

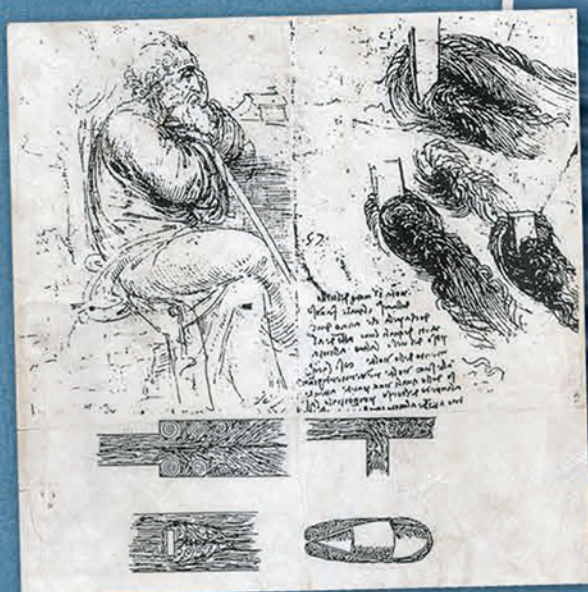
Παναγιώτης Πρίνος

Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ

Μηχανική Ρευστών

Ασυμπίεστα Ρευστά
Θεωρία, ασκήσεις

2η έκδοση



Π. Πρίνος
Μηχανική Ρευστών
Ασυμπίεστα ρευστά - Θεωρία και ασκήσεις

ISBN 978-960-456-660-0

© Copyright, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Π. Πρίνος, 2η έκδοση, Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2026

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

Φωτοστοιχειοθεσία	Π. ΖΗΤΗ & Σια ΙΚΕ
Εκτύπωση	18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας
Βιβλιοδεσία	Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19
	Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ - ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΘΕΣΗ:

Αρμενοπούλου 27, 546 35 Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310.203.720, Fax: 2310.211.305 • e-mail: sales@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ - ΠΩΛΗΣΗ ΛΙΑΝΙΚΗ-ΧΟΝΔΡΙΚΗ:

Χαριλάου Τρικούπη 22, 106 79 Αθήνα
Τηλ.-Fax: 210.3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: www.ziti.gr

*Scientists discover the world that exists;
engineers create the world that never was.*

Theodore Von Karman

(1881-1963, Ουγγροαμερικανός επιστήμονας)

Πρόλογος

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται στους φοιτητές/τριες των Τμημάτων Πολιτικών Μηχανικών αλλά και άλλων Τμημάτων Πολυτεχνικών Σχολών που διδάσκονται το μάθημα της Μηχανικής Ρευστών. Το αντικείμενο αυτό παρέχει το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο για τα περισσότερα εφαρμοσμένα μαθήματα (Υδραυλική, Υδρεύσεις, Αποχετεύσεις) του Τομέα Υδραυλικής, Υδραυλικών Έργων και Τεχνικής Περιβάλλοντος.

Η Μηχανική Ρευστών είναι ένα ευρύ θεωρητικό αντικείμενο με πολλές σημαντικές εφαρμογές. Τα περισσότερα προβλήματα απαιτούν όχι μόνο τη θεωρητική γνώση του αντικειμένου αλλά και φυσική “διαίσθηση”, κατάλληλη αξιολόγηση και εμπειρία. Η σύνδεση μεταξύ της θεωρητικής γνώσης και της σωστής εφαρμογής αυτής της γνώσης αποτελεί τον κύριο στόχο του βιβλίου αυτού.

Το βιβλίο περιλαμβάνει όλα τα βασικά κεφάλαια για την κατανόηση των βασικών φυσικών εννοιών, την εφαρμογή των αρχών διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων και την περιγραφή χαρακτηριστικών ροών (σε σωλήνες και γύρω από αντικείμενα). Έμφαση δίνεται στην κατανόηση των σχετικών φυσικών φαινομένων με την ελάχιστη αλλά απαραίτητη μαθηματική ανάλυση για την περιγραφή και εξήγηση των φυσικών νόμων. Σε κάθε κεφάλαιο υπάρχουν παραδείγματα τα οποία αποσκοπούν στην κατανόηση των βασικών εννοιών και φαινομένων, δίνοντας έμφαση στη μεθοδολογία αντιμετώπισης και επίλυσης προβλημάτων. Για τον ίδιο σκοπό στο τέλος κάθε κεφαλαίου υπάρχουν λυμένες ασκήσεις και ασκήσεις για λύση, συναφείς και σχετικές με το περιεχόμενο του, που θα βοηθήσουν σημαντικά τον φοιτητή στις εξετάσεις.

Στα τέσσερα πρώτα κεφάλαια αναλύονται μερικές από τις θεμελιώδεις έννοιες της κίνησης των ρευστών, όπως οι σημαντικές χαρακτηριστικές ιδιότητες των ρευστών, οι μεταβολές της πίεσης σε ακίνητο ή κινούμενο ρευστό, η κινηματική του ρευστού και μέθοδοι περιγραφής και ανάλυσης της ροής.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται και αναλύεται η εξίσωση Bernoulli, με αρκετές πρακτικές εφαρμογές, έτσι ώστε ο φοιτητής να αντιληφθεί την αλληλεπίδραση μεταξύ της κίνησης του ρευστού και της μεταβολής της πίεσης σε ένα ροϊκό πεδίο. Στο Κεφάλαιο 4 περιλαμβάνονται τα σημαντικά στοιχεία της Κινηματικής

του ρευστού με ανάλυση των μεθοδολογιών κατά Euler και Lagrange για την περιγραφή της ροής.

Στα Κεφάλαια 5 και 6 δίνεται έμφαση στη μαθηματική ανάλυση της ροής, στην εφαρμογή των βασικών αρχών διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας στη μηχανική των ρευστών και στην επιλογή και χρήση πεπερασμένων η απειροστών όγκων ελέγχου για την επίλυση προβλημάτων. Το Κεφάλαιο 7 αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα της χρήσης της διαστατικής ανάλυσης και προσομοίωσης για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, την εξαγωγή συμπερασμάτων και τον σχεδιασμό πειραμάτων με κατάλληλα εργαστηριακά μοντέλα (ομοιώματα).

Τέλος στα Κεφάλαια 8 και 9 αναλύονται πρακτικά θέματα σχετικά με εσωτερικές ροές (ροή σε σωλήνες) και εξωτερικές ροές (ροή οριακού στρώματος, ροή γύρω από αντικείμενα).

Για την ολοκλήρωση του βιβλίου συνέβαλαν αρκετοί, είτε άμεσα είτε έμμεσα, και ιδιαίτερα η κ. Ολυμπία Καζαντζόγλου με τη συγγραφή των σημειώσεων που βασίστηκε το βιβλίο αυτό και ο εκδοτικός οίκος Ζήτη με τον άψογο σχεδιασμό των σχημάτων, τη βιβλιοδέτηση και την εκτύπωση, τους οποίους και ευχαριστώ ολόθερμα. Επίσης αρκετοί φοιτητές και συνάδελφοι με τις επισημάνσεις τους για λάθη στην προηγούμενη έκδοση του βιβλίου.

Η διδασκαλία του μαθήματος για πολλά χρόνια στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του ΑΠΘ, η δυσκολία κατανόησης αρκετών βασικών εννοιών και η σημαντική προσπάθεια που καταβάλλουν οι φοιτητές για την επιτυχή εξέταση τους στο μάθημα αποτελούν τους πιο σημαντικούς παράγοντες για τη συγγραφή αυτού του βιβλίου.

Ελπίζω ότι οι φοιτητές που θα μελετήσουν το βιβλίο αυτό και θα προσπαθήσουν να λύσουν αντιπροσωπευτικές ασκήσεις από αυτές που προτείνονται στο τέλος κάθε κεφαλαίου θα αποκτήσουν μία σημαντική και χρήσιμη γνώση των βασικών αρχών της Μηχανικής Ρευστών.

Ο Συγγραφέας
Παναγιώτης Πρίνος
Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	4
<i>Εισαγωγή – Ιδιότητες ρευστών</i>	
1.1 Εισαγωγή	3
1.2 Χαρακτηριστικά των ρευστών	4
1.3 Το ρευστό ως συνεχές μέσο (continuum)	8
1.4 Διαστάσεις και μονάδες	9
1.5 Μετρήσεις της μάζας και του βάρους	12
1.5.1 Πυκνότητα	12
1.5.2 Ειδικό βάρος	13
1.5.3 Ειδική βαρύτητα	14
1.6 Νόμος ιδανικών αερίων	14
1.7 Ιξώδες	15
1.8 Συμπιεστότητα Ρευστών	25
1.8.1 Μέτρο Ελαστικότητας	25
1.8.2 Συμπίεση και διαστολή των αερίων	27
1.8.3 Ταχύτητα του ήχου	28
1.9 Πίεση ατμού	29
1.10 Επιφανειακή τάση	30
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	 39
<i>Υδροστατική</i>	
2.1 Πίεση σε ένα σημείο	41
2.2 Βασική εξίσωση για το πεδίο πίεσης	43
2.3 Μεταβολή της πίεσης σε ένα ακίνητο ρευστό	45
2.3.1 Ασυμπίεστο ρευστό	46
2.3.2 Συμπίεστο ρευστό	49
2.4 Ατμοσφαιρική πίεση	50

2.5	Μέτρηση της πίεσης	53
2.6	Μανόμετρα	56
2.6.1	Πιεζομετρικός σωλήνας	56
2.6.2	Μανόμετρο τύπου U	57
2.6.3	Κεκλιμένο μανόμετρο	61
2.7	Μηχανικά και ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης της πίεσης	63
2.8	Υδροστατική δύναμη σε επίπεδη επιφάνεια	66
2.9	Πρίσμα πίεσης	74
2.10	Υδροστατική δύναμη σε καμπύλη επιφάνεια	80
2.11	Υδροστατική δύναμη σε ρευστά με στρωμάτωση	83
2.12	Άνωση, επίπλευση και ευστάθεια	88
2.12.1	Η αρχή του Αρχιμήδη	88
2.12.2	Ευστάθεια	91
2.13	Μεταβολή πίεσης σε ρευστό με κίνηση στερεού σώματος	93
2.13.1	Γραμμική κίνηση	94
2.13.2	Περιστροφή στερεού σώματος	97
	Λυμένες ασκήσεις	100
	Ασκήσεις για λύση	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Στοιχειώδης Δυναμική των Ρευστών – Η εξίσωση Bernoulli		121
3.1	Δεύτερος νόμος του Νεύτωνα	123
3.2	$F = ma$ κατά μήκος μιας ροϊκής γραμμής	127
3.3	$F = ma$ κάθετα σε μια ροϊκή γραμμή	133
3.4	Φυσική ερμηνεία	137
3.5	Στατική, δυναμική, ολική πίεση και πίεση ανακοπής	142
3.6	Παραδείγματα εφαρμογής της εξίσωσης Bernoulli	148
3.6.1	Ελεύθερες φλέβες	148
3.6.2	Εσωτερικές ροές	151
3.6.3	Μέτρηση παροχής	160
3.7	Γραμμή Ενέργειας και Πιεζομετρική Γραμμή	166
3.8	Περιορισμοί στη χρήση της εξίσωσης Bernoulli	170
3.8.1	Επιδράσεις συμπιεστότητας	170
3.8.2	Μη μόνιμες επιδράσεις	174
3.8.3	Επιδράσεις περιστροφής	177

