ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

Γ’ εξάμηνο

• ΜΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΛΕΚΤΟΡΑΣ

ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

▪ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ
-Ειδικότητα Υδραυλική
Πανεπιστήμιο Καρλσρούης- Δ. Γερμανία

- D.E.A. Μηχανικής

Institut National Polytechnique de Toulouse

Γαλλία

- Διδάκτωρ στην Μηχανική των Ρευστών

(Docteur en Mecanique des Fluides)

Institut National Polytechnique de Toulouse

Γαλλία

ΒΑΣΙΚΟ ΣΥΓΓΡΑΜΜΑ

1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

- Η ύλη βρίσκεται συνήθως σε **στερεή** ή **ρευστή** κατάσταση

- Ένα **στερεό** διατηρεί ένα συγκεκριμένο σχήμα αν οι δυνάμεις που επιδρούν απάνω του είναι σταθερές στον χρόνο

- Ένα ρ**ευστό** διακρίνεται για την ευκολία που αλλάζει σχήμα. Αυτή η συνεχής παραμόρφωση προκαλεί την κίνηση των ρευστών (**ροή**)

- Τα πιο συνηθισμένα ρευστά στην φύση είναι το **νερό** (υγρό) και ο **αέρας** (αέριο)
- Η πυκνότητα των υγρών είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα των αερίων. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση τους είναι οι ίδιες.
- Τόσο το νερό όσο και ο αέρας είναι πόροι απαραίτητοι για την επιβίωση των ανθρώπων και την καλή λειτουργία των οικοσυστημάτων.
- Τα ρευστά αποτελούν επίσης «λεωφόρους» για την διάδοση των ρύπων στο περιβάλλον
- Η κατανόηση της συμπεριφοράς των ρευστών είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό έργων που σχετίζονται με την διαχείριση των πόρων αυτών την επεξεργασία τους και την κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς τους στο περιβάλλον για να μπορούμε να προχωρήσουμε σε έναν ευνοϊκό σχεδιασμό διαφόρων παρεμβάσεων.

Η παράδοση αποτελεί ουσιαστικά εισαγωγή στην Ρευστομηχανική και είναι από μία τις «βασικές» παραδόσεις του τμήματος.

(Αποτελεί ένα από τα τέσσερα προαπαιτούμενα μαθήματα τα οποία πρέπει να κατέχουν επιστήμονες από άλλες σχολές, οι οποίοι θέλουν να κάνουν διδακτορικό στο τμήμα μας).

Θα ασχοληθούμε με βασικά φαινόμενα και διεργασίες, η γνώση των οποίων είναι απαραίτητη για την κατανόηση ροών που υπεισέρχονται σε πολλά γνωστικά αντικείμενα σχετικά με την επιστήμη του Μηχανικού Περιβάλλοντος.

ΜΕΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

- -Υπολογισμός μεταφοράς ρύπων στο επιφανειακά νερά, στα υπόγεια, στο αέρα (αραίωση, αποδόμηση). Μέτρα για την προστασία οικισμών, γεωτρήσεων, εξυγείανση υδροφορέων από ρύπανση
- -Διαστασιολόγηση τεχνικών έργων (ΕΕΛ, αντλίες, αγωγοί μεταφοράς νερού, ανεμογεννήτριες, φίλτρα καθαρισμού)

Η ύλη της παράδοσης είναι συμβατή με τις καθιερωμένες διεθνώς «προδιαγραφές» (Ύλη κλασσικών συγγραμμάτων και περιεχόμενα προγράμματος σπουδών ευφημώς γνωστών Πανεπιστημίων).

Η επιλογή αυτή δικαιολογείται από περισσότερους παράγοντες:

-Είναι καταξιωμένη από την διεθνή εμπειρία.

