

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14

ΟΡΙΑΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ
ΚΑΙ ΣΥΓΓΕΝΕΙΣ ΡΟΕΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγικές παρατηρήσεις και παραδοχές

14.1	Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	14.5
14.1.1	Η διατμητική τάση μέσα στο οριακό στρώμα	14.5
14.1.2	Το πάχος και ο αριθμός Reynolds του οριακού στρώματος	14.6
14.2	Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	14.9
14.2.1	Κατάστρωση των εξισώσεων οριακού στρώματος κατά Prandtl	14.9
14.2.2	Η κατανομή πίεσης στο οριακό στρώμα και στην επιφάνεια σωμάτων	14.11
14.2.3	Οι εξισώσεις του δισδιάστατου οριακού στρώματος	14.12
14.2.4	Οι εξισώσεις οριακού στρώματος για καμπύλες επιφάνειες και αξονοσυμμετρικά σώματα	14.12
14.3	ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	14.14
14.3.1	Ολοκλήρωση των εξισώσεων του οριακού στρώματος	14.14
14.3.2	Τα ολοκληρωτικά μεγέθη: πάχος μετάθεσης δ_1 , πάχος απώλειας ορμής δ_2 και ενέργειας δ_3	14.15
14.4	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	14.17
14.4.1	Μέθοδοι επίλυσης των εξισώσεων του οριακού στρώματος	14.17
14.4.2	Η έννοια της ομοιότητας κατανομών ταχύτητας στο οριακό στρώμα	14.18
14.4.3	Η αντίσταση τριβής στο οριακό στρώμα	14.20
14.4.4	Στρωτό ασυμπίεστο οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας	14.22
14.4.4A	Κατάστρωση και λύση της εξίσωσης του Blasius	14.22
14.4.4B	Αντίσταση και ολοκληρωτικά μεγέθη οριακού στρώματος πλάκας	14.24
14.4.5	Ασυμπίεστο στρωτό οριακό στρώμα σε καμπύλες επιφάνειες	14.27
14.4.5A	Λύση της ολοκληρωτικής εξίσωσης με τη μέθοδο του Pohlhausen	14.27
14.4.5B	Η φυσική σημασία της παραμέτρου μορφής Λ του Pohlhausen	14.28
14.4.6	Οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας κατά τη μέθοδο του Pohlhausen	14.30
14.4.7	Στρωτό οριακό στρώμα σε επιφάνειες υπό κλίση – Εξίσωση Falkner-Skan	14.33
14.4.8	Λύσεις της εξίσωσης Falkner-Skan	14.35
14.4.9	Η σημασία των ολοκληρωτικών μεγεθών και των μεθόδων ομοιότητας για την ανάλυση του οριακού στρώματος	14.38
14.5	ΤΥΡΒΩΔΗ ΟΡΙΑΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ	14.39
14.5.1	Φαινομενολογία της τύρβης στο οριακό στρώμα	14.39
14.5.1A	Τυρβώδης διακύμανση των ροϊκών μεγεθών και μέση ταχύτητα	14.39
14.5.1B	Πάχος του τυρβώδους οριακού στρώματος και του ιξώδους υποστρώματος	14.42
14.5.2	Βασικές σχέσεις του δισδιάστατου οριακού στρώματος	14.43
14.5.3	Η παραδοχή του μήκους μείξης (πρότυπα Prandtl και von Karman)	14.45
14.5.4	Κατανομή ταχύτητας στο τυρβώδες οριακό στρώμα επίπεδης λείας πλάκας και λείου αγωγού	14.47
14.5.4A	Ο γενικός λογαριθμικός νόμος κατανομής ταχύτητας	14.47
14.5.4B	Θεωρητική και πειραματική κατανομή ταχύτητας	14.49