Λυμένες ασκήσεις	180
Ασκήσεις για λύση	183

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Κινηματική του ρευστού

4.1 Το πεδίο ταχύτητας	191
4.1.1 Eulerian και Lagrangian περιγραφή της ροής	194
4.1.2 Μονοδιάστατες, διδιάστατες και τριδιάστατες ροές	196
4.1.3 Μόνιμη και μη μόνιμη ροή	197
4.1.4 Ροϊκές γραμμές (streamlines), ακολουθίες (streaklines) και τροχιές (Pathlines)	198
4.2 Το πεδίο επιτάχυνσης	202
4.2.1 Η υλική παράγωγος	203
4.2.2 Μη μόνιμες επιδράσεις	207
4.2.3 Επιδράσεις συναγωγής	208
4.2.4 Συντεταγμένες κατά μήκος και κάθετα σε ροϊκές γραμμές	210
4.3 Κινηματική στοιχειώδους σωματιδίου	213
4.3.1 Γραμμική κίνηση και παραμόρφωση	214
4.3.2 Γωνιακή κίνηση και παραμόρφωση	216
4.4 Σύστημα και όγκος ελέγχου	220
4.5 Το θεώρημα μεταφοράς Reynolds	223
4.5.1 Εξαγωγή του θεωρήματος μεταφοράς Reynolds	225
4.5.2 Φυσική ερμηνεία	234
4.5.3 Σχέση με την υλική παράγωγο	235
4.5.4 Μόνιμες επιδράσεις	236
4.5.5 Μη μόνιμες επιδράσεις	237
4.5.6 Κινούμενος όγκος ελέγχου	239
4.5.7 Η επιλογή ενός όγκου ελέγχου	242
Λυμένες ασκήσεις	244
Ασκήσεις για λύση	246

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ανάλυση της ροής σε όγκο ελέγχου

5.1 Διατήρηση της μάζας – Εξίσωση συνέχειας	258
5.1.1 Εξαγωγή της εξίσωσης συνέχειας	258

5.1.2	Σταθερός, αμετάβλητος όγκος ελέγχου	261
5.1.3	Κινούμενος, αμετάβλητος όγκος ελέγχου	266
5.1.4	Μεταβαλλόμενος όγκος ελέγχου	269
5.2	Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα	
	– Η γραμμική ορμή και η εξίσωση της ροπής της ορμής (στροφορμής)	271
5.2.1	Εξαγωγή της εξίσωσης της γραμμικής ορμής	271
5.2.2	Εφαρμογή της εξίσωσης γραμμικής ορμής	273
5.2.3	Η εξίσωση της στροφορμής	288
5.2.4	Η εφαρμογή της εξίσωσης της στροφορμής	290
5.3	Πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής – Η εξίσωση ενέργειας	297
5.3.1	Εξαγωγή της εξίσωσης ενέργειας	297
5.3.2	Η εφαρμογή της εξίσωσης ενέργειας	302
5.3.3	Εξίσωση ενέργειας και εξίσωση Bernoulli	306
5.3.4	Η εφαρμογή της εξίσωσης ενέργειας σε ανομοιόμορφη ροή	311
5.4	Δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής	314
5.4.1	Η εξίσωση ενέργειας σε ημι-απειροστό όγκο ελέγχου	314
5.4.2	Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής σε ημι-απειροστό όγκο ελέγχου	315
5.4.3	Συνδυασμός των εξισώσεων του 1ου και του 2ου νόμου της θερμοδυναμικής	317
5.4.4	Εφαρμογή της εξίσωσης ενέργειας με απώλειες	318
	Λυμένες ασκήσεις	320
	Ασκήσεις για λύση	328

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Διαφορική ανάλυση της ροής – Εξισώσεις Navier-Stokes 341

6.1	Διατήρηση της μάζας	343
6.1.1	Διαφορική μορφή της εξίσωσης συνέχειας	344
6.1.2	Κυλινδρικές πολικές συντεταγμένες	347
6.1.3	Η ροϊκή συνάρτηση	348
6.2	Διατήρηση της γραμμικής ορμής	352
6.2.1	Δυνάμεις σε απειροστό στοιχείο	353
6.2.2	Εξισώσεις της κίνησης	356
6.3	Μη συνεκτική ροή	357
6.3.1	Εξισώσεις Euler	357
6.3.2	Αστρόβιλη ροή	358

6.3.3	Δυναμικό της ταχύτητας	361
6.4	Συνεκτική ροή	364
6.4.1	Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων	364
6.4.2	Οι εξισώσεις Navier-Stokes	365
6.5	Αναλυτικές λύσεις για συνεκτικά, ασυμπίεστα ρευστά	367
6.5.1	Μόνιμη, στρωτή ροή μεταξύ σταθερών, παράλληλων πλακών	367
6.5.2	Ροή Couette	370
6.5.3	Μόνιμη, στρωτή ροή σε σωλήνα	372
6.5.4	Μόνιμη, στρωτή ροή σε δακτύλιο	375
6.6	Βασικές ροές ιδεατών ρευστών	379
6.6.1	Ομοιόμορφη ροή	381
6.6.2	Πηγή και καταβόθρα	382
6.6.3	Στρόβιλος (Vortex)	384
6.6.4	Δίπολο (Doublet)	389
6.7	Επαλληλία βασικών, επίπεδων δυναμικών ροών	392
6.7.1	Πηγή σε ένα ομοιόμορφο ροϊκό πεδίο – Μισό σώμα (Half-Body)	392
6.7.2	Rankine οβάλ	396
6.7.3	Ροή γύρω από κυκλικό κύλινδρο	399
	Λυμένες ασκήσεις	407
	Ασκήσεις για λύση	415

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Διαστατική ανάλυση, ομοιότητα και μοντελοποίηση

7.1	Διαστατική ανάλυση	429
7.2	Θεώρημα Π του Buckingham	433
7.3	Προσδιορισμός των Π όρων	434
7.4	Χαρακτηριστικά διαστατικής ανάλυσης	444
7.4.1	Επιλογή των μεταβλητών	444
	(1) Γεωμετρία	445
	(2) Ιδιότητες υλικού	445
	(3) Εξωτερικές επιδράσεις	445
7.4.2	Προσδιορισμός των διαστάσεων αναφοράς	447
7.4.3	Μοναδικότητα των Π όρων	447
7.5	Προσδιορισμός των Π όρων με επιθεώρηση	449
7.6	Χαρακτηριστικοί αδιάστατοι αριθμοί	451
7.7	Συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων	458

7.7.1	Προβλήματα με έναν Π όρο	458
7.7.2	Προβλήματα με δύο ή περισσότερους Π όρους	460
7.8	Ομοιότητα και μοντελοποίηση	464
7.8.1	Θεωρία μοντέλων	465
7.8.2	Κλίμακες μοντέλου	470
7.8.3	Πρακτικά θέματα της χρήσης μοντέλων	471
7.9	Χαρακτηριστικές μελέτες μοντέλων	474
7.9.1	Ροή σε κλειστούς αγωγούς	474
7.9.2	Ροή γύρω από βυθισμένα σώματα	478
7.9.3	Ροή με ελεύθερη επιφάνεια	483
	Λυμένες ασκήσεις	489
	Ασκήσεις για λύση	498

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

505

Στρωτή και τυρβώδης ροή σε σωλήνες

8.1	Χαρακτηριστικά στρωτής και τυρβώδους ροής	507
8.1.1	Περιοχή εισόδου και πλήρως αναπτυγμένη ροή	510
8.1.2	Πίεση και διατμητική τάση	512
8.2	Στρωτή ροή σε σωλήνες	515
8.2.1	Εφαρμογή του 2ου νόμου του Νεύτωνα σε ένα στοιχείο του ρευστού	515
8.2.2	Από τις εξισώσεις Navier-Stokes	522
8.2.3	Από διαστατική ανάλυση	524
8.2.4	Εξίσωση ενέργειας	526
8.3	Πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδης ροή	527
8.3.1	Μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή	528
8.3.2	Τυρβώδεις διατμητικές τάσεις	530
8.3.3	Προσομοίωση των τυρβωδών τάσεων – Μοντέλα τύρβης	538
8.3.4	Προφίλ ταχύτητας σε λεία και τραχεία τυρβώδη ροή	542
8.4	Διαστατική ανάλυση της ροής σε σωλήνα	550
8.4.1	Το διάγραμμα Moody	550
8.4.2	Τοπικές απώλειες	560
	Λυμένες ασκήσεις	574
	Ασκήσεις για λύση	581

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9***Εξωτερικές ροές – Οριακή στοιβάδα***

589

9.1	Γενικά χαρακτηριστικά των εξωτερικών ροών	592
9.1.1	Οι έννοιες της αντίστασης (οπισθέλκουσας - Drag) και της άντωσης (δυναμικής άνωσης - Lift)	594
9.1.2	Χαρακτηριστικά της ροής γύρω από ένα αντικείμενο	599
9.2	Χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος	606
9.2.1	Δομή και πάχος οριακού στρώματος σε επίπεδη πλάκα	606
9.2.2	Επίλυση οριακού στρώματος κατά Prandtl / Blasius	613
9.2.3	Ολοκληρωματική εξίσωση ορμής για οριακό στρώμα σε επίπεδη πλάκα	619
9.2.4	Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή	627
9.2.5	Τυρβώδεις οριακό στρώμα	630
9.2.6	Επιδράσεις κλίσης πίεσης	637
9.2.7	Ολοκληρωματική εξίσωση ορμής για οριακό στρώμα με μη μηδενική κλίση πίεσης	643
9.3	Οπισθέλκουσα (αντίσταση) (Drag)	645
9.3.1	Οπισθέλκουσα (αντίσταση) λόγω τριβής	646
9.3.2	Οπισθέλκουσα (αντίσταση) λόγω πίεσης	649
9.3.3	Δεδομένα συντελεστή οπισθέλκουσας και παραδείγματα	652
	Επίδραση του Σχήματος	653
	Επίδραση του αριθμού Reynolds	654
	Επίδραση της συμπίεστικότητας	660
	Επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας	662
	Επίδραση του αριθμού Froude	665
	Οπισθέλκουσα σύνθετου σώματος	667
9.4	Άντωση (Δυναμική άνωση, Lift)	675
9.4.1	Κατανομή της επιφανειακής πίεσης	675
	Λυμένες ασκήσεις	687
	Ασκήσεις για λύση	694

Βιβλιογραφία	703
---------------------------	------------

Αγγλο-ελληνική ορολογία	709
--------------------------------------	------------

Ευρετήριο όρων	717
-----------------------------	------------

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή – Ιδιότητες ρευστών



1.1 Εισαγωγή

Η μηχανική των ρευστών είναι η επιστήμη που ασχολείται με τα ρευστά είτε αυτά είναι σε κίνηση (δυναμική των ρευστών) ή σε κατάσταση ηρεμίας (στατική των ρευστών) και τις επακόλουθες αλληλεπιδράσεις των ρευστών με διάφορα όρια, τα οποία μπορεί να είναι είτε στερεές επιφάνειες είτε διεπιφάνειες με άλλα ρευστά. Και τα αέρια και τα υγρά έχουν ταξινομηθεί ως ρευστά, και ο αριθμός των ρευστο-μηχανικών εφαρμογών είναι τεράστιος. Στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού οι τεχνολογικές εφαρμογές που σχετίζονται με το νερό (Σωλήνες και Κανάλια μεταφοράς νερού, Δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης και άρδευσης, Έργα αντιπλημμυρικής προστασίας, Φράγματα, Υδροηλεκτρικά έργα μεταξύ άλλων) βασίζονται στις αρχές διατήρησης της μάζας, ορμής και ενέργειας και στη σωστή εφαρμογή τους.

Η ροή των ρευστών είναι ένας κλάδος της μηχανικής που ικανοποιεί μια σειρά από καλά τεκμηριωμένους βασικούς νόμους της φυσικής, και έτσι υπάρχει και είναι διαθέσιμο ένα σημαντικό θεωρητικό υπόβαθρο για την αντιμετώπιση και λύση πολλών πρακτικών προβλημάτων. Ωστόσο, η θεωρία είναι συχνά ανεπαρκής, διότι εφαρμόζεται κυρίως σε ιδανικές καταστάσεις που μπορεί να μην προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πράξη και οι παραδοχές που θεωρούνται να μην ισχύουν. Τα δύο μεγαλύτερα εμπόδια για μια λειτουργική θεωρία είναι η γεωμετρία και το ιξώδες. Οι βασικές εξισώσεις της κίνησης του ρευστού (Κεφάλαιο 6) είναι πολύ δύσκολο να επιλυθούν (αναλυτικά ή αριθμητικά) σε πεδία σύνθετης και πολύπλοκης γεωμετρίας. Έτσι, τα περισσότερα βιβλία επικεντρώνονται σε επίπεδες πλάκες, σωλήνες και άλλα απλά γεωμετρικά πεδία. Με την ανάπτυξη των υπολογιστών είναι δυνατόν να εφαρμοστούν αριθμητικές τεχνικές για πολύπλοκες γεωμετρίες, και τα τελευταία χρόνια η υπολογιστική ρευστοδυναμική και οι μέθοδοι που εφαρμόζονται (πεπερασμένες διαφορές, πεπερασμένα στοιχεία, πεπερασμένοι όγκοι) για τη μετατροπή των βασικών διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές έχουν αναπτυχθεί σημαντικά και έχουν δώσει λύσεις σε αρκετά σύνθετα προβλήματα.