-Πολλές αποδείξεις και παραδείγματα αποτελούν σημείο αναφοράς σε άλλες παραδόσεις, διδακτικά βιβλία και επιστημονικές δημοσιεύσεις

-Η σύμπλευση του προγράμματος σπουδών, τουλάχιστον στα βασικά μαθήματα, με τα διεθνή στάνταρ συνεισφέρει στο κύρος του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος

Όσο αφορά το κομμάτι του τίτλου του Μαθήματος «Εφαρμοσμένη Υδραυλική» θα αναφερθούν εφαρμογές της θεωρίας και θα συμπεριληφθούν ασκήσεις σε θέματα που έχουν άμεση σχέση με την Επιστήμη του Μηχανικού Περιβάλλοντος

ΤΟ ΡΕΥΣΤΟ ΣΑΝ ΣΥΝΕΧΕΣ ΜΕΣΟ

- Τα μόρια του ρευστού χωρίζονται μεταξύ τους από κενά που είναι μεγαλύτερα από τα ίδια τα μόρια.

- Τα μόρια αυτά βρίσκονται σε συνεχή τυχαία κίνηση ακόμα και αν φαινομενικά (μακροσκοπικά) το ρευστό είναι ακίνητο.

- Ακόμα και αν τα μόρια βρίσκονται κοντά το ένα με το άλλο, οι ταχύτητες τους είναι διαφορετικές.

- Μία μοριακή ασυνεχής θεώρηση των κινήσεων του ρευστού απαιτεί κοπιαστικές στατιστικές μεθόδους. Η προσέγγιση αυτή δεν ενδείκνυται συνήθως για πρακτικές εφαρμογές
- Εναλλακτική προσέγγιση: Αυτή του συνεχούς ρευστού: Θεωρούμε τις μέσες ιδιότητες του ρευστού σε έναν μικρό όγκο. Αν ο όγκος αυτός έχει τέτοιες διαστάσεις ώστε να περιέχει ένα μεγάλο αριθμό μορίων, οι ιδιότητες του ρευστού είναι ανεξάρτητες από το μέγεθος του όγκου
- Με την υπόθεση αυτή κάνουμε τις παραδοχές ότι το ρευστό αποτελείται από μία συνεχή ακολουθία μικρών όγκων οι οποίοι είναι αρκετά μικροί έτσι ώστε να μπορούν να θεωρούνται σημεία σε σχέση με την γεωμετρία της ροής.

Ιδιότητες συνεχών ρευστών

- Θα παρουσιάσουμε σύντομα ορισμένες ιδιότητες των (συνεχών) ρευστών όπως πυκνότητα, ειδικό βάρος, ιξώδες, επιφανειακή τάση ...

Η πυκνότητα ρ ορίζεται σαν μάζα ανά μονάδα όγκου. Μονάδα μέτρησης είναι kg/m3. Η πυκνότητα εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε διάφορα διαλυμένα σε αυτό άλατα και στερεά σωματίδια την θερμοκρασία και ενδεχομένως την πίεση.

Το ειδικό βάρος γ ορίζεται σαν βάρος ανά μονάδα όγκου. Μονάδα μέτρησης είναι το N/m3.

Τα δύο παραπάνω μεγέθη συνδέονται με την σχέση: $\gamma=\rho g$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας

Το ιξώδες

- Εμπειρική παρατήρηση: Η αντίσταση στην παραμόρφωση ενός ρευστού εξαρτάται από το είδος του ρευστού.
- Για την ποσοτική περιγραφή της παραμόρφωσης αυτής εισάγουμε την φυσική ιδιότητα που λέγεται ιξώδες και συμβολίζεται διεθνώς με το ελληνικό γράμμα **μ**

Πειραματικός προσδιορισμός του ιξώδους

- Θεωρούμε την διάταξη του σχήματος 1.3.1: Έχουμε μία λεκάνη με υγρό βάθους **h**. Στην επιφάνεια του ρευστού κινείται μία πλάκα με ταχύτητα U_0. Με βάση την πειραματική αυτή διάταξη μπορούμε να προσδιορίσουμε το ιξώδες συναρτήσει των υπολοίπων μεγεθών της κίνησης του ρευστού