14.5.5	Τυρβώδης ροή σε κυκλικούς αγωγούς με υδραυλικά λεία τοιχώματα	14.51
14.5.5A	Ο γενικός εκθετικός νόμος κατανομής ταχύτητας και ο συντελεστής τριβής λ κατά Blasius	14.51
14.5.5B	Ο γενικός λογαριθμικός νόμος κατανομής ταχύτητας και ο συντελεστής τριβής για μεγάλους αριθμούς Reynolds	14.55
14.5.6	Τυρβώδες οριακό στρώμα κυκλικών αγωγών με τραχέα τοιχώματα.....	14.59
14.5.6A	Τραχέα και λεία τοιχώματα και οριακό στρώμα.....	14.59
14.5.6B	Ο νόμος κατανομής ταχύτητας στο οριακό στρώμα τραχείας επιφάνειας.....	14.61
14.6	ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΛΑΚΑ	14.64
14.6.1	Τυρβώδες οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας με λεία επιφάνεια για αριθμούς Reynolds μέχρι 10^5 (εκθετικός νόμος ταχύτητας)	14.64
14.6.2	Συντελεστής αντίστασης πλάκας με βάση τον εκθετικό νόμο κατανομής ταχύτητας	14.66
14.6.3	Τυρβώδες οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας με λεία επιφάνεια για $Re > 10^5$ (λογαριθμικός νόμος ταχύτητας).....	14.67
14.6.4	Τυρβώδες οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας με τραχέα επιφάνεια και ισοδύναμη τραχύτητα	14.68
14.6.5	Στρωτό και τυρβώδες οριακό στρώμα: Σύγκριση τυπικών μεγεθών	14.72
14.7	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΟΡΙΑΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ	14.73
14.7.1	Οι βασικές εξισώσεις	14.73
14.7.1A	Η εξίσωση ενέργειας και η εξίσωση ορμής για ανισόθερμες ροές.....	14.73
14.7.1B	Η μεταφορά θερμότητας στο οριακό στρώμα – Ιδιοθερμοκρασία και η μέτρηση θερμοκρασίας τοιχώματος	14.74
14.7.2	Πάχος του θερμοκρασιακού οριακού στρώματος.....	14.75
14.7.3	Η εξίσωση ενέργειας για τυρβώδες θερμοκρασιακό οριακό στρώμα	14.76
14.7.4	Η εξίσωση ενέργειας και η ολική ενθαλπία	14.77
14.7.5	Λύση της εξίσωσης ενέργειας για το θερμοκρασιακό οριακό στρώμα για $Pr=1$	14.78
14.7.6	Μεταφορά θερμότητας στο οριακό στρώμα συμπεσστής ροής για $Pr=1$ και η αναλογία Reynolds	14.79
14.7.7	Μεταφορά θερμότητας σε συμπίεστο οριακό στρώμα με $Pr \neq 1$	14.82
14.7.8	Συντελεστής τριβής πλάκας σε συμπίεστη ροή.....	14.86
14.7.9	Οι ολοκληρωτικές σχέσεις στο συμπίεστο οριακό στρώμα	14.89
14.8	ΟΡΙΑΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΣΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	14.91
14.8.1	Οριακά στρώματα σε συνθήκες μεταβαλλόμενης πίεσης.....	14.91
14.8.2	Ο συντελεστής αντίστασης σε τυρβώδες οριακό στρώμα σε καμπύλη επιφάνεια (Μέθοδος του Head)	14.92
14.8.3	Υπολογισμός τυρβώδους οριακού στρώματος με τη μέθοδο του Michel.....	14.93
14.9	Η ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΗΣ	14.94
14.9.1	Αλληλεπίδραση ταχύτητας-πίεσης και αποκόλληση	14.94
14.9.2	Αποκόλληση οριακού στρώματος σε ροή γύρω από κύλινδρο και σφαίρα.....	14.97
14.9.3	Τεχνητή μετάβαση σε τυρβώδες οριακό στρώμα και ευνοϊκή μετατόπιση του σημείου αποκόλλησης. Το “σύρμα σκοντάμματος” του Prandtl	14.99
14.9.4	Αποκόλληση από αλληλεπίδραση οριακού στρώματος με κρουστικά κύματα	14.100
14.10	ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	14.102
14.10.1	Έλεγχος του οριακού στρώματος με προσροή ρευστού	14.102
14.10.2	Έλεγχος του οριακού στρώματος σε διαχύτη (ακροφύσιο) με αναρρόφηση.....	14.103
14.10.3	Έλεγχος οριακού στρώματος πλάκας με αναρρόφηση (ή προσροή)	14.105
14.11	ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΡΩΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΤΥΡΒΩΔΕΣ	14.107
14.11.1	Μετάβαση της στρωτής ροής σε τυρβώδη.....	14.107
14.11.2	Ευστάθεια (ή αστάθεια) του οριακού στρώματος.....	14.107
14.11.3	Κατάστρωση της εξίσωσης ευστάθειας παράλληλης δισδιάστατης ροής Orr – Sommerfeld.....	14.108
14.11.4	Διερεύνηση της ευστάθειας της στρωτής ροής με την εξίσωση Orr-Sommerfeld	14.111
14.11.5	Πειραματική διερεύνηση της μετάβασης του στρωτού οριακού στρώματος σε τυρβώδες.....	14.112
14.11.6	Χαρακτηριστικά μεγέθη και νεότερα αποτελέσματα της ευστάθειας του στρωτού οριακού στρώματος – Η μέθοδος e^n	14.114
14.12	ΡΟΪΚΑ ΠΕΔΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	14.116
14.12.1	Μείωση της μεταφοράς θερμότητας με έλεγχο του οριακού στρώματος	14.116
14.12.2	Μεταφορά θερμότητας μεταξύ ροής και τοιχωμάτων στις πρακτικές εφαρμογές	14.117

14.13	Η ΡΕΥΣΤΟΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΖΕΥΞΗ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΡΟΕΣ ΜΕ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	14.118
14.13.1	Μεταφορά θερμότητας σε ανισόθερμο ασυμπίεστο στρωτό οριακό στρώμα σε επίπεδη πλάκα	14.118
14.13.1Α	Φυσικομαθηματική μοντελοποίηση του ανισόθερμου οριακού στρώματος	14.118
14.13.1Β	Νόμος της ψύχρανσης του Νεύτωνα, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και ο αριθμός Nusselt	14.119
14.13.1Γ	Υπολογισμός της μεταφοράς θερμότητας με την ολοκληρωτική μέθοδο του οριακού στρώματος	14.121
14.13.2	Μεταφορά θερμότητας στρωτού και τυρβώδους ανισόθερμου ασυμπίεστου οριακού στρώματος - Ακριβής λύση για όλα τα ρευστά και αριθμός Nusselt	14.123
14.13.3	Ροή σε αγωγούς με μεταφορά θερμότητας – Ο αγωγός ως εναλλάκτης θερμότητας	14.124
14.13.3Α	Στρωτή ανισόθερμη ροή	14.124
14.13.3Β	Η μεταφορά θερμότητας σε τυρβώδη ροή αγωγών	14.125
14.13.3Γ	Ο αγωγός ως εναλλάκτης θερμότητας	14.126
14.13.4	Μεταφορά θερμότητας σε περιρρεόμενη σφαίρα και περιρρεόμενα κυλινδρικά σώματα μεμονωμένα ή σε συστοιχίες	14.129
14.13.5	Εναλλάκτες θερμότητας – Σύνθετα εσωτερικά και εξωτερικά ρευστοθερμικά πεδία με εντατική μεταφορά θερμότητας	14.133
14.13.6	Μεταφορά θερμότητας στο σημείο ανακοπής επάνω σε σώματα	14.134
14.13.7	Ορισμός της μέσης θερμοκρασίας στη μεταφορά θερμότητας	14.136
14.14	ΗΧΟΣ ΚΑΙ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΕ ΟΡΙΑΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΡΟΪΚΑ ΠΕΔΙΑ	14.138
14.14.1	Ηχητικά κύματα, ένταση ήχου και θόρυβος	14.138
14.14.2	Θόρυβος από ροϊκά πεδία σε κίνηση – Το φαινόμενο Doppler	14.141
14.14.3	Η κυματική εξίσωση διάδοσης του ήχου	14.141
14.14.4	Η σύνδεση των ηχητικών μεγεθών με τα ροϊκά μεγέθη: εξισώσεις Lighthill και Ffowcs-Williams/Hawkings και η προσομοίωση ηχητικών πηγών με μονόπολα, δίπολα και τετράπολα	14.142
14.14.5	Ρευστομηχανικός θόρυβος σε χαρακτηριστικά ροϊκά πεδία χαμηλών ταχυτήτων	14.144
14.14.5Α	Θόρυβος από το οριακό στρώμα	14.144
14.14.5Β	Θόρυβος από ελεύθερες εκροές και ακροφύσια	14.145
14.14.5Γ	Γένεση θορύβου στα ροϊκά πεδία κυλινδρικών σωμάτων	14.146
14.14.5Δ	Θόρυβος σε εσωτερικά ροϊκά πεδία	14.147
14.14.6	Θόρυβος σε διηχητικές και υπερηχητικές ροές και σε πεδία εκρήξεων	14.147
14.14.6Α	Η δημιουργία θορύβου σε υπερηχητικά ροϊκά πεδία	14.147
14.14.6Β	Ο υπερηχητικός κρότος κατά τις υπερηχητικές πτήσεις	14.148
14.14.6Γ	Εκρηκτικός θόρυβος από κινούμενα ισχυρά κρουστικά κύματα εκρήξεων	14.150
14.14.7	Εξασθένηση της στάθμης του ρευστοδυναμικού θορύβου με την απόσταση	14.151
14.14.8	Ηχορρύπανση, ηχοπροστασία και αντιθορυβική τεχνολογία	14.152