Το δεύτερο εμπόδιο σε μια εφαρμόσιμη θεωρία είναι η δράση του ιξώδους, η οποία μπορεί να αγνοηθεί μόνο σε ορισμένες ιδανικές ροές (Κεφάλαιο 3). Το ιξώδες αυξάνει τη δυσκολία των βασικών εξισώσεων, αν και η προσέγγιση του οριακού στρώματος που βρέθηκε από τον L. Prandtl το 1904 (Κεφάλαιο 9) έχει απλοποιήσει σε μεγάλο βαθμό την ανάλυση της συνεκτικής ροής. Επίσης, το ιξώδες έχει αποσταθεροποιητικές επιπτώσεις σε όλα τα ρευστά, προκαλώντας, ακό-

μα και για μικρές ταχύτητες, ένα άτακτο τυχαίο φαινόμενο που ονομάζεται τύρβη. Η θεωρία της τυρβώδους ροής είναι αρκετά γενική και σε μεγάλο βαθμό υποστηρίζεται από πειράματα, αν και τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αριθμητικά μοντέλα τύρβης και τεχνικές προσομοίωσης των μεγάλων δινών που συνεισφέρουν σημαντικά στην επίλυση σημαντικών εφαρμογών (Κεφάλαιο 8).

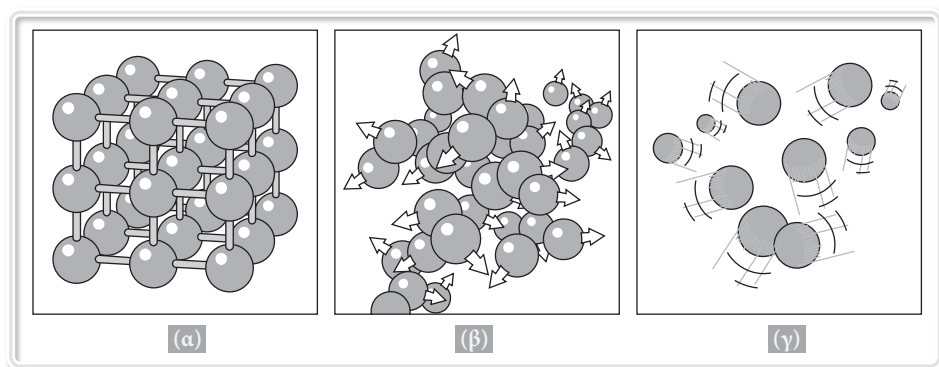
Έτσι, υπάρχει η θεωρία που χρησιμοποιείται για τα προβλήματα της ροής των ρευστών, αλλά σε όλες τις περιπτώσεις θα πρέπει να υποστηρίζεται από το πείραμα. Συχνά, τα πειραματικά δεδομένα παρέχουν την κύρια πηγή πληροφοριών σχετικά με συγκεκριμένες ροές, όπως η αντίσταση (οπισθέλκουσα) και η άντωση (δυναμική άνωση) αντικειμένων (σωμάτων) βυθισμένων στο ρευστό (Κεφάλαιο 9). Στη μηχανική των ρευστών υπάρχουν εξαιρετικά όργανα μέτρησης των βασικών χαρακτηριστικών της ροής (πίεση, ταχύτητα, παροχή κλπ) και η χρήση της διαστατικής ανάλυσης και της προσομοίωσης (μοντελοποίησης) (Κεφάλαιο 7) είναι αρκετά διαδεδομένη. Έτσι το πείραμα (στο εργαστήριο ή στο πεδίο) παρέχει ένα φυσικό και εύκολο συμπλήρωμα της θεωρίας.

1.2 Χαρακτηριστικά των ρευστών

Από την άποψη της μηχανικής των ρευστών, η ύλη αποτελείται από ρευστά και στερεά. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι απόλυτα προφανής με μία απλή παρατήρηση, αλλά, από επιστημονική ή τεχνολογική άποψη θα πρέπει η διαφορά αυτή να διατυπωθεί ειδικότερα. Οι διαφορές μεταξύ στερεών και ρευστών μπορούν να εξηγηθούν ποιοτικά με βάση τη μοριακή δομή τους και με βάση τη συμπεριφορά τους στη δράση εξωτερικών δυνάμεων.

Τα μόρια σε ένα στερεό είναι διατεταγμένα σε ένα μοτίβο που επαναλαμβάνεται σε όλο το στερεό. Λόγω των μικρών αποστάσεων μεταξύ των μορίων σε ένα στερεό, οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων είναι μεγάλες και διατηρούν τα μόρια σε σταθερές θέσεις (Σχήμα 1.1).

Η μοριακή απόσταση στην υγρή φάση δεν είναι πολύ διαφορετική από εκείνη της στερεάς φάσης, εκτός από το ότι τα μόρια δεν είναι πλέον σε σταθερές θέσεις μεταξύ τους και μπορούν να περιστρέφονται και να μετακινούνται ελεύθερα. Σε ένα υγρό, οι διαμοριακές δυνάμεις είναι ασθενέστερες σε σχέση με τα στερεά, αλλά πιο ισχυρές σε σύγκριση με τα αέρια. Στην αέρια φάση, η απόσταση μεταξύ των μορίων είναι πολύ μεγάλη και δεν υπάρχει ένα καθορισμένο μοτίβο. Τα μόρια του αερίου κινούνται τυχαία, συγκρούονται συνεχώς μεταξύ τους όπως επί-

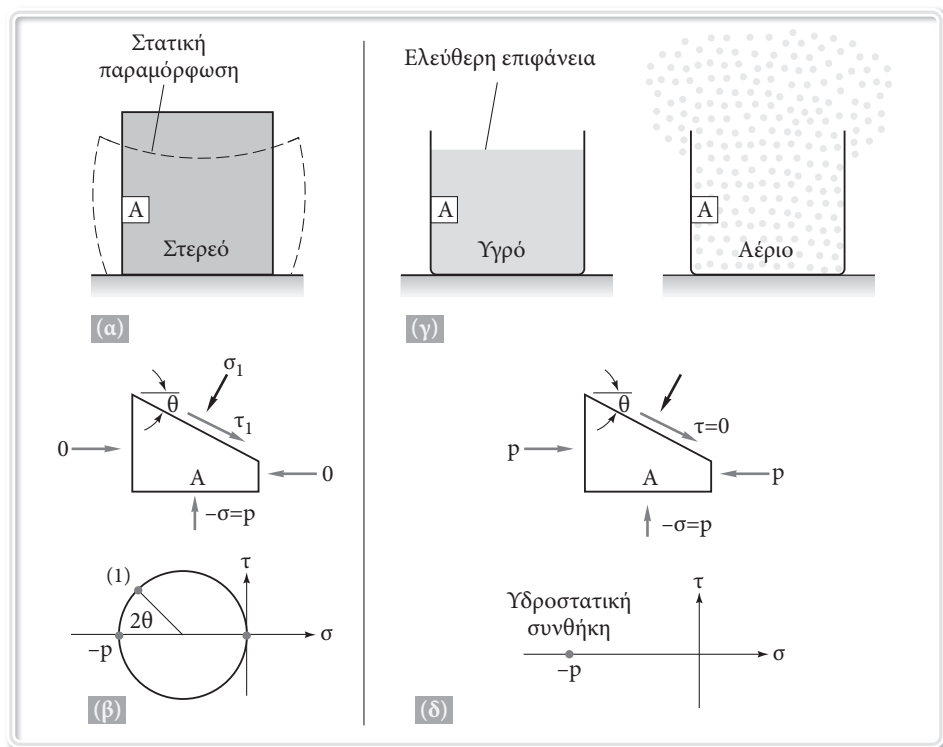


Σχήμα 1.1. Η διάταξη των μορίων σε στερεό, υγρό και αέριο (α) μόρια σε σχετικά σταθερές θέσεις σε στερεό, (β) κίνηση μορίων σε υγρά, (γ) κίνηση μορίων σε αέρια.

σης και στα τοιχώματα του δοχείου στο οποίο περιέχονται. Ιδιαίτερα σε χαμηλές πυκνότητες, οι διαμοριακές δυνάμεις είναι πολύ μικρές και οι συγκρούσεις είναι ο μόνος τρόπος αλληλεπίδρασης μεταξύ των μορίων. Τα μόρια σε αέρια φάση βρίσκονται σε σημαντικά υψηλότερο επίπεδο ενέργειας από ό,τι είναι σε υγρή ή στερεή φάση. Ως εκ τούτου, το αέριο πρέπει να απελευθερώσει ένα μεγάλο ποσό της ενέργειας του πριν να συμπυκνωθεί ή να ψυχθεί.

Η τεχνική διάκριση έγκειται στην αντίδραση των δύο σε μία εφαρμοζόμενη διατμητική ή εφαπτομενική τάση (δύναμη ανά εμβαδό επιφάνειας). **Ένα στερεό μπορεί να αντισταθεί σε μια διατμητική τάση με μία στατική παραμόρφωση ενώ ένα ρευστό δεν μπορεί.** Η εφαρμογή μιας διατμητικής τάσης σε ένα ρευστό, όσο μικρή και αν είναι, θα έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση του ρευστού. Το ρευστό κινείται και παραμορφώνεται συνεχώς για όσο διάστημα εφαρμόζεται η διατμητική τάση. Ως επιστέγασμα, μπορούμε να πούμε ότι ένα ρευστό σε ηρεμία είναι σε κατάσταση μηδενικής διατμητικής τάσης. Με βάση τον παραπάνω ορισμό για το ρευστό, υπάρχουν δύο κατηγορίες ρευστών, τα υγρά και τα αέρια. Και πάλι η διάκριση είναι τεχνικής φύσεως σχετική με την επίδραση των συνεκτικών δυνάμεων. Ένα υγρό, που αποτελείται από μόρια σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, με ισχυρές δυνάμεις συνοχής, τείνει να διατηρήσει τον όγκο του και θα σχηματίσει μία ελεύθερη επιφάνεια σε ένα βαρυντικό πεδίο, αν είναι ελεύθερο από πάνω. Οι ροές με ελεύθερη επιφάνεια κυριαρχούνται από τις επιδράσεις της βαρύτητας. Δεδομένου ότι τα μόρια του αερίου είναι σε μεγάλη απόσταση με αμελητέες συνεκτικές δυνάμεις, ένα αέριο είναι ελεύθερο να επεκταθεί μέχρι να συναντήσει στερεά τοιχώματα. Ένα αέριο δεν έχει καθορισμένο όγκο και όταν δεν περιορίζεται, σχηματίζει μια ατμόσφαιρα η οποία είναι ουσιαστικά υδροστατική. Η υδροστατική συμπεριφορά των υγρών και των αερίων αναλύεται στο Κεφάλαιο 2.

Το Σχήμα 1.2α απεικονίζει ένα στερεό μπλοκ σε μία άκαμπτη επιφάνεια. Το στερεό υπόκειται σε μία στατική παραμόρφωση λόγω του βάρους του, που φαίνεται στο σχήμα με διακεκομμένη γραμμή (αρκετά παραμορφωμένη για λόγους ευκρίνειας), χωρίς να ρέει. Το διάγραμμα ελευθέρου σώματος για το στοιχείο A στην πλευρά του μπλοκ δείχνει ότι υπάρχει διάτμηση στο μπλοκ κατά μήκος ενός επιπέδου σε γωνία θ μέσω του A. Δεδομένου ότι οι πλευρές του μπλοκ δεν υποστηρίζονται, το στοιχείο A έχει μηδενική τάση στην αριστερή και δεξιά πλευρά και ορθή τάση (τάση συμπίεσης) $\sigma = -p$ στην πάνω και κάτω πλευρά. Ο κύκλος του Mohr δεν μειώνεται σε ένα σημείο, και υπάρχει μη μηδενική διατμητική τάση στο μπλοκ.