- Αν η πλάκα κινείται με σταθερή ταχύτητα U_0 και η δύναμη που εφαρμόζουμε απάνω της είναι F, τότε η διατμητική τάση που ασκείται πάνω στην επιφάνεια της πλάκας σε επαφή με το υγρό είναι **τ=F/S**
- Το ρευστό το οποίο έρχεται σε επαφή με την πλάκα κινείται με την ίδια ταχύτητα με αυτήν
- Το ρευστό το οποίο είναι σε επαφή με τον πυθμένα είναι ακίνητο
- Για περιπτώσεις που η ταχύτητα Uo είναι αρκετά μικρή η ενδιάμεση κατανομή της ταχύτητας είναι γραμμική

$$U(y)/y=U_0/h$$

- Αξιωματικά ορίζουμε το ιξώδες του ρευστού από την σχέση: $\boldsymbol{\tau = \mu\, U_0 / h = \mu\, dU/dy}$

- Η σχέση αυτή ονομάζεται νόμος του Νεύτωνα για το ιξώδες.
- Ρευστά για τα οποία ισχύει νόμος αυτός ονομάζονται **Νευτώνεια ρευστά**
- Τα περισσότερα ρευστά στην φύση μπορούν να χαρακτηριστούν σαν νευτώνεια
- <u>Στην παράδοση αυτή θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τα νευτώνεια ρευστά.</u>

- Το κινηματικό ιξώδες ν ορίζεται σαν ν=μ/ρ
- Έχει διαστάσεις επιφάνεια /χρόνος
- Όσο αφορά τα υγρά, το ιξώδες μειώνεται με την θερμοκρασία, ενώ για τα αέρια συμβαίνει το αντίθετο.

Επιφανειακή τάση

Στο εσωτερικό ενός υγρού ένα μόριο έλκεται με τον ίδιο τρόπο προς όλες τις κατευθύνσεις από τα άλλα μόρια που το περιβάλλουν.

Στην διεπιφάνεια μεταξύ του νερού και του αέρα η παραπάνω κατάσταση ισορροπίας δεν ισχύει. Η επιφάνεια του υγρού συμπεριφέρεται σαν μία ελαστική μεμβράνη που βρίσκεται υπό πίεση.

Αιτία για αυτήν την συμπεριφορά είναι η επιφανειακή τάση σ:

Ορίζεται σαν η δύναμη που δρα σε μία γραμμή η οποία αποτελεί το όριο μίας ελεύθερης επιφάνειας

Η επιφανειακή τάση έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ελεύθερης επιφάνειας υγρού.

(Μία σταγόνα νερού τείνει να πάρει σφαιρικό σχήμα.)

Η επιφανειακή τάση επιτρέπει στο νερό να ανεβαίνει από το έδαφος στα φυτά και τα δέντρα, ανυψώνει την εδαφική υγρασία στο έδαφος και αποτελεί πηγή σφαλμάτων σε μερικά πειράματα υπό κλίμακα.

Προφανώς δεν εμφανίζεται μόνο στην διεπιφάνεια νερού και αέρα, αλλά στην διεπιφάνεια δύο μη αναμίξιμων ρευστών με διαφορικές ιδιότητες. (Ενδιαφέρον για τον Μηχανικό Περιβάλλοντος έχουν π.χ. προβλήματα ρύπανσης νερού – επιφανειακού ή υπόγειου- από πετρελαιοειδή και προβλήματα αξιοποίησης γεωθερμικών ρευστών (εμφάνιση φυσαλίδων ατμού).

Η επιφανειακή τάση έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ελεύθερης ποσότητας υγρού.

(Μία σταγόνα νερού τείνει να πάρει σφαιρικό σχήμα.)

