \text{s}^2$

Για χαμηλές πιέσεις το δυναμικό ιξώδες είναι ανεξάρτητο από την πίεση και εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία.

Ιξώδες

- Για υγρά το δυναμικό ιξώδες μειώνεται με τη θερμοκρασία
- Για αέρια το δυναμικό ιξώδες αυξάνεται με τη θερμοκρασία

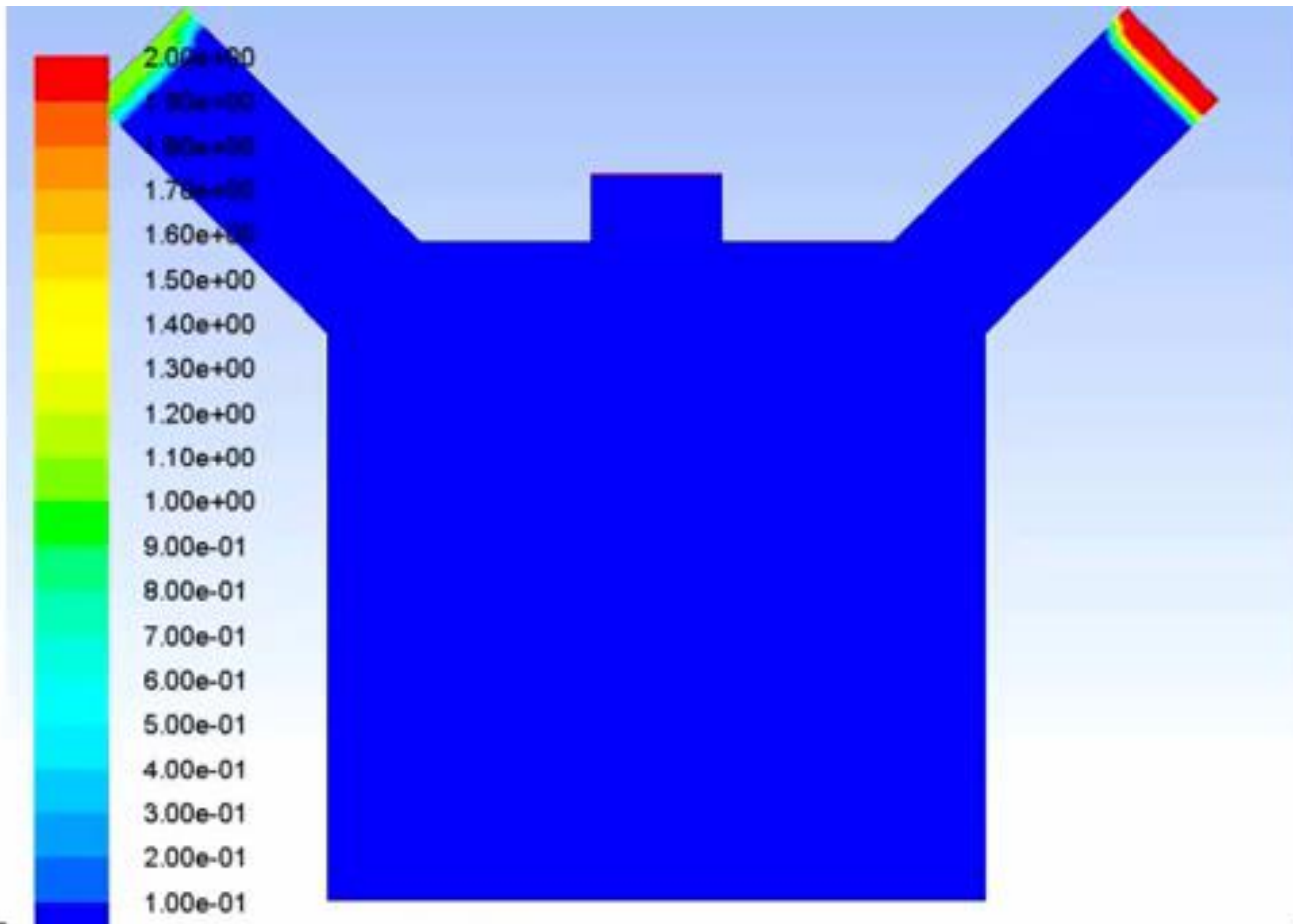
Γιατί συμβαίνει το παραπάνω?



Διφασική ροή

Φάση είναι απλά μια από τις καταστάσεις της ύλης και μπορεί να είναι αέρια, υγρή και στερεή. **Πολυφασική ροή** είναι η ταυτόχρονη ροή διαφόρων φάσεων. **Διφασική ροή** είναι η απλούστερη περίπτωση της πολυφασικής ροής. Η διφασική ροή υπακούει σε όλους τους βασικούς νόμους της μηχανικής των ρευστών, με τη διαφορά ότι οι εξισώσεις είναι περισσότερο πολύπλοκες από αυτές της μονοφασικής ροής.