Σχήμα 1.2. (α) Στατική Παραμόρφωση στερεού, ισορροπία και κύκλος του Mohr για στερεό στοιχείο A, (β) Υγρό και αέριο, ισορροπία και κύκλος του Mohr για ρευστό στοιχείο A.

Σε αντίθεση, το υγρό και το αέριο σε κατάσταση ηρεμίας (Σχήμα 1.2γ) χρειάζονται τοιχώματα για την εξάλειψη της διατμητικής τάσης. Τα τοιχώματα ασκούν μια τάση συμπίεσης $\sigma = -p$ και μειώνουν τον κύκλο του Mohr σε ένα σημείο με

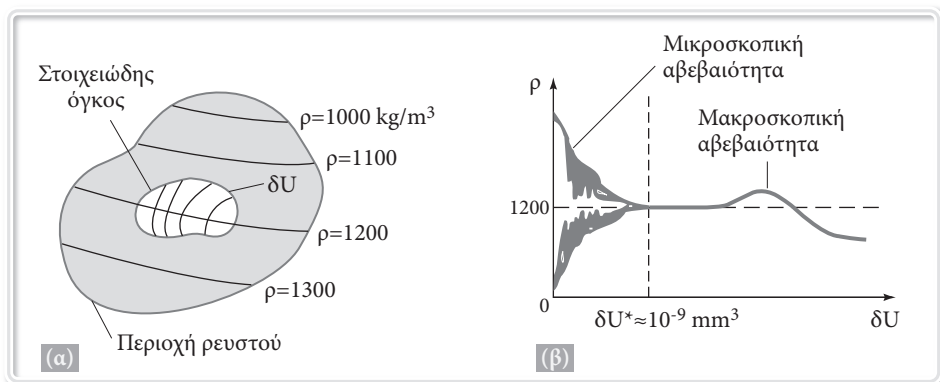
μηδενική διάτμηση παντού, δηλαδή, υδροστατική κατάσταση. Το υγρό διατηρεί τον όγκο του και σχηματίζει μία ελεύθερη επιφάνεια στο δοχείο. Εάν αφαιρεθούν τα τοιχώματα, αναπτύσσεται διάτμηση στο υγρό με αποτέλεσμα την κίνηση του υγρού. Εάν το δοχείο είναι κεκλιμένο, και πάλι αναπτύσσεται διάτμηση, σχηματίζονται κυματισμοί και η ελεύθερη επιφάνεια τείνει να γίνει οριζόντια. Το αέριο δεν συγκρατείται και επεκτείνεται έξω από το δοχείο, γεμίζοντας όλο το διαθέσιμο χώρο. Το στοιχείο Α στο αέριο είναι επίσης υδροστατικό και ασκεί μια τάση συμπίεσης $\sigma = -p$ στα τοιχώματα.

Στην παραπάνω ανάλυση, υπάρχουν σαφείς διαφοροποιήσεις σχετικές με τα στερεά, υγρά και αέρια. Στα περισσότερα προβλήματα μηχανικής ρευστών ασχολούμαστε με κοινά υγρά, όπως το νερό, το πετρέλαιο, ο υδράργυρος, η βενζίνη, και με κοινά αέρια, όπως ο αέρας, το ήλιο, το υδρογόνο και ο ατμός, σε συνθήκες τυπικών θερμοκρασιών και πιέσεων. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές οριακές περιπτώσεις τις οποίες θα πρέπει να γνωρίζουμε. Ορισμένες φαινομενικά «στερεές» ουσίες, όπως η άσφαλτος, ασκούν αντίσταση στις διατμητικές τάσεις για μικρό χρονικό διάστημα, αλλά στην πραγματικότητα παραμορφώνονται αργά και παρουσιάζουν σαφή ρευστή συμπεριφορά για μεγάλες χρονικές περιόδους. Άλλες ουσίες, κυρίως κολλοειδή και κονιάματα, αντιστέκονται σε μικρές διατμητικές τάσεις, αλλά 'υποχωρούν' σε μεγάλες τάσεις και αρχίζουν να ρέουν όπως και τα υγρά. Η μελέτη της γενικότερης παραμόρφωσης και της ροής, είναι ένα εξειδικευμένο πεδίο που ονομάζεται **ρεολογία**. Επίσης, τα υγρά και τα αέρια μπορούν να συνυπάρξουν σε μίγματα δύο φάσεων, όπως μίγματα ατμού-νερού ή νερό με παγιδευμένες φυσαλίδες αέρα. Η ανάλυση των λεγόμενων **διφασικών ροών** αποτελεί ένα εξειδικευμένο αντικείμενο με πολλές εφαρμογές. Τέλος, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η διάκριση μεταξύ υγρού και αερίου δεν είναι εύκολη. Αυτό συμβαίνει σε θερμοκρασίες και πιέσεις πάνω από το λεγόμενο **κρίσιμο σημείο** μιας ουσίας, όπου υπάρχει μόνο μια ενιαία φάση. Καθώς η πίεση αυξάνεται κατά πολύ πάνω από το κρίσιμο σημείο, το στοιχείο, φαινομενικά αέριο, γίνεται τόσο πυκνό έτσι ώστε να υπάρχει κάποια ομοιότητα με υγρό και οι συνθήκες θερμοδυναμικές προσεγγίσεις όπως ο νόμος του τέλει αερίου καθίστανται ανακριβείς. Η κρίσιμη θερμοκρασία και η πίεση του νερού είναι $T_{κρ} = 647\text{ K}$ και $p_{κρ} = 219\text{ atm}$ ($1\text{ atm} = 101300\text{ N/m}^2$), και επομένως τυπικά προβλήματα που αφορούν το νερό και τον ατμό είναι κάτω από το κρίσιμο σημείο. Ο αέρας, που είναι ένα μίγμα αερίων, δεν έχει κάποιο διακριτό κρίσιμο σημείο, αλλά η κύρια συνιστώσα του, το άζωτο, έχει $T_{κρ} = 126\text{ K}$ και $p_{κρ} = 34\text{ atm}$. Έτσι, τυπικά προβλήματα που αφορούν τον αέρα είναι στην περιοχή της υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλής πίεσης όπου ο αέρας είναι σίγουρα ένα αέριο.

1.3 Το ρευστό ως συνεχές μέσο (continuum)

Μολονότι η μοριακή δομή των ρευστών είναι σημαντική για τη διάκριση ενός ρευστού από ένα άλλο, δεν είναι δυνατή η μελέτη της συμπεριφοράς ανεξάρτητων μορίων όταν προσπαθούμε να περιγράψουμε τα χαρακτηριστικά των ρευστών, είτε είναι ακίνητα είτε κινούνται. Ορίζουμε μία ιδιότητα του ρευστού (πυκνότητα, ειδικό βάρος κ.λπ.) ή ένα χαρακτηριστικό της ροής του (πίεση, ταχύτητα) εξετάζοντας τη μέση ή μακροσκοπική τιμή του που εκτιμάται με βάση έναν μικρό όγκο που περιέχει έναν μεγάλο αριθμό μορίων.

Όπως γνωρίζουμε, τα ρευστά είναι συσσωματώματα μορίων, σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους για ένα αέριο, σε μικρή απόσταση για ένα υγρό. Η απόσταση μεταξύ των μορίων είναι πολύ μεγάλη σε σύγκριση με τη μοριακή διάμετρο. Τα μόρια δεν είναι σταθερά σε ένα πλέγμα, αλλά μετακινούνται ελεύθερα μεταξύ τους. Έτσι η πυκνότητα ενός ρευστού (μάζα ανά μονάδα όγκου) δεν έχει ακριβές νόημα, αφού ο αριθμός των μορίων που καταλαμβάνουν ένα δεδομένο όγκο συνεχώς μεταβάλλεται. Αυτή η επίδραση γίνεται ασήμαντη αν η μονάδα όγκου είναι μεγάλη σε σύγκριση με τον όγκο του στοιχείου που έχει διαστάσεις ίσες με τη μοριακή απόσταση, όταν ο αριθμός των μορίων εντός του όγκου θα παραμείνει σχεδόν σταθερός παρά τη σημαντική ανταλλαγή σωματιδίων με το εξωτερικό περιβάλλον. Εάν, ωστόσο, ο επιλεγόμενος μοναδιαίος όγκος είναι πολύ μεγάλος, θα μπορούσε να υπάρχει μια αξιοσημείωτη μεταβολή στη μέση συσσωμάτωση των σωματιδίων. Η κατάσταση αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 1.3, όπου φαίνεται η μεταβολή της «πυκνότητας», όπως υπολογίζεται από τη μοριακή μάζα δm



Σχήμα 1.3. (α) Στοιχειώδης όγκος σε περιοχή ρευστού μεταβλητής πυκνότητας, (β) Μεταβολή της πυκνότητας με τον στοιχειώδη όγκο.

εντός ενός δεδομένου όγκου δV , συναρτήσει του μεγέθους του μοναδιαίου όγκου. Υπάρχει ένα οριακός όγκος δV^* κάτω από το οποίο οι μοριακές μεταβολές μπορεί να είναι σημαντικές και πάνω από το οποίο οι συσσωρευτικές μεταβολές μπορεί να είναι σημαντικές. Η **πυκνότητα** ρ ενός ρευστού ορίζεται όπως

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V^*} \frac{\delta m}{\delta V}.$$

Ο οριακός όγκος δV^* είναι περίπου 10^{-9} mm^3 για όλα τα υγρά και αέρια σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Για παράδειγμα, όγκος αέρα 10^{-9} mm^3 υπό κανονικές συνθήκες περιέχει περίπου $3 \cdot 10^7$ μόρια, ο οποίος είναι επαρκής για να καθορίσει μια σχεδόν σταθερή πυκνότητα σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση. Τα περισσότερα προβλήματα μηχανικής ασχολούνται με φυσικές διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες από ότι αυτός ο οριακός όγκος, έτσι ώστε η πυκνότητα είναι ουσιαστικά μια σημειακή συνάρτηση και οι ιδιότητες των ρευστών μπορούν να θεωρηθούν ως συνεχώς μεταβαλλόμενες στο χώρο (Σχήμα 1.3α). Ένα τέτοιο ρευστό ονομάζεται **συνεχές**, πράγμα που απλά σημαίνει ότι η μεταβολή των ιδιοτήτων του είναι τόσο ομαλή ώστε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο διαφορικός λογισμός για την ανάλυση. Ωστόσο, υπάρχουν οριακές περιπτώσεις για αέρια σε πολύ χαμηλές πιέσεις όπου η μοριακή απόσταση και η μέση απόσταση κίνησης των μορίων πριν την κρούση τους είναι συγκρίσιμη ή μεγαλύτερη από το φυσικό μέγεθος του συστήματος. Στις περιπτώσεις αυτές η έννοια του συνεχούς μέσου δεν ισχύει και χρησιμοποιείται η μοριακή θεωρία της ροής αραιών αερίων.

1.4 Διαστάσεις και μονάδες

Κάθε φυσική ποσότητα μπορεί να χαρακτηριστεί ποσοτικά από **τις διαστάσεις** της. Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν ποσοτικά τις διαστάσεις ονομάζονται **μονάδες**. Ορισμένες βασικές διαστάσεις όπως η μάζα M , το μήκος L , ο χρόνος T , και η θερμοκρασία Θ έχουν επιλεγεί ως **κύριες** ή **θεμελιώδεις διαστάσεις**, ενώ άλλες, όπως η ταχύτητα U , η ενέργεια E , και ο όγκος V εκφράζονται σε σχέση με τις κύριες διαστάσεις και ονομάζονται **δευτερεύουσες διαστάσεις**. Οι διαστάσεις που σχετίζονται με μερικές τυπικές φυσικές ποσότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Διάφορα συστήματα μονάδων έχουν αναπτυχθεί όλα αυτά τα χρόνια. Παρά τις σημαντικές προσπάθειες στην επιστημονική κοινότητα για τη χρήση και εφαρμογή ενός ενιαίου συστήματος μονάδων, δύο συστήματα μονάδων είναι ακόμα

Πίνακας 1.1. Φυσικές ποσότητες και Διαστάσεις.