Η επιφανειακή τάση επιτρέπει στο νερό να ανεβαίνει από το έδαφος στα φυτά και τα δέντρα, ανυψώνει την εδαφική υγρασία στο έδαφος και αποτελεί πηγή σφαλμάτων σε μερικά πειράματα υπό κλίμακα.

Προφανώς δεν εμφανίζεται μόνο στην διεπιφάνεια νερού και αέρα, αλλά στην διεπιφάνεια δύο ρευστών με διαφορικές ιδιότητες. (Ενδιαφέρον για τον Μηχανικό Περιβάλλοντος έχουν π.χ. προβλήματα ρύπανσης νερού –επιφανειακού ή υπόγειου- από πετρελαιοειδή και προβλήματα αξιοποίησης γεωθερμικών ρευστών (εμφάνιση φυσαλίδων ατμού).

Αν βυθίσουμε έναν σωλήνα διαμέτρου d σε ένα δοχείο με νερό παρατηρούμε ότι το νερό ανεβαίνει στον σωλήνα.
Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις επιφανειακές τάσεις.
Για να υπολογίσουμε το ύψος ανύψωσης πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την ισορροπία μεταξύ δυνάμεων βαρύτητας και επιφανειακών τάσεων κατά την κατεύθυνση την κατακόρυφο.

Οι δυνάμεις οι οποίες οφείλονται στην επιφανειακή τάση (έλξη προς τα επάνω) ισούνται με Fσ=σπd cosθ

όπου θ είναι η γωνία μεταξύ του επιφάνειας νερού κοντά στα τοιχώματα και την κατακόρυφο διεύθυνσης.

Οι δυνάμεις βαρύτητας ισούνται με τον όγκο νερού επί το ειδικό βάρος:

$$F_G = \rho g \frac{\pi}{4} d^2 \Delta h$$

Εξισώνοντας τις δυνάμεις: $$\Delta h = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho g d}$$

Η γωνία θ μπορεί να θεωρηθεί μηδέν γα νερό.

Για κανονικές συνθήκες η ανύψωση του νερού είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου του σωλήνα. Γι' αυτό τα φαινόμενα στα οποία η επιφανειακή τάση παίζουν σημαντικό ρόλο ονομάζονται συχνά τριχοειδή φαινόμενα

(Οι διάμετροι των αγωγών είναι πολύ μικροί).

Από την εμπειρία μας είναι γνωστό ότι η ανύψωση υγρού είναι πιο σημαντική σε κύβους από ζάχαρη απ'ότι σε ένα καλαμάκι.

ΣΤΡΩΤΗ ΚΑΙ ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ

- Δύο είναι οι βασικοί τύποι ροής: **<u>στρωτή</u>** και **<u>τυρβώδης</u>**

- Η **στρωτή ροή** (laminar flow) πήρε το όνομα της από το γεγονός ότι το ρευστό ρέει σε παράλληλες στρώσεις (laminae).Στην πρίπτωση αυτή δεν λαμβάνει χώρα μακροσκοπική μίξη του ρευστού. (Αν διοχετεύσουμε λίγο χρώμα στην ροή, αυτό κινείται πάνω σε μία λεπτή ζώνη.)
- Η **τυρβώδης ροή** (turbulent flow) είναι πολύπλοκη και χαοτική. Μία από τις ιδιότητες της είναι η μακροσκοπική μίξη των ιδιοτήτων του ρευστού. (Αν εισαγάγουμε μία στρώση χρώματος διαχέεται χαοτικά σε όλο το πεδίο ροής).

- Αν η ροή είναι είναι στρωτή ή τυρβώδης εξαρτάται π.χ. από την χαρακτηριστική ταχύτητα της ροής, την γεωμετρία της και το κινηματικό ιξώδες.
- Οι παραπάνω ιδιότητες μπορούν να εκφραστούν με τον αριθμό Reynolds (**Re**).