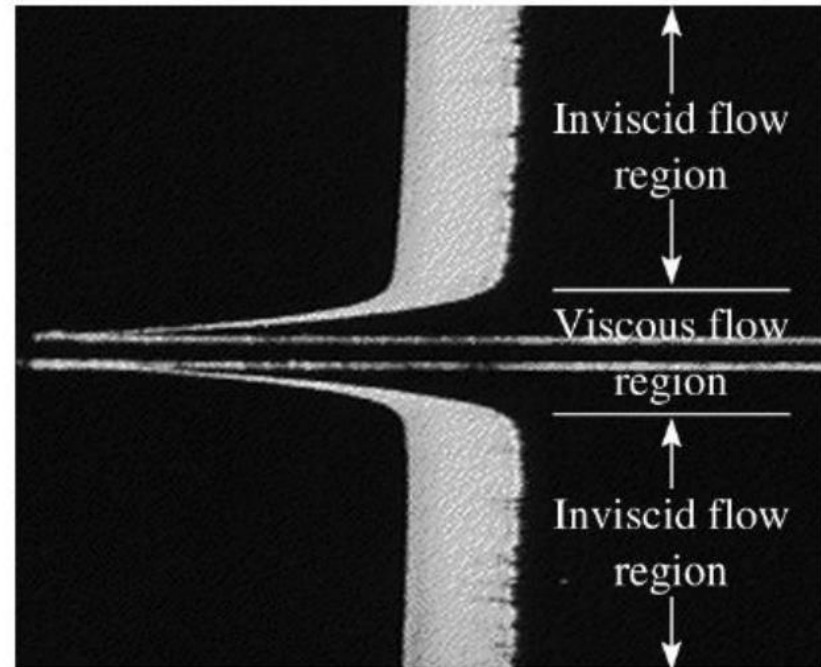
Πολυφασική ροή



Ιξώδης ροή

Ανιξώδεις vs Ιξώδεις Περιοχές του Πεδίου Ροής

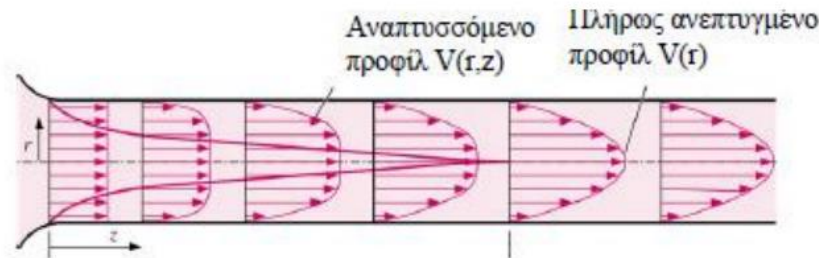
- Περιοχές όπου οι δυνάμεις τριβής είναι σημαντικές λέγονται ιξώδεις περιοχές. Συνήθως είναι κοντά σε στερεές επιφάνειες
Τέτοιες περιοχές ροής αποτελούν το συνοριακό στρώμα
- Περιοχές όπου οι δυνάμεις τριβής είναι μικρές λέγονται ανιξώδεις και συνήθως βρίσκονται μακριά από στερεές επιφάνειες



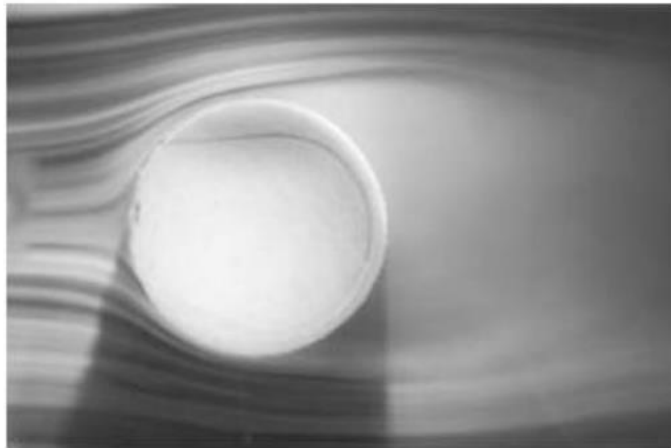
Στροβιλή και αστρόβιλη (ή δυναμική) ροή

Ο στροβιλισμός ενός διανυσματικού πεδίου δείχνει την ύπαρξη περιστροφικών ιδιοτήτων του πεδίου, και είναι μηδενικός όταν δεν υπάρχουν περιστροφές. Μία ροή χαρακτηρίζεται ως **αστρόβιλη** όταν κανένα ρευστό σωματίδιο δεν περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, δηλαδή η γωνιακή ταχύτητα του στοιχείου είναι μηδέν.

Στροβιλή και αστρόβιλη (ή δυναμική) ροή



Αναπτυσσόμενη ροή μέσα σε αγωγό
κυκλικής διατομής



Ροή γύρω από αγωγό κυκλικής
διατομής

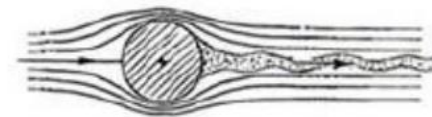
$$Re_D = \frac{\rho u D}{\mu}, \quad c_D = \frac{F_D}{\rho u_\infty^2 / 2}$$

F_D : οπισθέλκουσα δύναμη

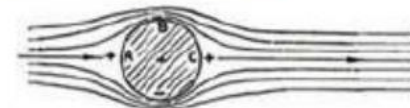
- Στις εσωτερικές ροές η επίδραση του ιξώδους είναι σε όλο το πεδίο ροής
- Για εξωτερικές ροές η επίδραση του ιξώδους βρίσκεται στο συνοριακό στρώμα και στον ολκό



Ροή γύρω από κύλινδρο για
 $10^4 < Re_D < 10^5$, με περιοδική ταλάντωση
των δινών στροβιλότητας von Karman
μέσα στον ολκό και $c_D = 1.2$

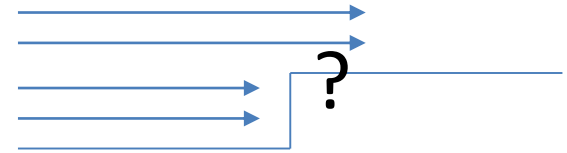
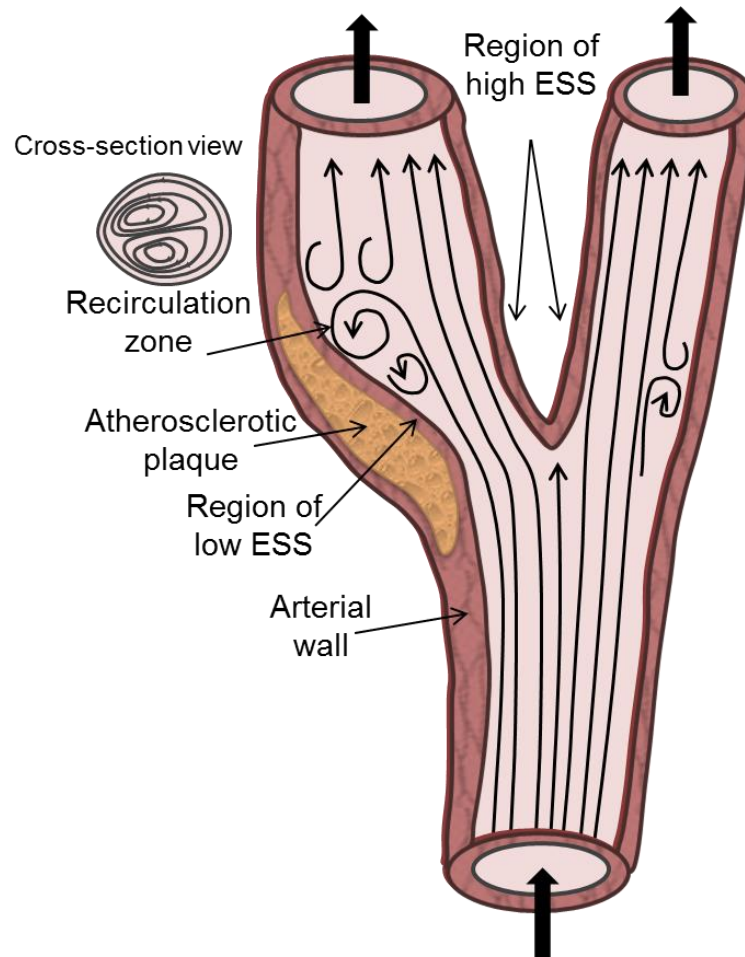


Ροή γύρω από κύλινδρο για Re_D πάνω
από την κρίσιμη τιμή για αποκόλληση
συνοριακού στρώματος, $c_D = 0.5$.