Ποσότητα	Σύστημα FLT	Σύστημα MLT	Ποσότητα	Σύστημα FLT	Σύστημα MLT	Ποσότητα	Σύστημα FLT	Σύστημα MLT
Γωνιακή επιτάχυνση	T^{-2}	T^{-2}	Θερμότητα	FL	ML^2T^{-2}	Παραμόρφωση	$F^0L^0T^0$	$M^0L^0T^0$
Γωνιακή ταχύτητα	T^{-1}	T^{-1}	Θερμοκρασία	Θ	Θ	Πίεση	FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$
Δύναμη	F	MLT^{-2}	Ιξώδες (δυναμικό)	$FL^{-2}T$	$ML^{-1}T^{-1}$	Πυκνότητα	$FL^{-4}T^2$	ML^{-3}
Επιτάχυνση	LT^{-2}	LT^{-2}	Ιξώδες (κινηματικό)	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}	Ροπή δύναμης	FL	ML^2T^{-2}
Εμβαδό	L^2	L^2	Ισχύς	FLT^{-1}	ML^2T^{-3}	Ροπή αδράνειας	L^4	L^4
Ενέργεια	FL	ML^2T^{-2}	Μάζα	$FL^{-1}T^2$	M	Ροπή στρέψης	FL	ML^2T^{-2}
Ειδικό βάρος	FL^{-3}	$ML^{-2}T^{-2}$	Μέτρο ελαστικότητας	FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$	Συχνότητα	T^{-1}	T^{-1}
Έργο	FL	ML^2T^{-2}	Μήκος	L	L	Τάση	FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$
Ειδική θερμότητα	$L^2T^2\Theta^{-2}$	$L^2T^2\Theta^{-2}$	Όγκος	L^3	L^3	Χρόνος	T	T
Επιφανειακή τάση	FL^{-1}	MT^{-2}	Ορμή	FT	MLT^{-1}			

σε χρήση: (α) το **μετρικό σύστημα SI** (από το Le Système International d'Unités), το οποίο είναι επίσης γνωστό ως Διεθνές Σύστημα και (β) το **αγγλικό σύστημα**, το οποίο είναι επίσης γνωστό και σαν σύστημα USCS. Το SI είναι ένα απλό και λογικό σύστημα που βασίζεται σε μία δεκαδική σχέση μεταξύ των διαφόρων μονάδων, και είναι αυτό που χρησιμοποιείται για επιστημονικές και τεχνολογικές εργασίες, στις περισσότερες βιομηχανικές χώρες. Το αγγλικό σύστημα, ωστόσο, δεν έχει καμία προφανή συστηματική αριθμητική βάση, και οι διαφορές μονάδες σε αυτό το σύστημα σχετίζονται μεταξύ τους μάλλον αυθαίρετα. Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής είναι η μόνη βιομηχανική χώρα που δεν έχει ακόμη πλήρως μετατρέψει το σύστημα της στο μετρικό.

Στο σύστημα SI, οι μονάδες μάζας, μήκους, και χρόνου είναι το χιλιόγραμμο (kg), το μέτρο (m), και το δευτερόλεπτο (s), αντίστοιχα. Μονάδα δύναμης είναι το Newton (N), και ορίζεται ως η δύναμη που απαιτείται για την επιτάχυνση μιας μάζας 1 kg με επιτάχυνση 1 m/s^2 . Μια άλλη μονάδα δύναμης που χρησιμοποιείται σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες είναι το χιλιόγραμμο δύναμης (kgf), το οποίο είναι το βάρος μάζας 1 kg στο επίπεδο της θάλασσας ($1 \text{ kgf} = 9.807 \text{ N}$).

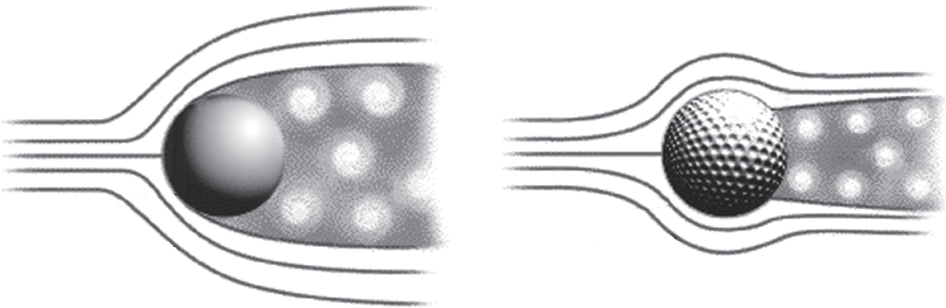
Ο όρος **βάρος** συχνά χρησιμοποιείται λανθασμένα για να εκφράσει μάζα. Σε αντίθεση με τη μάζα, το βάρος W είναι μια δύναμη. Είναι η βαρυτική δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα, και το μέγεθός της καθορίζεται από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, $W = mg$ (N), όπου m είναι η μάζα του σώματος, και g είναι η τοπική επιτάχυνση της βαρύτητας ($g = 9.807 \text{ m/s}^2$ στην επιφάνεια της θάλασσας και 45° γεωγραφικό πλάτος). Μία συνηθισμένη ζυγαριά μετρά τη δύναμη της βαρύτητας που ενεργεί σε ένα σώμα. Το βάρος ενός μοναδιαίου όγκου μιας ουσίας ονομάζεται **ειδικό βάρος** γ και προσδιορίζεται από τη σχέση $\gamma = \rho g$, όπου ρ είναι η πυκνότητα.

Η μάζα ενός αντικειμένου παραμένει η ίδια ανεξάρτητα από τη θέση του στο χώρο. Το βάρος του, όμως, αλλάζει με την αλλαγή της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Ένα αντικείμενο ζυγίζει λιγότερο στην κορυφή ενός βουνού, αφού το g μειώνεται με το ύψος. Στην επιφάνεια του φεγγαριού, ένας αστροναύτης ζυγίζει περίπου το ένα έκτο αυτού που ζυγίζει κανονικά στη γη. Στο επίπεδο της θάλασσας μια μάζα 1 kg ζυγίζει 9.807 N.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η δύναμη της βαρύτητας που ενεργεί σε μια μάζα οφείλεται στην έλξη μεταξύ των μαζών και επομένως είναι ανάλογη προς τα μεγέθη των μαζών και αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ τους. Επομένως, η επιτάχυνση της βαρύτητας g σε μία θέση εξαρτάται από την τοπική πυκνότητα του φλοιού της γης, την απόσταση από το κέντρο της γης, και σε μικρότερο βαθμό, από τις θέσεις της σελήνης και του ήλιου.

Κεφάλαιο 9

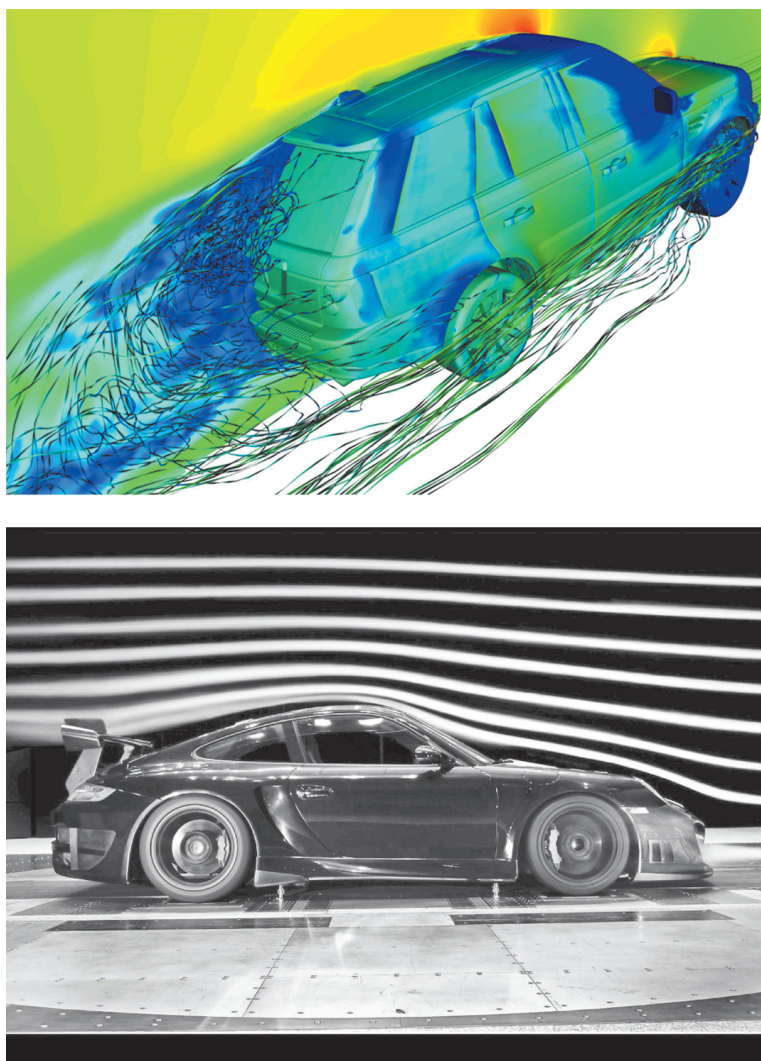
Εξωτερικές ροές - Οριακή στοιβάδα



Στο Κεφάλαιο αυτό εξετάζονται τα χαρακτηριστικά της ροής γύρω από αντικείμενα (σώματα) που είναι βυθισμένα σε ένα ρευστό. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τη ροή του αέρα γύρω από αεροπλάνα, οχήματα, κτίρια ή τη ροή του νερού γύρω από υποβρύχια και υδρόβιους οργανισμούς. Σε αυτές τις περιπτώσεις το αντικείμενο περιβάλλεται πλήρως από το ρευστό και οι ροές αυτές ονομάζονται εξωτερικές ροές.

Οι εξωτερικές ροές που αφορούν τη ροή αέρα συχνά ονομάζονται αεροδυναμικές όπως σε ένα αεροπλάνο που κινείται στην ατμόσφαιρα. Επίσης και άλλες εξωτερικές ροές είναι εξαιρετικά σημαντικές. Η δύναμη του ρευστού (άντωση και οπισθέλκουσα) σε οχήματα (αυτοκίνητα, φορτηγά, ποδήλατα) είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα. Με τον σωστό σχεδιασμό αυτοκινήτων και φορτηγών, έχει καταστεί δυνατό να μειωθεί σε μεγάλο βαθμό η κατανάλωση καυσίμου και η βελτίωση της συμπεριφοράς των οχημάτων. Παρόμοιες προσπάθειες έχουν οδηγήσει στη βελτίωση των πλοίων, είτε αυτά είναι σκάφη επιφάνειας ή υποβρύχια σκάφη. Άλλες εφαρμογές των εξωτερικών ροών περιλαμβάνουν αντικείμενα που δεν είναι εντελώς βυθισμένα στο ρευστό, όπως για παράδειγμα, ο σωστός σχεδιασμός ενός κτιρίου που θα πρέπει να περιλαμβάνει την διερεύνηση των επιπτώσεων του ανέμου.

Μεγάλο μέρος των πληροφοριών σχετικά με τις εξωτερικές ροές προέρχεται από πειράματα που διεξάγονται σε μοντέλα υπό κλίμακα και στη συνέχεια τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τα πραγματικά αντικείμενα. Εργαστηριακές δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί σε αεροσήραγγες με μοντέλα αεροπλάνων, κτιρίων, ακόμα και ολόκληρων πόλεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις ένα πραγματικό μοντέλο (πρωτότυπο) έχει δοκιμαστεί σε αεροσήραγγες. Το *σχήμα 9.1* δείχνει τις δοκιμές που έχουν γίνει σε αεροσήραγγες για τον σχεδιασμό οχημάτων. Επίσης η χρήση εργαστηριακών καναλιών νερού και δεξαμενών ρυμούλκησης παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη ροή γύρω από πλοία και άλλα αντικείμενα. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αρχικά τα γενικά χαρακτηριστικά των εξωτερικών ροών, οι έννοιες της οπισθέλκουσας (αντίστασης) και άντωσης (δυναμικής άνωσης), τα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος (στρωτού και τυρβώδους) και οι διάφορες λύσεις για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών παραμέτρων του. Επίσης περιγράφεται αναλυτικά η οπισθέλκουσα λόγω τριβής και λόγω πίεσης, και η εξάρτηση του συντελεστή αντίστασης από χαρακτηριστικές παραμέτρους (σχήμα αντικειμένου, αριθμός Reynolds, αριθμός Froude, συμπίεστικότητα κλπ). Τέλος, αναλύεται διεξοδικά η έννοια της άντωσης και οι παράγοντες που επιδρούν σε αυτήν.