Εισαγωγικές Παρατηρήσεις και Παραδοχές

Η αλληλεπίδραση της κίνησης του σώματος με το ρευστό -υγρό ή αέριο- περιβάλλον μπορεί παραστατικά να διακριθεί σε δύο περιοχές. Η πρώτη είναι το ευρύτερο ροϊκό πεδίο, που χαρακτηρίζεται για την αμελητέα επίδραση της τριβής και εμπίπτει έτσι στο πεδίο της ιδεώδους ροής, όπως εξετάστηκε ήδη στο Κεφάλαιο 10. Οι σχετικοί υπολογισμοί καταλήγουν στη θεωρητική απεικόνιση και υπολογιστική ορατοποίηση του ροϊκού πεδίου και της κατανομής της πίεσης και ταχύτητας σ' αυτό και ιδιαίτερα στην εγγύς προς την επιφάνεια του σώματος περιοχή.

Η δεύτερη περιοχή αλληλεπίδρασης σώματος-ροής είναι το (μικρό σε πάχος αλλά μεγάλο σε έκταση) οριακό στρώμα, το οποίο αποτελεί το μεταβατικό "λεπτό" ροϊκό πεδίο μεταξύ της επιφάνειας του σώματος και του ιδεώδους, δηλ. του εξιδανικευμένου ως άτριβου, υπόλοιπου ροϊκού πεδίου. Το οριακό στρώμα σε επίπεδη πλάκα εξετάστηκε φαινομενολογικά στην εισαγωγή του Κεφαλαίου 8 και υπολογιστικά στο ίδιο κεφάλαιο με ειδική εφαρμογή στη ροή με τριβή σε κλειστούς αγωγούς και κατέληξε στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης και απώλειας ενέργειας, δηλ. της αναντίστρεπτης μεταβολής κινητικής ενέργειας σε (μη-χρησιμοποιήσιμη) ενέργεια θερμότητας ένεκα της τριβής του ρευστού.

Αυτή η μη-χρησιμοποιήσιμη ενέργεια πρέπει να αναπληρώνεται από το σύστημα κίνησης του σώματος και ο ακριβής υπολογισμός της με ταυτόχρονη επιδίωξη για την ελαχιστοποίησή της αποτελεί τον ύψιστο σκοπό της Θεωρίας του Οριακού Στρώματος και των σχετικών πειραματικών και λοιπών μετρήσεων. Επόμενη σημαντική επιδίωξη της ανάλυσης του οριακού στρώματος είναι η βελτιστοποίηση της μορφής του σώματος, ώστε στις εκάστοτε ροϊκές συνθήκες να προκύπτει ευσταθές ροϊκό πεδίο με προβλέψιμη και ως εκ τούτου ελεγχόμενη συμπεριφορά.

Η θεωρητική, υπολογιστική και πειραματική διερεύνηση των οριακών στρωμάτων κάθε μορφής αποτελεί το πλέον σημαντικό και εκτεταμένο πεδίο της Ρευστομηχανικής, το οποίο βρίσκεται σε συνεχή και αέναη εξέλιξη, ενώ τα εκάστοτε επιτυχή ερευνητικά αποτελέσματα προκαλούν συνεχή εκσυγχρονισμό στις τεχνολογικές εφαρμογές της Αεροδυναμικής και Υδροδυναμικής. Γι' αυτό το παρόν Κεφάλαιο 14 μόνο σαν μία ευρύτερη εισαγωγή εκπαιδευτικού χαρακτήρα μπορεί να θεωρηθεί, παρά το γεγονός, ότι παρέχει το πλήρες φυσικό υπόβαθρο για την κατανόηση των φαινομένων, δίνει δυνατότητες υπολογισμού πολλών πρακτικών εφαρμογών του οριακού στρώματος και αποτελεί τη βάση εκκίνησης οποιασδήποτε σχετικής μελετητικής ή/και ερευνητικής προσπάθειας.