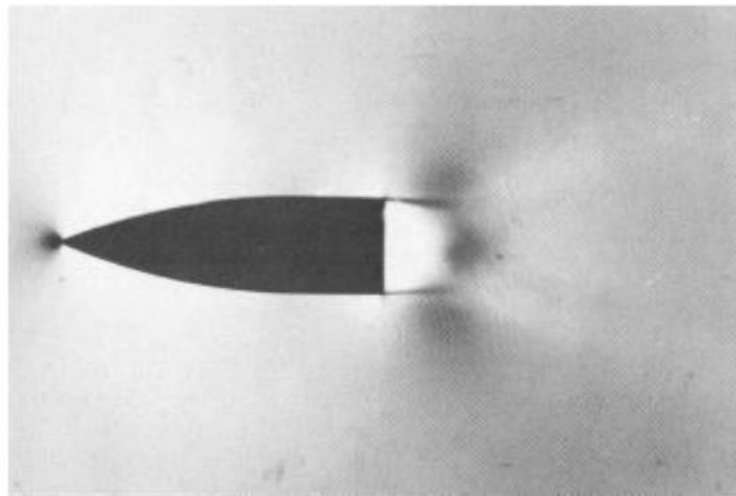
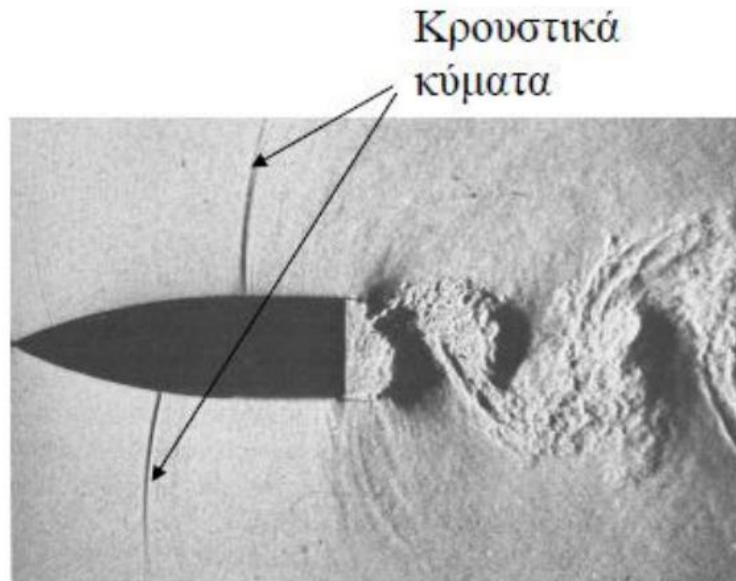


Ανιξώδης ροή γύρω από κύλινδρο, $F_D = 0$

Στροβιλή και αστρόβιλη (ή δυναμική) ροή



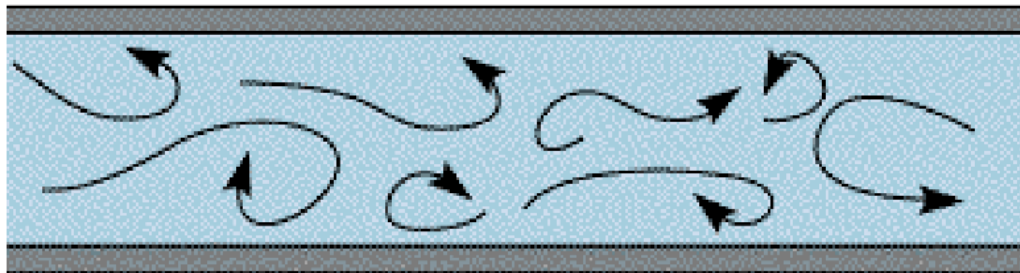
Μόνιμη vs Μεταβατική Ροή



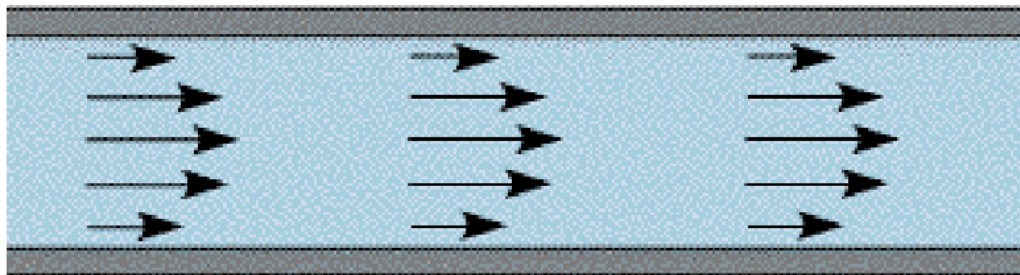
- Σε μόνιμη κατάσταση δεν υπάρχει χρονική μεταβολή της ροής σε ένα σημείο. Οι μεταβατικοί όροι στις εξισώσεις N-S μηδενίζονται
- Υπάρχουν δύο ειδών χρονομεταβαλόμενες ροές.
 - Μεταβατικές που περιγράφουν ροές στο ξεκίνημα ή αναπτυσσόμενες ροές.
 - Περιοδικές όπου υπάρχει ταλάντωση γύρω από μία μέση τιμή.
- Οι χρονομεταβαλόμενες ροές εμφανίζονται ως μόνιμες λαμβάνοντας κατάλληλα μέσες τιμές, π.χ. ανά περίοδο ταλάντωσης.

Ροές

Turbulent



Laminar



Στρωτή και τυρβώδη ροή

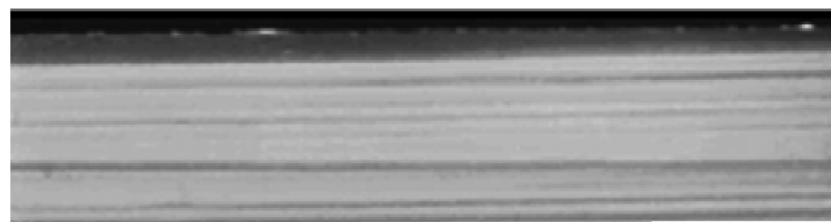
- **Στρωτή ροή** ονομάζεται η ροή, κατά την οποία τα σωματίδια του ρευστού κινούνται με σταθερή ταχύτητα κατά στρώματα. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα σωματίδια του ρευστού που βρίσκονται στο ίδιο στρώμα, κινούνται με την ίδια ταχύτητα κατά την διεύθυνση της ροής και μόνο, ανεξάρτητα από τη θέση τους.
- Έτσι στη στρωτή ροή δεν έχουμε μακροσκοπική ανάμιξη των γειτονικών στρωμάτων του ρευστού. Κάθε τάση του ρευστού προς αστάθεια και δημιουργία στροβίλων, εξισορροπείται από ιζώδεις διατμητικές τάσεις.