Σχήμα 9.1. Χαρακτηριστικά της ροής γύρω από δύο τύπους αυτοκινήτων.

9.1 Γενικά χαρακτηριστικά των εξωτερικών ροών

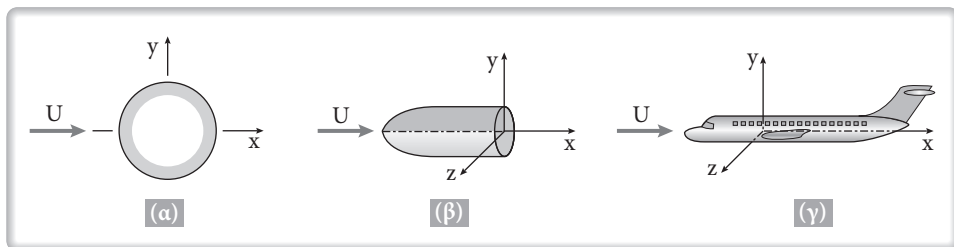
Ένα ρευστό που ρέει γύρω από ένα σώμα (αντικείμενο) ασκεί μια συνισταμένη δύναμη που οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του σώματος και του ρευστού που το περιβάλλει. Σε ορισμένες περιπτώσεις (όπως ενός αεροπλάνου σε πτήση) το ρευστό μακριά από το σώμα είναι στάσιμο και το σώμα κινείται μέσα

στο ρευστό με ταχύτητα U . Σε άλλες περιπτώσεις (όπως ο άνεμος που φυσά γύρω από ένα κτίριο) το σώμα είναι ακίνητο και το ρευστό μακριά από το σώμα ρέει με ταχύτητα U . Σε κάθε περίπτωση, μπορούμε να έχουμε το σύστημα συντεταγμένων στο σώμα και να αναλύσουμε το πρόβλημα όπως ένα ρευστό που ρέει γύρω από ένα ακίνητο σώμα με ταχύτητα U (ανάντη ταχύτητα).

Στα προβλήματα που θα εξετάσουμε θα υποθέσουμε ότι η ανάντη ταχύτητα είναι σταθερή στον χρόνο και στον χώρο. Δηλαδή, υπάρχει μία ομοιόμορφη, σταθερή ταχύτητα του ρευστού που ρέει γύρω από το αντικείμενο. Σε πραγματικά προβλήματα αυτό δεν ισχύει πάντα. Για παράδειγμα, ο άνεμος που φυσά γύρω από μία καπνοδόχο είναι σχεδόν πάντα τυρβώδης και ασταθής και πιθανόν με μη ομοιόμορφη ταχύτητα από την κορυφή στη βάση της καπνοδόχου. Συνήθως, η αστάθεια και η ανομοιομορφία είναι ήσσονος σημασίας.

Ακόμη και με μία μόνιμη, ομοιόμορφη ανάντη ροή, η ροή στην περιοχή ενός αντικειμένου μπορεί να είναι μη μόνιμη. Παραδείγματα αυτού του τύπου της συμπεριφοράς είναι ο περυγισμός που συναντάμε στη ροή γύρω από αεροτομές, η ταλάντωση των τηλεφωνικών καλωδίων που “τραγουδούν” στον άνεμο, και οι τυχαίες τυρβώδεις διακυμάνσεις στην περιοχή του απόρρου (ολκού, wake) πίσω από σώματα.

Η δομή μιας εξωτερικής ροής και η ευκολία με την οποία η ροή μπορεί να περιγραφεί και να αναλυθεί, συχνά εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σώματος στη ροή. Οι τρεις γενικές κατηγορίες των σωμάτων φαίνονται στο Σχήμα 9.2. Περιλαμβάνουν (α) αντικείμενα δύο διαστάσεων (απείρου μήκους και σταθερής διατομής και σχήματος), (β) αξονοσυμμετρικά αντικείμενα (που σχηματίζονται με την περιστροφή της διατομής τους γύρω από τον άξονα συμμετρίας), και (γ) σώματα τριών διαστάσεων που μπορεί να έχουν μία γραμμή ή ένα επίπεδο συμμετρίας. Στην πράξη δεν υπάρχουν πραγματικά διδιάστατα σώματα. Ωστόσο, πολλά αντικείμενα έχουν αρκετά μεγάλο μήκος έτσι ώστε οι επιδράσεις των άκρων μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

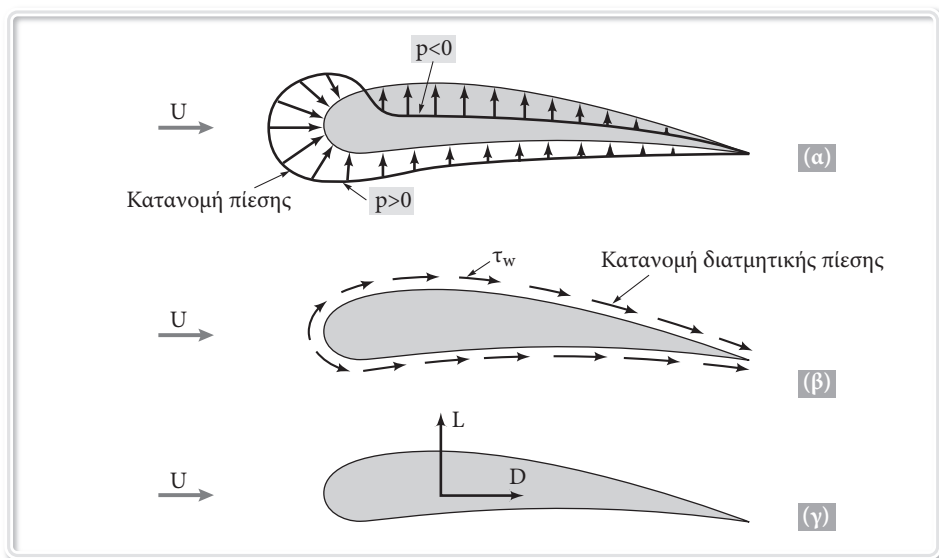


Σχήμα 9.2. Τύποι ροής: (α) διδιάστατη (β) αξονοσυμμετρική, (γ) τριδιάστατη.

Μία άλλη κατάταξη του σχήματος των αντικειμένων μπορεί να γίνει ανάλογα με το αν το σώμα είναι στρογγυλεμένο (streamlined) ή μη-στρογγυλεμένο (αμβλύ, blunt). Τα χαρακτηριστικά της ροής εξαρτώνται σημαντικά από τον βαθμό του στρογγυλέματος. Σε γενικές γραμμές, στρογγυλεμένα σώματα (π.χ., αεροτομές, αγωνιστικά αυτοκίνητα, κλπ), έχουν μικρή επίδραση στο περιβάλλον ρευστό, σε σύγκριση με την επίδραση που έχουν στο ρευστό τα μη στρογγυλεμένα σώματα (π.χ. αλεξίπτωτα, κτίρια, κλπ).

9.1.1 Οι έννοιες της αντίστασης (οπισθέλκουσας - Drag) και της άντωσης (δυναμικής άνωσης - Lift)

Όταν ένα σώμα κινείται μέσα σε ένα ρευστό, δημιουργείται μια αλληλεπίδραση μεταξύ του σώματος και του ρευστού. Αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να περιγραφεί με βάση τις δυνάμεις που δρουν στη διεπιφάνεια ρευστού-σώματος. Αυτό μπορεί να περιγραφεί από τις διατμητικές τάσεις, τ_w , λόγω επιδράσεων του ιξώδους και από τις κάθετες τάσεις λόγω της πίεσης, p . Τυπικές κατανομές της διατμητικής τάσης και της πίεσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 9.3α και 9.3β. Τόσο το τ_w όσο και το p μεταβάλλονται σε μέγεθος και κατεύθυνση κατά μήκος της επιφάνειας.



Σχήμα 9.3. Δυνάμεις από το περιβάλλον ρευστό σε ένα διδιάστατο αντικείμενο: (α) δύναμη πίεσης, (β) συνεκτική δύναμη (λόγω ιξώδους), (γ) συνισταμένη δύναμη (άντωση και οπισθέλκουσα (αντίσταση)).

Αγγλο-ελληνική ορολογία

A

absolute pressure = απόλυτη πίεση
 absolute roughness = απόλυτη τραχύτητα
 absorption = απορρόφηση
 acceleration = επιτάχυνση
 acoustic velocity = ταχύτητα του ήχου
 added mass = προστιθέμενη μάζα
 adiabatic = αδιαβατικός
 adiabatic expansion = αδιαβατική διαστολή
 advection = μεταφορά
 advective acceleration = μεταθετική επιτάχυνση
 adverse pressure gradient = θετική κλίση πίεσης
 aerodynamics = αεροδυναμική
 airfoil = αεροτομή
 altitude = υψόμετρο
 anemometry = ανεμομετρία
 angle of attack = γωνία πρόσπτωσης
 angle of incidence = γωνία πρόσπτωσης
 angular deformation = γωνιακή παραμόρφωση
 angular momentum = στροφορμή
 annulus = δακτύλιος
 aspect ratio = λόγος πλάτους/ύψους
 atmospheric pressure = ατμοσφαιρική πίεση
 autocorrelation = αυτοσυσχέτιση
 average velocity = μέση ταχύτητα
 axial = αξονικός, κατά μήκος άξονα
 axial velocity = αξονική ταχύτητα
 axisymmetric = αξονοσυμμετρικός

B

barometer = βαρόμετρο
 barometric pressure = βαρομετρική πίεση
 bend = καμπή, στροφή
 Bingham-plastic fluid = ρευστό με συμπεριφορά πλαστικού Bingham
 blade = πτερύγιο στροβίλου, πτερύγιο ελικοπτέρου, λεπίδα
 body force = καθολική δύναμη (δύναμη σώματος)
 boundary conditions = οριακές συνθήκες

boundary layer = οριακό στρώμα, οριακή στιβάδα
 boundary-layer thickness = πάχος οριακού στρώματος
 bridge pier = βάθρο γέφυρας
 broad-crested weir = εκχειλιστής πλατιάς στέψης
 butterfly valve = δικλείδα τύπου πεταλούδας
 buoyancy = άνωση
 buoyancy force = δύναμη άνωσης, ανωστική δύναμη
 buoyant jet = ανωστική φλέβα