  Re=UD/ν

  Όπου: U: χαρακτηριστική ταχύτητα, D χαρακτηριστικό μήκος, ν κινηματικό ιξώδες

- Δευτερευόντως μπορεί να επηρρεαστεί και από άλλους παράγοντες. Όπως τραχύτητα τοιχωμάτων, εξωτερικοί κραδασμοί, δυνάμεις Coriolis (περιστροφή της γης).

- Ο διαχωρισμός της ροής σε στρωτή και τυρβώδη έγινε για πρώτη φορά από τον Reynolds (1883):
- Διοχετεύοντας χρώμα σε ένα γυάλινο σωλήνα και παρατηρούσε οπτικώς τα χαρακτηριστικά της ροής.
- Για μικρές παροχές και ταχύτητες παρατηρείται μία λεπτή ίνα χρώματος η οποία έχει το ίδιο πάχος παντού (<u>στρωτή ροή</u>).
- Για μεγαλύτερες παροχές η γραμμή αυτή ταλαντώνεται
- Αυξήσουμε και άλλο την παροχή παρατηρούμε ότι το χρώμα διαχέεται σε όλη την διατομή του αγωγού.

- Στην <u>στρωτή ροή</u> εάν οι οριακές συνθήκες είναι ανεξάρτητες του χρόνου τα χαρακτηριστικά της ροής (ταχύτητες και πιέσεις) είναι και αυτή ανεξάρτητα του χρόνου

- Στην τυρβώδη ροή ακόμα και αν οι οριακές συνθήκες είναι ανεξάρτητες του χρόνου τα χαρακτηριστικά της ροής (ταχύτητες και πιέσεις) μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου (χαοτικός χαρακτήρας ροής)

ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΕΞΑΣΚΟΥΜΕΝΕΣ ΣΕ ΕΝΑ ΡΕΥΣΤΟ

Οι δυνάμεις οι οποίες δρουν απάνω σ' ένα ρευστό (περίπτωση στρωτής ροής) είναι:

- <u>Δυνάμεις όγκου</u> (βαρύτητας, ενδεχομένως μαγνητικές και φυγόκεντρες)
- <u>Επιφανειακές δυνάμεις</u> Οφείλονται σε μοριακές διεργασίες. Μπορούν όμως να εκφραστούν με μακροσκοπικές σχέσεις χωρίς να ξέρουμε την ακριβή φύση των διεργασιών

- Συναρτήσει των επιφανειακών δυνάμεων $\mathbf{F_i}$ μπορεί να εκφραστεί η τάση $\mathbf{\Sigma_i}$ απάνω σε μία στοιχειώδη επιφάνεια $\mathbf{\delta s}$: $\mathbf{\Sigma_i = F_i / \delta s}$

Επιφανειακή τάση

Στο εσωτερικό ενός υγρού ένα μόριο έλκεται με τον ίδιο τρόπο προς όλες τις κατευθύνσεις από τα άλλα μόρια που το περιβάλλουν.

Στην διεπιφάνεια μεταξύ του νερού και του αέρα η παραπάνω κατάσταση ισορροπίας δεν ισχύει. Η επιφάνεια του υγρού συμπεριφέρεται σαν μία ελαστική μεμβράνη που βρίσκεται υπό πίεση.

Αιτία για αυτήν την συμπεριφορά είναι η επιφανειακή τάση σ:

Ορίζεται σαν η δύναμη που δρα σε μία γραμμή η οποία αποτελεί το όριο μίας ελεύθερης επιφάνειας

Η επιφανειακή τάση έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ελεύθερης ποσότητας υγρού.

(Μία σταγόνα νερού τείνει να πάρει σφαιρικό σχήμα.)

Η επιφανειακή τάση επιτρέπει στο νερό να ανεβαίνει από το έδαφος στα φυτά και τα δέντρα, ανυψώνει την εδαφική υγρασία στο έδαφος και αποτελεί πηγή σφαλμάτων σε μερικά πειράματα υπό κλίμακα.