Στρωτή και τυρβώδη ροή

- **Τυρβώδης** είναι η ιξώδης ροή κατά την οποία τα σωματίδια του ρευστού, κινούνται ακανόνιστα και τυχαία προς όλες τις κατευθύνσεις.
- Έτσι έχουμε μια ακανόνιστη και τυχαία μεταφορά ορμής μεταξύ των σωματιδίων του ρευστού. Αποτέλεσμα αυτής της τυχαίας κίνησης είναι ότι οι ιδιότητες του ρευστού σε οποιοδήποτε σημείο μεταβάλλονται συνεχώς κατά τυχαίο τρόπο με τον χρόνο και τη θέση.
- Συνεπώς σε μία μόνιμη τυρβώδη ροή οι τιμές των μεγεθών που παραμένουν σταθερές με το χρόνο είναι οι μέσες τιμές.

Στρωτή και τυρβώδη ροή

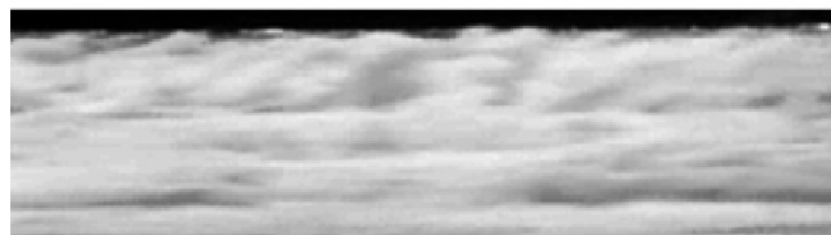
- Στρωτή: Ροή κατά στρώματα με σαφώς διαχωρισμένες ροϊκές γραμμές
- Τυρβώδης: Ιδιαίτερα ανομοιόμορφη ροή που χαρακτηρίζεται από δίνες διαφόρων μεγεθών και τυχαιότητα.
- Μεταβατική: Ροή που περιέχει περιοχές στρωτής αλλά και τυρβώδους ροής – Χαρακτηρίζεται από περιορισμένο εύρος χρονικών και χωρικών κλιμάκων
- Ο αριθμός Reynolds, $Re = \rho L u / \mu$, είναι η παράμετρος που καθορίζει το κατά πόσον έχουμε στρωτή ή τυρβώδη ροή.
Πείραμα Reynolds η απαρχή της προσέγγισης μέσω της αρχής δυναμικής/διαστατικής ομοιότητας



Στρωτή



Μεταβατική

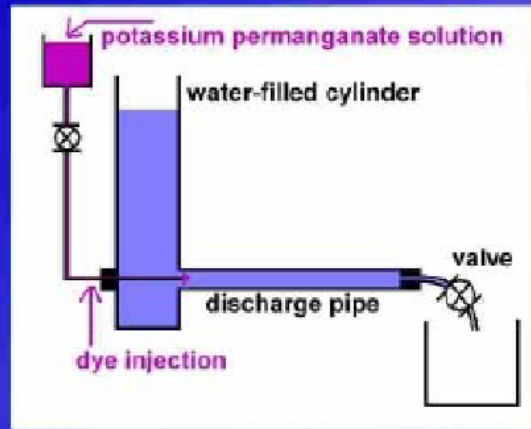


Τυρβώδης

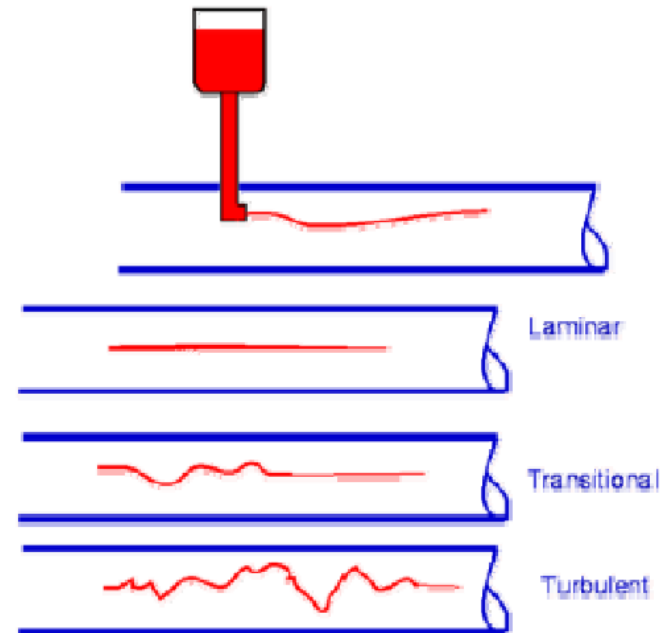
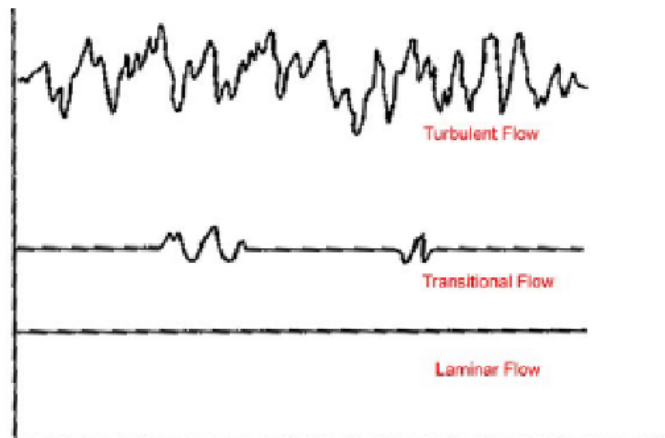
Στρωτή και τυρβώδη ροή

What is Turbulence?