C

calibration = βαθμονόμηση
 canal = κανάλι, διώρυγα
 capillary phenomena = τριχοειδή φαινόμενα
 capillary tube = τριχοειδής σωλήνας
 cast iron pipe = χυτοσίδηρος σωλήνας
 cavitation = σπηλαιώση
 cavity = κοιλότητα
 celerity = ταχύτητα (κυματομηχανική)
 center of buoyancy = κέντρο άνωσης
 center of gravity = κέντρο βάρους
 center of pressure = κέντρο πίεσης
 centrifugal force = φυγόκεντρος δύναμη
 centrifugal pump = φυγοκεντρική αντλία
 centripetal force = κεντρομόλος δύναμη
 centroid = κέντρο βάρους
 channel = αγωγός, διώρυγα, κανάλι
 circular = κυκλικός
 circulation = κυκλοφορία
 circumferential = περιφερειακός, κατά μήκος περιφέρειας κύκλου
 coefficient = συντελεστής
 cohesion = συνοχή
 combustion = καύση
 compressibility = συμπιεστότητα
 compressible flow = συμπιεστή ροή
 compressor = συμπιεστής

computational model = υπολογιστικό ομοίωμα (μοντέλο)

concentration = συγκέντρωση

concentric cylinder flow = ροή μεταξύ δύο ομόκεντρων κυλίνδρων

conduit = αγωγός

κωνικός διαχύτης = κωνικός διαχύτης

conservation of energy = διατήρηση της ενέργειας

conservation of mass = διατήρηση της μάζας

conservative agent = διατηρούμενη ουσία

constitutive law = καταστατικός νόμος

contact angle = γωνία επαφής

contact line = καμπύλη επαφής

continuity equation = εξίσωση συνέχειας

continuum = συνεχές μέσο

contracted weir = συνεσταλμένος εκχειλιστής

contraction = στένωση (αγωγού), συστολή

control surface = επιφάνεια ελέγχου

control volume = όγκος ελέγχου

convective acceleration = μεταθετική επιτάχυνση, συναγωγική επιτάχυνση

converging channel = συγκλίνων αγωγός

converging flow = συγκλίνουσα ροή

correction factor = συντελεστής διόρθωσης

Couette flow = ροή Couette

creeping flow = έρπουσα ροή

critical depth = κρίσιμο Βάθος

critical flow = κρίσιμη ροή

critical flow meter = μετρητής κρίσιμης ροής

critical Reynolds number = κρίσιμος αριθμός Reynolds

critical velocity = κρίσιμη ταχύτητα

cross - correlation = ετεροσυσχέτιση

cross section = διατομή

current = ρεύμα

curvilinear coordinate system = καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων

cylindrical coordinates = κυλινδρικές συντεταγμένες

D

dam = φράγμα

damping = απόσβεση

deformation = παραμόρφωση

density = πυκνότητα

depth of flotation = βάθος επίπλευσης

deterministic model = αιτιοκρατικό ομοίωμα (ντετερμινιστικό μοντέλο)

differential analysis = διαφορική ανάλυση

differential manometer = διαφορικό μανόμετρο

diffuser = διαχύτης

diffusion = διάχυση

diffusion, molecular = μοριακή διάχυση

diffusion, turbulent = τυρβώδης διάχυση

dilatant fluid = διασταλτικό ρευστό

dilatation = ρυθμός διόγκωσης ρευστού στοιχείου

dimension = διάσταση

dimensional analysis = διαστατική ανάλυση

dimensionless number = αδιάστατος αριθμός

dimensionless parameter = αδιάστατη παράμετρος

direction = διεύθυνση

discharge = παροχή

discharge coefficient = συντελεστής παροχής

dispersion = διασπορά

displacement thickness = πάχος μετατόπισης

displacement = μετατόπιση

dissipation = σκέδαση

dissolved form = διαλυμένη μορφή

dissolved substance = διαλυμένη ουσία

distribution = κατανομή

divergence = απόκλιση

divergence-free field = πεδίο μηδενικής απόκλισης

doublet = δίπολο

downstream = κατάντη

drag force = δύναμη αντίστασης (οπισθέλκουσας)

drag coefficient = συντελεστής αντίστασης

dynamic equilibrium = δυναμική ισορροπία

dynamic viscosity = δυναμικό ιξώδες

dynamic pressure = δυναμική πίεση

dynamic similarity = δυναμική ομοιότητα

E

eddy = στροβιλισμός, δίνη

eddy viscosity = ιξώδες της τύρβης

effective = ενεργή

efficiency = απόδοση

elasticity = ελαστικότητα

empirical model = εμπειρικό ομοίωμα (μοντέλο)

energy = ενέργεια
 energy balance = ισοζύγιο ενέργειας
 energy flux = παροχή ενέργειας
 energy grade line = γραμμή ενέργειας
 energy gradient = κλίση (γραμμής) ενέργειας
 energy line = γραμμή ενέργειας
 energy loss = απώλεια ενέργειας
 enlargement = μεγέθυνση
 enstrophy = ενστροφία
 enthalpy = ενθαλπία
 entrance = είσοδος
 entropy = εντροπία
 environmental flow = περιβαλλοντική ροή
 equilibrium = ισορροπία
 equipotential line = ισοδυναμική γραμμή
 equipotential surface = ισοδυναμική επιφάνεια
 equivalent = ισοδύναμος
 equivalent roughness = ισοδύναμη τραχύτητα
 exit = έξοδος (αγωγού, συσκευής, όγκου
 ελέγχου, κλπ)
 expansion = διαστολή, διεύρυνση (αγωγού)
 expansion factor = συντελεστής διαστολής
 extensive property = εκτατική ιδιότητα
 external flow = εξωτερική ροή

F

favorable pressure gradient = ισχυρή κλίση
 πίεσης
 field = πεδίο
 flood control = έλεγχος πλημμύρας
 flotation = επίπλευση
 flow = ροή
 flow disturbance = διαταραχή ροής
 flow field = πεδίο ροής
 flow instability = αστάθεια ροής
 flow meter = ροόμετρο
 flow nozzle = ακροφύσιο
 flow perturbation = ροϊκή διαταραχή
 flow separation = αποκόλληση ροής (από
 στερεά επιφάνεια)
 flownet = δίκτυο ροής
 flowrate = παροχή, παροχή όγκου
 fluctuation = διακύμανση
 fluid = ρευστό
 fluid flow = ροή ρευστού
 fluid machinery = υδραυλικές μηχανές
 fluid meter = ροόμετρο

fluid particle = σωματίδιο ρευστού
 fluid pressure = πίεση ρευστού
 flume = ανοικτός αγωγός, κανάλι
 flux = παροχή, ρυθμός ροής
 force = δύναμη
 forced vortex = εξαναγκασμένος στρόβιλος
 free surface = ελεύθερη επιφάνεια
 free vortex = ελεύθερος στρόβιλος
 friction = τριβή
 friction drag = αντίσταση τριβής
 friction factor = συντελεστής τριβής
 friction losses = απώλειες τριβής
 friction velocity = ταχύτητα τριβής
 frontal area = μετωπική επιφάνεια
 fully developed flow = πλήρως αναπτυγμένη
 ροή
 fully rough zone = πλήρως τραχεία περιοχή

G

gage (gauge) pressure = σχετική πίεση
 gas = αέριο
 gas constant = σταθερά αερίου
 gas turbine = αεριοστρόβιλος
 gate = θυρόφραγμα
 gauge pressure = σχετική πίεση
 geometric similarity = γεωμετρική ομοιότητα
 grade = βαθμός, τάξη
 gradient = βαθμίδα, κλίση
 gravity = βαρύτητα
 grid = υπολογιστικό πλέγμα, κάνναβος

H

head loss = απώλεια φορτίου
 heat = θερμότητα
 height = ύψος
 homogeneous fluid = ομογενές ρευστό
 hoop tension = περιφερειακή τάση
 horizontal = οριζόντιος
 hydraulic efficiency = υδραυλική απόδοση
 hydraulic head = υδραυλικό φορτίο
 hydraulic jump = υδραυλικό άλμα
 hydraulic machine blade = πτερύγιο υδραυλι-
 κής μηχανής
 hydraulic machine = υδραυλική μηχανή
 hydraulic radius = υδραυλική ακτίνα
 hydraulic similitude = υδραυλική ομοιότητα
 hydraulic turbine = υδροστρόβιλος

hydraulically rough wall = υδραυλικά τραχύ
τοίχωμα

hydraulically smooth wall = υδραυλά λείο
τοίχωμα

hydrodynamic stability theory = θεωρία
υδροδυναμικής ευστάθειας

hydrodynamics = υδροδυναμική

hydrofoil = υδροτομή

hydrostatic force = υδροστατική δύναμη

hydrostatics = υδροστατική

hypersonic flow = υπερηχητική ροή

I

ideal flow = ιδεατή ροή

ideal fluid = ιδεατό ρευστό

ideal gas = ιδανικό αέριο

immersed body = βυθισμένο σώμα

immiscible liquids = μη αναμίξιμα υγρά

impeller = έλικα, φτερωτή

impulse = ώση, ώθηση

impulse wheel = φτερωτή

incomplete similarity = μερική ομοιότητα

incompressible flow = ασυμπίεστη ροή

inelastic pipe = μη ελαστικός σωλήνας

inertia = αδράνεια

inertia forces = δυνάμεις αδρανείας

inertial force = αδρανεακή δύναμη

injection well = πηγάδι έγχυσης

inlet = είσοδος (αγωγού, συσκευής, όγκου
ελέγχου, κλπ)

instantaneous velocity = στιγμιαία ταχύτητα

integral analysis = ολοκληρωματική ανάλυση

integral equation = ολοκληρωματική εξίσωση

intensity of turbulence = ένταση της τύρβης

interface = διεπιφάνεια

interfacial tension = διεπιφανειακή τάση

intermittency zone = ζώνη διαλείπουσας τύρ-
βης

internal energy = εσωτερική ενέργεια

intrinsic scale = εγγενής κλίμακα

inviscid fluid = ιδεατό ρευστό

iron pipe = μεταλλικός σωλήνας

irrotational flow = αστρόβιλη ροή

isentropic = ισεντροπικός

isobaric surface = ισοθλιπτική επιφάνεια

isothermal = ισόθερμος

J

jet = φλέβα, δέσμη

jet boundary = όριο της φλέβας

K

kinematic similarity = κινηματική ομοιότητα

kinematic viscosity = κινηματικό ιξώδες

kinetic energy = κινητική ενέργεια

L

laminar boundary layer = στρωτό οριακό
στρώμα

laminar flow = στρωτή ροή

law of the wall = νόμος τοιχώματος

leading edge = ανάντη ακμή

length = μήκος

length scale = κλίμακα μήκους

lift = δύναμη άντωσης, δυναμική άνωση

lift coefficient = συντελεστής άντωσης

light sheet = φύλλο φωτός

linear deformation = γραμμική παραμόρφωση

linear momentum = γραμμική όρμη

liquid = υγρό

liquid level = στάθμη υγρού

local acceleration = τοπική επιτάχυνση

local friction coefficient = τοπικός συντελεστής
τριβής

local shear stress = τοπική διατμητική τάση

longitudinal stress = διαμήκης τάση

loop = βρόχος

loss = απώλεια

M

manometer = μανόμετρο

mass = μάζα

mass balance = ισοζύγιο μάζας

mass flow rate = παροχή μάζας

material derivative = σωματιδιακή παρά-
γωγος, υλική παράγωγος, ολική παρά-
γωγος

maximum = μέγιστος

mean = μέσος όρος

mean flow = μέση ροή

mean velocity = μέση ταχύτητα

mean velocity gradient = κλίση της μέσης τα-
χύτητας

measurement = μέτρηση

Ευρετήριο όρων

- Αγγλικό σύστημα, 11-12
αδιάστατα γινόμενα, 431-433
 » » ή αδιάστατες ομάδες, 431
αδρανειακό, 271, 273, 284-285, 288
ακολουθία, 199, 201-202
αναπαράσταση του ροϊκού πεδίου, 191
αντίσταση, 402, 404, 420
 » (οπισθέλκουσα), 595-597, 621-626, 639, 646-647, 662, 664-665, 668
άντωση, 402, 404
άντωση (δυναμική άνωση), 595
άνωση, 88-92
απαιτήσεις ομοιότητας, 466
απειροστό όγκο ελέγχου, 343, 352
απόλυτη πίεση, 49, 52-53
 » ταχύτητα, 241-242
απώλεια, 307-310, 312, 314, 317, 319, 330, 335-336, 340
 » στήριξης (stall), 643, 682
αριθμός Cauchy, 452, 456
 » Euler, 455
 » Froude, 451, 454, 455, 468, 472, 478, 483, 488
 » Mach, 452, 456
 » Reynolds, 440, 443, 454, 462, 468-469, 472-474, 476, 478, 482, 485, 489, 492, 510, 521, 528, 529, 542, 561, 571
αριθμός Strouhal, 452, 456
αριθμός Weber, 452, 457
αριθμός σπηλαίωσης, 455, 492, 501
αρχή του Αρχιμήδη, 88-89
ασταθή θέση ισορροπίας, 91
αστρόβιλα, 217
αστρόβιλη, 358-361, 363, 379-380, 385, 387, 394, 407-408, 415, 425
ασυμπίεστο ρευστό, 215, 246
Γενική εξίσωση της κίνησης, 45, 93
γεωμετρία, 434, 445-446, 474
γεωμετρική ομοιότητα, 467, 474, 477-479, 490, 503
γραμμή ενέργειας, 166-169
γραμμική παραμόρφωση, 213, 215, 252
γραμμικό, 626
γωνιακή ορμή, 288, 340
 » παραμόρφωση, 213, 215-218, 252
δευτερεύουσες διαστάσεις, 9
 » ή τοπικές απώλειες, 560
δεύτερη ροπή της επιφάνειας (ροπή αδράνειας), 68
διάγραμμα Moody, 550, 553-556, 559-560, 574
 » ελεύθερου σώματος, 221
διάνυσμα θέσης, 192
διασταλτικά, 19
διαστάσεις, 8-9, 20, 23, 26, 31
διαστατική ανάλυση, 433-434, 437, 440, 444, 446, 448, 454, 458-460, 462, 466, 468-469, 494, 498, 500-502
διατήρηση της μάζας, 259-260, 267, 295, 313
διατμητικές τάσεις, 354-355, 357, 359, 364-365, 378
διαφορά πίεσης, 44, 47, 54, 58-59, 62, 64-65, 111
διαφορική ανάλυση, 343, 364
διδιάστατη ροή, 192, 196, 210-212, 218, 248
δίκτυο ροής, 380
διφασικών ροών, 7
δυνάμεις σώματος, 353, 356
δυναμική ομοιότητα, 468, 477, 488, 490
 » πίεση, 142-143, 170
 » της κίνησης, 191
δυναμικό της ταχύτητας, 361-363, 380-386, 388, 390, 392, 394, 399, 409-410, 419, 422, 424-425
Ειδικό βάρος, 11, 13-15
εισροή, 259, 262, 265, 277, 281, 291, 294