Προφανώς δεν εμφανίζεται μόνο στην διεπιφάνεια νερού και αέρα, αλλά στην διεπιφάνεια δύο ρευστών με διαφορικές ιδιότητες. (Ενδιαφέρον για τον Μηχανικό Περιβάλλοντος έχουν π.χ. προβλήματα ρύπανσης νερού –επιφανειακού ή υπόγειου- από πετρελαιοειδή και προβλήματα αξιοποίησης γεωθερμικών ρευστών (εμφάνιση φυσαλίδων ατμού).

Η επιφανειακή τάση έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ελεύθερης ποσότητας υγρού.

(Μία σταγόνα νερού τείνει να πάρει σφαιρικό σχήμα.)

Η επιφανειακή τάση επιτρέπει στο νερό να ανεβαίνει από το έδαφος στα φυτά και τα δέντρα, ανυψώνει την εδαφική υγρασία στο έδαφος και αποτελεί πηγή σφαλμάτων σε μερικά πειράματα υπό κλίμακα.

Προφανώς δεν εμφανίζεται μόνο στην διεπιφάνεια νερού και αέρα, αλλά στην διεπιφάνεια δύο ρευστών με διαφορικές ιδιότητες. (Ενδιαφέρον για τον Μηχανικό Περιβάλλοντος έχουν π.χ. προβλήματα ρύπανσης νερού –επιφανειακού ή υπόγειου- από πετρελαιοειδή και προβλήματα αξιοποίησης γεωθερμικών ρευστών (εμφάνιση φυσαλίδων ατμού).

Αν βυθίσουμε έναν σωλήνα διαμέτρου d σε ένα δοχείο με νερό παρατηρούμε ότι το νερό ανεβαίνει στον σωλήνα.
Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις επιφανειακές τάσεις.
Για να υπολογίσουμε το ύψος ανύψωσης πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την ισορροπία μεταξύ δυνάμεων βαρύτητας και επιφανειακών τάσεων κατά την κατεύθυνση την κατακόρυφο.

Οι δυνάμεις οι οποίες οφείλονται στην επιφανειακή τάση (έλξη προς τα επάνω) ισούνται με Fσ=σπd cosθ

όπου θ είναι η γωνία μεταξύ του επιφάνειας νερού κοντά στα τοιχώματα και την κατακόρυφο διεύθυνσης.

Οι δυνάμεις βαρύτητας ισούνται με τον όγκο νερού επί το ειδικό βάρος:

$$F_G = \rho g \frac{\pi}{4} d^2 \Delta h$$

Εξισώνοντας τις δυνάμεις: $$\Delta h = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho g d}$$

Η γωνία θ μπορεί να θεωρηθεί μηδέν γα νερό.

Για κανονικές συνθήκες η ανύψωση του νερού είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου του σωλήνα. Γι' αυτό τα φαινόμενα στα οποία η επιφανειακή τάση παίζουν σημαντικό ρόλο ονομάζονται συχνά τριχοειδή φαινόμενα

(Οι διάμετροι των αγωγών είναι πολύ μικροί).

Από την εμπειρία μας είναι γνωστό ότι η ανύψωση υγρού είναι πιο σημαντική σε κύβους από ζάχαρη απ' ότι σε ένα καλαμάκι το οποίο έχει μεγαλύτερη διάμετρο.

- ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Στις περισσότερες περιπτώσεις το νερό μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστο. Όταν παρατηρείται μεγάλη αλλαγή πίεσης η συμπιεστότητα γίνεται σημαντική. Η αλλαγή του όγκου νερού λόγω της πίεσης υπολογίζεται από τον νόμο του Hook:

$$\Delta p = E_w \frac{\Delta V}{V}$$

Δp η μεταβολή της πίεσης [kN/m2]
ΔV η μεταβολή του όγκου [m3]
V ο αρχικός όγκος [m3]
E_w η σταθερά ελαστικότητας ρου νερού [kN/m2]

ταχύτητα μετάδοσης ελαστικού κύματος: α