Sketch for the setup of the experiment



- Διάταξη πειράματος Reynolds (1883)
- Hagen (1839) παρατήρησε δύο είδη ροής με αλλαγή της μέσης ταχύτητας σωλήνα

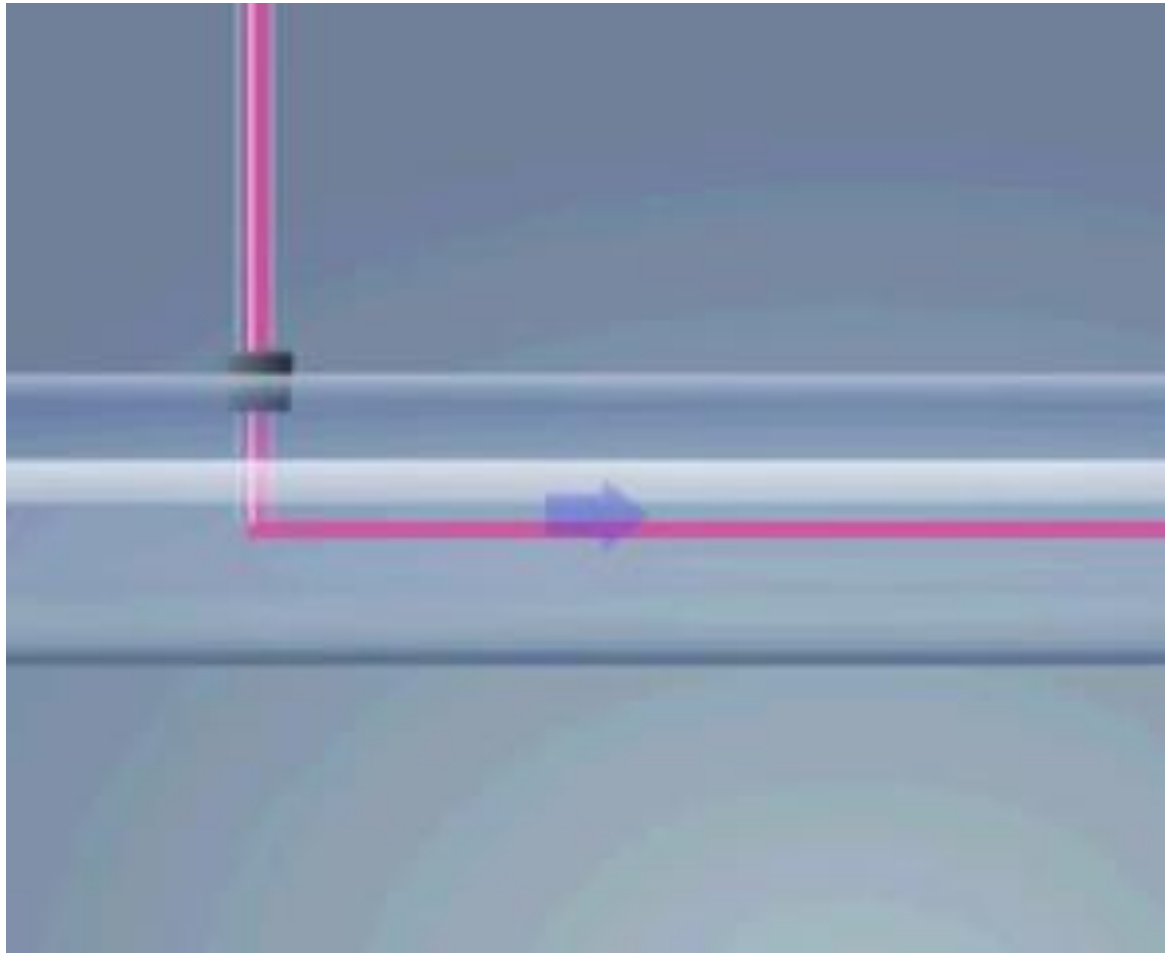


$$Re = \frac{uD\rho}{\mu} < 2000 \rightarrow \text{Στρωτή ροή}$$

$$Re = \frac{uD\rho}{\mu} > 2000 \rightarrow \text{Τυρβώδης ροή}$$

Χρονική μεταβολή της ταχύτητας ρευστού σε σημείο

Reynolds' experiment



Στρωτή ή τυρβώδης ροή?

- Ροή σε αγωγό $d=0,20 \text{ m}$, $v=0,25 \text{ m/s}$
 - Βενζόλιο ($\nu=7,39 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)
 - Λάδι SAE 30 ($\nu=2,79 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)

Για ποια παροχή λαδιού η ροή γίνεται τυρβώδης;

$$\text{Re} = \frac{uD\rho}{\mu} < 2000 \rightarrow \text{Στρωτή ροή}$$

$$\text{Re} = \frac{uD\rho}{\mu} > 2000 \rightarrow \text{Τυρβώδης ροή}$$

Στρωτή ή τυρβώδης ροή?

- Ροή σε αγωγό $d=0,20\text{ m}$, $v=0,25\text{ m/s}$
 - $Re_{\text{Βενζόλιο}} = 67659$
 - $Re_{\text{Λάδι SAE 30}} = 179$

Για ποια παροχή λαδιού η ροή γίνεται τυρβώδης;

$$\text{Παροχή} = v\pi D^2/4$$

$$Re_{\text{Λάδι SAE 30}} > 2000 \Rightarrow v_t \rho D / \mu > 2000 \Rightarrow v_t > 2000 \mu / (\rho D)$$

Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή

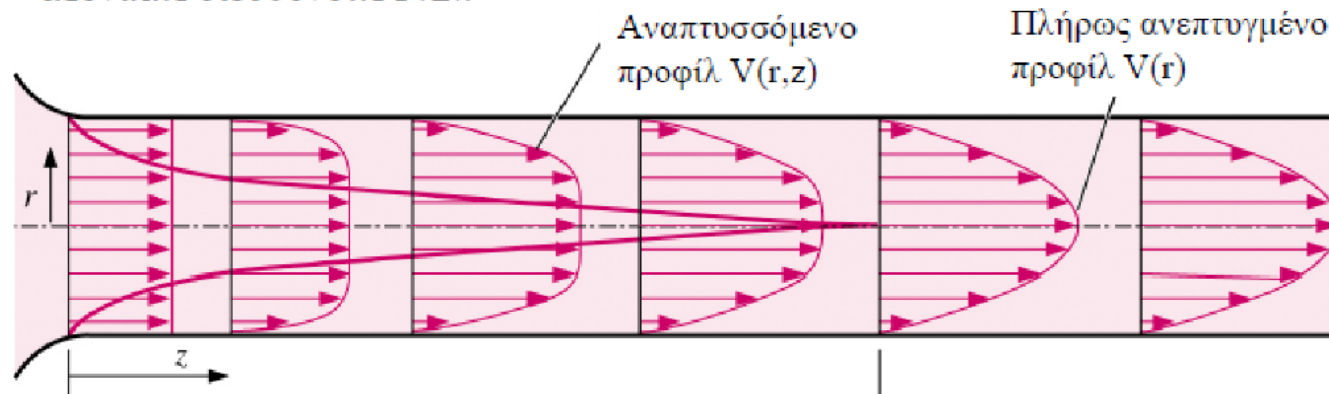
- Αν κατά μήκος μιας γραμμής ροής ισχύει ότι $(\boldsymbol{v} \cdot \nabla)\boldsymbol{v} = 0$ τότε η ροή ονομάζεται ομοιόμορφη, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ονομάζεται ανομοιόμορφη ή μεταβαλλόμενη.
- Η ομοιομορφία (ή μη) μιας ροής αφορά χωρικές μεταβολές κι όχι μεταβολές με το χρόνο.

Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή

- Στην ομοιόμορφη ροή η ταχύτητα παραμένει σταθερή κατά μέγεθος-διεύθυνση και κατά μήκος μιας γραμμής ροής.
- Αν δε όλο το πεδίο ροής είναι ομοιόμορφο, τότε όλες οι γραμμές ροής είναι ευθείες παράλληλες.

Μόνο- Δι και Τρι Διάστατη Ροή

- Οι εξισώσεις Navier-Stokes είναι τριδιάστατες
- Διάνυσμα ταχύτητας, $\mathbf{U}(x,y,z,t) = [U_x(x,y,z,t), U_y(x,y,z,t), U_z(x,y,z,t)]$
- Ροές μικρότερης διάστασης, μονο ή διδιάστατες, απλοποιούν σημαντικά το πρόβλημα
- Αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων (κυλινδρικές σφαιρικές, κτλπ.) διευκολύνουν την μείωση της διάστασης του προβλήματος
- Για πλήρως αναπτυγμένη ροή σε σωλήνα κυκλικής διατομής η αξονική ταχύτητα είναι συνάρτηση της ακτινικής διεύθυνσης, $V(r)$, ενώ η πίεση είναι συνάρτηση της αξονικής διεύθυνσης $P(z)$.



Ένα πεδίο ροής χαρακτηρίζεται ως μόνο, δι ή τρι-διάστατο αναλόγως του κατά πόσον εξαρτάται από 1, 2 ή 3 διευθύνσεις στον χώρο, $\vec{u} = \vec{u}(x), \vec{u}(x,y), \vec{u}(x,y,z)$

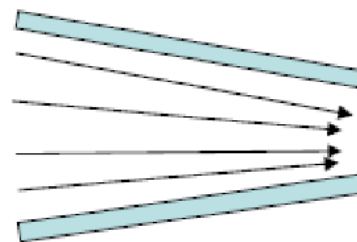
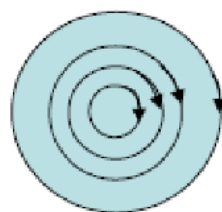
Ένα πεδίο ροής λέγεται ομοιόμορφο αν το μέτρο και η διεύθυνση του πεδίου ταχυτήτων δεν μεταβάλλονται πάνω στις ροϊκές γραμμές,

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial s} = 0$$

όπου s το μήκος τόξου πάνω σε μία ροϊκή γραμμή

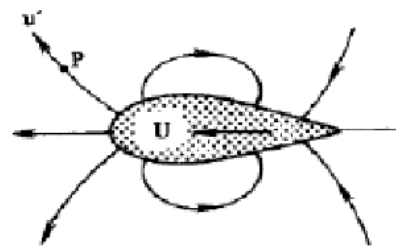


Ομοιόμορφη ροή $\frac{\partial \vec{u}}{\partial s} = 0$

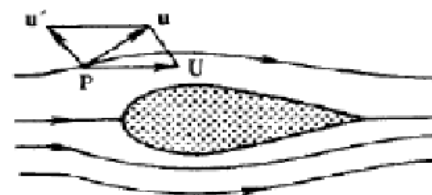


Ανομοιόμορφη ροή λόγω μεταβολής της διεύθυνσης, ροή σε δίνες, και του μέτρου, συγκλίνουσα ροή, της ταχύτητας κατά μήκος των ροϊκών γραμμών

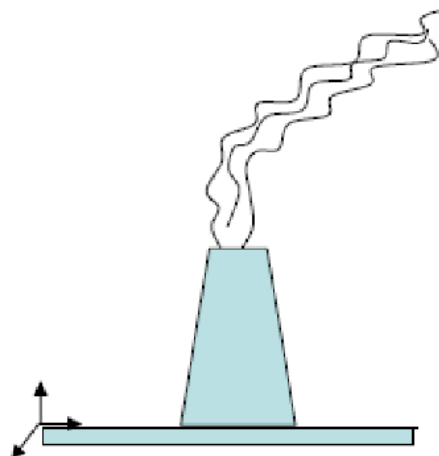
ο χρονομεταβαλλόμενο πεδίο ροής γίνεται μόνιμο με αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων



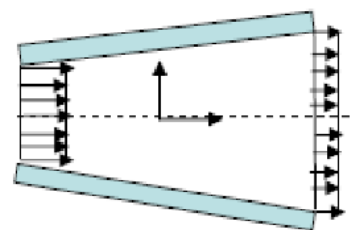
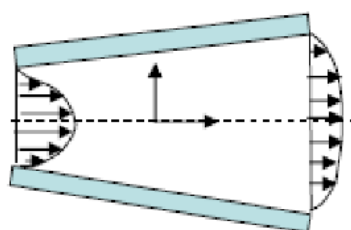
(a)



(b)



Τρισδιάστατο πεδίο ροής



Το διδιάστατο πεδίο ροής μετατρέπεται σε μονοδιάστατο με χρήση μέσων τιμών του πεδίου ταχύτητας



Ομοιόμορφη ροή σε διατομή

Συμπιεστή και ασυμπίεστη ροή

Όταν η πυκνότητα του ρευστού μπορεί να θεωρηθεί σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή του πεδίου ροής, τότε η ροή καλείται **ασυμπίεστη**. Στην αντίθετη περίπτωση καλείται συμπίεστή.

Συμπίεστη vs Ασυμπίεστη Ροή

- Η ροή είναι ασυμπίεστη όταν η πυκνότητα είναι περίπου σταθερή
- Οι ροές υγρών είναι συνήθως ασυμπίεστες
- Οι ροές αερίων είναι συνήθως συμπίεστες ειδικά σε μεγάλες ταχύτητες
- Ο αριθμός Mach, $M=V/c$, αποτελεί ένδειξη της συμπίεστικότητας μιας ροής
- Ο αριθμός Mach, $M=V/a$, καθορίζει το κατώφλι συμπίεστικότητας – Για $M>0.3$, περίπου, η συμπίεστικότητα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη – Εν γένει μικρή ταχύτητα του ήχου σημαίνει μεγάλη συμπίεστικότητα k καθώς και μεγάλο αριθμό Mach.
- Για παράδειγμα, ένα επιβατικό αεροπλάνο εν πτήση αναπτύσσει ταχύτητες της τάξης των 540 mi/h~241 m/s. Σε υψόμετρο της τάξης των 30,000 ποδιών όπου πετά ένα αεροπλάνο η θερμοκρασία είναι της τάξης $T\sim 229\text{ K}$ και τελικά $a=(c_pRT/c_v)^{1/2}=303\text{ m/s}$ για ιδανικό αέριο. Συνεπώς $M\sim 0.8$ και η συμπίεστικότητα πρέπει να ληφθεί υπόψη.