εκροή, 259, 262, 264-265, 277, 281, 291-292, 294-295, 332

εκτατική, 224, 226, 230

εκτοπιζόμενος όγκος, 90, 92

ενέργεια ανά μονάδα βάρους, 309

» » όγκου, 308

ενθαλπία, 303-304

ένταση της τύρβης, 532

» του δίπολου, 390, 399

εντροπία, 315

εξισώσεις Euler, 124

» Navier–Stokes, 365-368, 370, 373

» του Euler, 358

εξίσωση Bernoulli, 130, 132-133, 136, 138-140, 142-144, 147-148, 152-153, 155, 157-159, 161-163, 166, 171, 174-175, 178-182, 186-187

» Darcy-Weisbach, 552

» Laplace, 361-362, 379-380, 392

» γραμμικής ορμής, 272-273

» ενέργειας για μονοδιάστατη, μόνιμη ροή, 304, 314

» μηχανικής ενέργειας, 308

» πρόβλεψης, 466-467, 472

» συνέχειας, 260, 267, 320

» της ροπής της ορμής, 271, 288

» της συνέχειας, 152

εξωτερικές επιδράσεις, 434, 445-446

επαναλαμβανόμενες μεταβλητές, 434, 436, 440, 444, 447, 450-451

επικύρωση του σχεδιασμού των μοντέλων, 471

επίπεδη ροή Poiseuille, 375

επιτάχυνση συναγωγής, 208, 212

» της βαρύτητας, 451

επιφανειακές δυνάμεις, 43, 353, 356

επιφανειακή τάση, 31-33, 35, 451

επιφάνειες του όγκου ελέγχου, 222

έρργο, 10, 12

ευσταθής θέση ισορροπίας, 91

Ημιτονοειδές κύμα, 626

Θερμίδα, 12

θερμοβαθμίδα, 52

θεώρημα μεταφοράς Reynolds, 223, 225, 234-236, 242-243

θεώρημα Π του Buckingham, 433

Ιδανική ροή, 361

ιδεατά, η μη συνεκτικά, 357

ιδιότητες του ρευστού, 434, 454

ιξώδες, 3, 18-20, 23-24, 451, 502

ιξώδους της τύρβης, 536-537, 539-540, 582

ισοθερμικές συνθήκες, 50

Κάθετη (ορθή) τάση, 353

κάθετη δύναμη, 41, 43, 55, 66-68, 72, 74, 80

κατακόρυφη απόσταση, 57, 62, 68

κέντρο άνωσης, 90, 92

κέντρο βάρους, 68-70, 73, 75-76, 80, 87, 90-92

κέντρο της πίεσης, 70-71

κινηματική ομοιότητα, 468

κινηματική της κίνησης, 191

κινηματικό ιξώδες, 23

κλίμακα μήκους, 471, 475-476, 480, 482,

484-485, 488

κρίσιμο σημείο, 7

κυβικό, 626

κυκλοφορία, 386-388, 402-404, 422, 424

κύριες απώλειες, 560

κύριες ή θεμελιώδεις διαστάσεις, 9

κωνικό διαχύτη, 568-569

Λειτουργία on-off, 572

λειτουργία αντεπιστροφής, 572

λειτουργία ασφαλείας, 572

λειτουργία στραγγαλισμού, 572

λόγος διαστάσεων, 443

λύση Blasius, 626

Μαθηματικά ή υπολογιστικά μοντέλα, 464

μανόμετρο, 56, 63

μανόμετρο κεκλιμένου σωλήνα, 56

μανόμετρο σχήματος U, 56, 62

μέθοδος Euler, 194

μέθοδος Lagrange, 194

μέθοδος της επαλληλίας, 392

μετατροπείας πίεσης, 65

» Venturi, 161

» ακροφύσιο, 160

» διαφράγματος, 160

μετρικό σύστημα SI, 11

- μέτρο ελαστικότητας, 451
 » ελαστικότητας E_v , 25-26
 μη μόνιμες ροές, 197-199, 202
 μη συνεκτικός πυρήνας, 511
 μη-εκτατική, 224
 μήκος ανάμιξης, 537-538
 » είσοδου, 511
 μισό σώμα, 393-394, 423
 μόνιμη ροή, 124-125, 127-128, 130-132,
 134-136, 138-139, 141, 147, 152-153,
 155, 157, 161, 164-167, 171, 174-176, 178,
 181-183, 185, 187, 197-199, 207, 209, 211,
 235-237, 253
 μονοδιάστατη εξίσωση ενέργειας, 303-304
 μονοδιάστατο πεδίο ροής, 197
 μοντέλα, 429, 457, 461, 464, 471-474, 479-480,
 482, 484-487, 499
 Νόμοι ομοιότητας, 466
 νόμος Kutta-Joukowski, 405
 » Stokes, 459
 » του Poiseuille, 375
 Όγκος ελέγχου, 220-223, 225, 227-228,
 230-231, 234, 238-240, 242-243
 ολική πίεση, $p_{ολ}$, 144
 ομοιότητα, 429, 433, 466-470, 472-480,
 482-485, 490, 503
 οπισθέλκουσα, 402
 οριακό στρώμα, 360, 395, 398, 511
 Παραβολικό, 626
 παράγωγος συναγωγής, 208
 παράμετρος συχνότητας, 457
 παραμορφωμένα (στρεβλά) μοντέλα, 472
 παροχή μάζας, 152, 186
 » όγκου, 152, 163, 186
 πάχος μετατόπισης, 609-610, 618, 633, 644,
 695
 » ορμής του οριακού στρώματος, 612,
 632, 644
 » του οριακού στρώματος, 609, 612, 616,
 628-630, 644, 688, 695
 πεδίο ταχύτητας, 191-192, 197-199, 202, 204,
 213, 249
 περιοχή εισόδου, 360, 511, 513, 563
 » συναρμογής, 535
 περιστροφή, 215-219, 249, 251-252
 πιεζομετρική γραμμή, 166-169
 πιεζομετρικό φορτίο, 167
 πιεζομετρικός σωλήνας, 56, 57
 πίεση, 451
 » ανακοπής, 142, 144, 146-147, 170, 173
 » ατμού, 30
 πλαστικό Bingham, 19
 πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή, 360
 πλήρως τυρβώδεις ροές, 555
 πρίσμα πίεσης, 74, 76, 84
 πρότυπη ατμόσφαιρα, 50, 52
 πρώτη ροπή της επιφάνειας, 68
 πρωτότυπο, 464-477, 479-480, 482-485,
 487-488, 490, 492-493, 499, 501-503
 πυκνότητα, 8-9, 11-15, 20, 23, 25, 27, 28, 451,
 502
 Ρεολογία, 7
 ροή Couette, 371
 » Hagen-Poiseuille, 372
 » καταβόθρας, 382
 » μεταβατική, 508, 510, 529, 535, 542
 » ομοιόμορφη, 358-359, 381-382, 393,
 396-397, 399, 402-403, 405, 424
 » πηγής, 382
 » πλήρως αναπτυγμένη, 510, 512, 514-516,
 518, 522-524, 542, 551-552, 561, 585-586
 » στρωτή, 508-512, 514, 517-518, 520-522,
 524-530, 533-536, 538-539, 542, 547-548,
 550-551, 555, 559, 585, 587
 » τυρβώδη, 508-510, 512, 514, 517-519,
 526-530, 532-536, 538, 540-542, 544-547,
 550-551, 559, 581-582
 ροϊκές γραμμές, 124-125, 133, 135-136, 139,
 141-142, 149-150, 178-179
 ροϊκή γραμμή, 198-199, 201, 210-212
 » γραμμή ανακοπής, 143
 » συνάρτηση, 348, 350-352, 361-362,
 379-380, 382-384, 388-389, 394, 396-
 397, 399, 402, 407, 409, 415, 419
 ροπή στρέψης, 288, 293
 ρυθμός γωνιακής παραμόρφωσης, 218, 253

- Σημείο ανακοπής, 132, 143, 146-147, 166, 172
 σπηλαίωση, 30
 στατική πίεση, 142-143, 145-147, 170
 στρατόσφαιρα, 51
 στρόβιλος ελεύθερος, 386, 404
 » εξαναγκασμένος, 386
 » σύνθετος, 386
 στροβιλότητα ζ, 217
 στροφορμή, 288, 290, 296, 327, 334
 στρωτή ροή, 197
 στρωτό υπόστρωμα, 535-536, 545, 548, 551, 555
 συνεσταλμένη διατομή, 144
 συνεχές, 8-9
 συνθήκες σχεδιασμού του μοντέλου, 466
 συνθήκη «μη-ολίσθησης», 16
 συνισταμένη δύναμη, 43, 45, 48, 66, 68-70, 74-77, 80-81, 83, 88
 συνολικό φορτίο, 166-167
 συντελεστής απώλειων, 560
 » συστολής, 151
 » αντίστασης (οπισθέλκουσας), 598, 626, 648, 650
 » άντωσης, 598, 675-681, 700
 » αποκατάστασης πίεσης, 569
 » κινητικής ενέργειας, 311-312
 » οπισθέλκουσας, 478, 480-481
 » πίεσης, 455
 » τριβής, 526, 552, 555, 561-562, 574
 » τριβής Darcy, 526
 σύστημα, 192, 210, 220-226, 228-230, 234-238, 240-243
 συχνότητα ταλάντωσης ροής, 451
 σχετική πίεση, 53-54, 57, 64, 76
 σχετική ταχύτητα, 241-242
 σωλήνας Pitot, 144-146, 160, 167
 τάσεις Reynolds, 535-536, 542, 548
 ταχύτητα, 451, 462, 502
 » του ήχου, 451
 » του ήχου, c, 28
 » τριβής, 542, 544, 548, 581, 583, 586-587
 τοπική επιτάχυνση, 207-208
 τριδιάστατα χαρακτηριστικά της ροής, 196
 τροπόσφαιρα, 51-53
 τροχιές, 198-200
 τυρβώδη ροή, 197
 τυρβώδης διατμητική τάση, 535, 537
 Υδραυλικά λείοι, 555
 υδραυλική διάμετρος, Dh, 377
 υδροστατική κατανομή, 47
 » πίεση, 143
 υποπίεση η πίεση κενού, 53
 υψομετρικό φορτίο, 139, 149, 167
 Φαινόμενο Magnus, 404
 φορτίο πίεσης, 47, 54, 139, 155, 167-168
 » ταχύτητας, 139, 149, 155, 163-164, 167-168
 φυσικά μοντέλα, 464
 Χαρακτηριστικό μήκος, 451
 χρήσιμη ή διαθέσιμη ενέργεια, 307
 $\Psi(x,y)$ συνάρτηση, 348
 ψευδοπλαστικά, 19
 Bourdon, 63-65
 Btu, 12
 Hagen-Poiseuille, 520
 Rankine οβάλ, 396-397, 424
 Vena contracta, 150-151