Συμπιεστή vs. Ασυμπίεστη ροή

- Ποιά είναι η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής αεροσυμπιεστή με διάμετρο d για να μην υπάρχουν φαινόμενα συμπίεστούτητας;

- $v = \omega R$

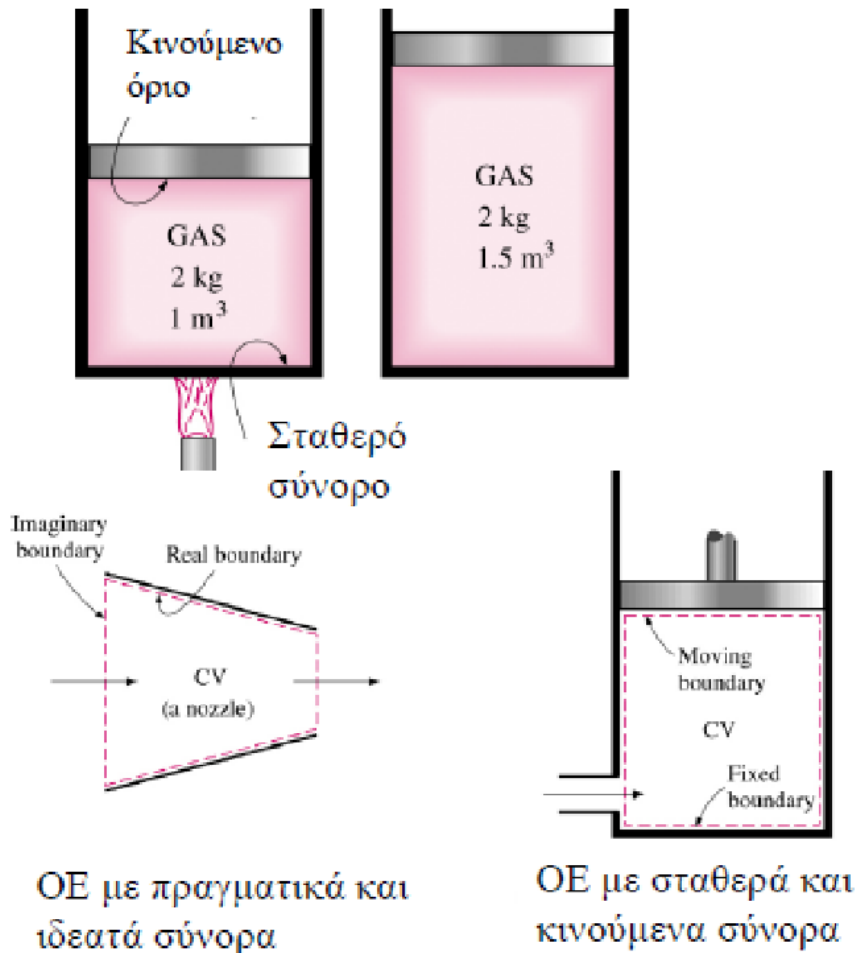
- $M = v/v_{sound} < 0,3$

- $v_{sound} = 340 \text{ m/s}$

Συμπιεστή vs. Ασυμπίεστη ροή

- Ποιά είναι η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής αεροσυμπιεστή με διάμετρο d για να μην υπάρχουν φαινόμενα συμπίεστούτητας;
 - $v = \omega R$
 - $M = v/v_{sound} < 0,3$
 - $v_{sound} = 340 \text{ m/s}$
 - $\omega < 680 \text{ s}^{-1} = 6493 \text{ RPM}$

Σύστημα vs Όγκος Ελέγχου



- Ως σύστημα ορίζουμε μία δεδομένα ποσότητα ύλης ή μέρος του χώρου που μελετάμε
- Το κλειστό σύστημα ορίζεται από δεδομένη ποσότητα μάζας.
- Το ανοικτό σύστημα ή όγκος ελέγχου είναι μία δεδομένη περιοχή του χώρου
- Στην ρευστομηχανική χρησιμοποιούμε κυρίως όγκους ελέγχου διότι αλλιώς έχουμε να κάνουμε σχεδόν πάντα με χρονομεταβαλόμενα προβλήματα
- Το θεώρημα μεταφοράς Reynolds μας επιτρέπει να μεταβαίνουμε από την μία θεώρηση στην άλλη

Υποηχητική και υπερηχητική ροή

Όταν η ταχύτητα V ενός ρευστού (π.χ. η ταχύτητα του ατμοσφαιρικού αέρα γύρω από την άτρακτο και τις πτέρυγες ενός αεροσκάφους) είναι μικρότερη από την ταχύτητα του ήχου σε αυτό το ρευστό η ροή χαρακτηρίζεται ως **υποηχητική**. Όταν όμως $V > c$, τότε χαρακτηρίζεται ως **υπερηχητική**.

Υποηχητική και υπερηχητική ροή

- Κριτήριο για τον χαρακτηρισμό της ροής ως υποηχητικής ή υπερηχητικής αποτελεί ο αριθμός Mach, ο οποίος ορίζεται ως

$$M=V/c$$

- Όπου V είναι η ταχύτητα του ρευστού και c η τοπική ταχύτητα του ήχου (εντός του ρευστού).

Υποηχητική και υπερηχητική ροή

- Όταν $M < 1$ η ροή χαρακτηρίζεται ως υποηχητική.
- Όταν $M > 1$ η ροή χαρακτηρίζεται ως υπερηχητική.
- Όταν $M = 1$ η ροή χαρακτηρίζεται ως μεταβατική.
- (Όταν $M < 0,3$, τότε το ρευστό μπορεί να θεωρηθεί ως ασυμπίεστο).

Θεμελιώδεις νόμοι

- Διατήρηση της μάζας (εξίσωση συνέχειας)

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\Sigma} = 0$$

Θεμελιώδεις νόμοι

- Διατήρηση της ορμής (δεύτερος νόμος του Νεύτωνα)

$$\mathbf{F} = \left(\frac{d\mathbf{P}}{dt}\right)_{\Sigma}$$

$$\mathbf{P} = m\mathbf{v}$$

- Για κάθε διεύθυνση αναφοράς:

$$F_i = \left(\frac{dP_i}{dt}\right)_{\Sigma}$$

- Τι συμβαίνει όταν η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σύστημα είναι 0;

Θεμελιώδεις νόμοι

- α' θερμοδυναμικό αξίωμα

$$\delta Q - \delta W = dE$$

- Q , W , ποσότητες
- E ιδιότητα

Θεμελιώδεις νόμοι

- Εξίσωση Ενέργειας

$$\dot{Q} - \dot{W} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{\Sigma}$$

- Συμβάσεις
 - Η θερμότητα που εισέρχεται στο σύστημα είναι θετική
 - Το έργο που εξέρχεται από το σύστημα είναι θετικό

Τρόποι Μελέτης Πεδίων Ροής

- **Ολοκληρωτική μελέτη** πεδίου Ροής: Ανάλυση ολοκληρωτικών εξισώσεων διατήρησης χρησιμοποιώντας μέσες ή προσεγγιστικές τιμές των μεταβλητών. Παρέχει την δυνατότητα εκτίμηση της απαιτούμενης ισχύος για την υλοποίηση ενός συγκεκριμένου έργου καθώς και της τάξης μεγέθους των εμπλεκόμενων δυνάμεων
- **Διαφορική μελέτη:** Επιλύει διαφορικά ισοζύγια διατήρησης των θεμελιωδών μεγεθών (ορμή, μάζα, ενέργεια) για την παροχή λεπτομερειακών προβλέψεων αναφορικά με την σημειακή ανάλυση της ροής. Αναδεικνύει μηχανισμό παραγωγής ροϊκών πεδίων
- **Διαστατική ανάλυση:** Όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα θεωρητικά μοντέλα σε πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιείται η διαστατική ανάλυση. Πριν την διεξαγωγή πειραμάτων ή προσομοιώσεων χρειάζεται να γνωρίζουμε τις καθοριστικές αδιάστατες γεωμετρικές ή φυσικές παραμέτρους (π.χ. Re) ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος. Στα πειράματα και στα μοντέλα προσομοίωσης επιθυμούμε να υπάρχει **δυναμική ομοιότητα** με την πραγματική ροή, δηλαδή να χαρακτηρίζεται το πεδίο ροής και στις τρεις περιπτώσεις από τις ίδιες τιμές των καθοριστικών αδιάστατων παραμετρών (π.χ. Re , Ma)

Πως μεταβάλλεται η εσωτερική ενέργεια συστήματος?

- Έστω 1000 άτομα σε κλειστή αίθουσα
- Το κάθε άτομο αποβάλλει 150 J/s
- *Ποιες είναι οι απαιτήσεις σε κλιματισμό?*
- **1 kW = 3414 BTU**

Κατηγορίες ρευστών

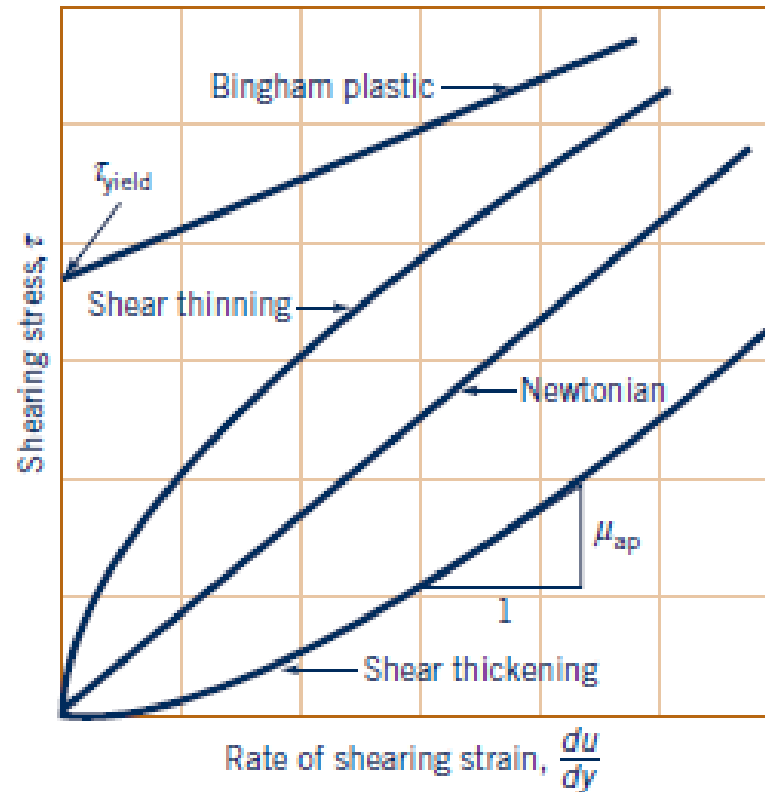
Νευτώνεια-Μη Νευτώνεια-Ιδανικά

Νευτώνεια: Ρευστά τα οποία ικανοποιούν τον πειραματικό νόμο του Newton καλούνται Νευτώνεια ρευστά. Στην περίπτωση αυτή η διατμητική τάση τ είναι ανάλογη της ταχύτητας μεταβολής της γωνιακής παραμορφώσεως

Κατηγορίες ρευστών (2)

- **Μη Νευτώνεια:** Ρευστά τα οποία δεν ικανοποιούν τον πειραματικό νόμο του Newton καλούνται Μη Νευτώνεια ρευστά. Στην περίπτωση αυτή ο συσχετισμός της διατμητικής τάσεως τ και της ταχύτητας μεταβολής της γωνιακής παραμορφώσεως είναι διαφορετικός.
- **Ιδανικά:** Ιδανικά (ή ιδεατά ή ανιξωδικά) καλούνται τα ρευστά εκείνα τα οποία έχουν μηδενική συνεκτικότητα.

Κατηγορίες ρευστών (3)



Κατηγορίες ρευστών (4)

Ομογενές και μη ομογενές ρευστό.

Ομογενές ρευστό είναι εκείνο το οποίο είναι ενός καθορισμένου είδους σε όλη την εξεταζόμενη περιοχή, χωρίς προσμίξεις, όπως διαλύματα ή αιωρούμενα σωματίδια, και χωρίς μεταβολή φάσης. Η πυκνότητα, η ταχύτητα, η πίεση ή άλλη ιδιότητα, μπορεί να μεταβάλλονται από σημείο σε σημείο και στον χρόνο αλλά πάντα το ρευστό είναι του ίδιου είδους.

Κατηγορίες ρευστών (5)

Μη ομογενές ρευστό σύστημα είναι εκείνο που περιέχει δύο ή περισσότερα καθορισμένα είδη ρευστών, με ή χωρίς προσμίξεις. Η αναλογία του κάθε συστατικού μπορεί να μεταβάλλεται από σημείου σε σημείο και στον χρόνο, όπως μπορεί επίσης το σύστημα να είναι μιας ή περισσοτέρων φάσεων.

Κατηγορίες ρευστών (6)

Ισότροπο και μη ισότροπο ρευστό.

Ισότροπο είναι ένα ρευστό που σε κάθε σημείο αυτού οι μακροσκοπικές εκδηλώσεις (=τρόποι) των ιδιοτήτων του, και πολλές φορές η μηχανική του συμπεριφορά, δηλαδή τάσεις και παραμορφώσεις πάνω σε αυτό, δεν εξαρτώνται από την διεύθυνση, δηλαδή δεν παρουσιάζουν ορισμένες προτιμώμενες ή προνομιούχες κατευθύνσεις.