

ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΡΟΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγικές παρατηρήσεις και παραδοχές

11.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ	11.3
11.1.1	Βασικές σχέσεις συμπίεστης ροής για ιδανικό και πραγματικό αέριο	11.3
11.1.2	Η ταχύτητα του ήχου	11.5
11.1.3	Οι γραμμές Mach	11.7
11.1.4	Γένεση της διηχητικής και υπερηχητικής ροής – Πραγματικότητα και φυσικομαθηματική απόδειξη	11.8
11.2	ΡΥΘΜΟΣ ΡΟΗΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΣΕ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΡΟΗ	11.11
11.2.1	Ροή μάζας και ολικής ενθαλπίας	11.11
11.2.2	Μέγιστος ρυθμός ροής μάζας σε υπερηχητικό ακροφύσιο (Laval)	11.13
11.3	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	11.14
11.3.1	Το ακροφύσιο Laval ως σύστημα δημιουργίας συνθηκών υπερηχητικής ροής	11.14
11.3.2	Υπερεκτόνωση, υποεκτόνωση, μετάπτωση και ασυνέχειες ροής σε ακροφύσια	11.15
11.3.3	Δυνατότητες και εμπόδια ισεντροπικής εκτόνωσης σε υψηλούς αριθμούς Mach (μέχρι και Mach M=50)	11.16
11.4	ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΡΟΗ ΣΕ ΑΚΡΟΦΥΣΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟΜΙΑ ΕΚΡΟΗΣ ΣΤΙΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	11.20
11.4.1	Συμπίεστη εκροή από στόμιο	11.20
11.4.2	Ακροφύσια Laval στις τεχνικές εφαρμογές	11.22
11.4.3	Διεργασία συμπίεσης της ροής σε διαχύτες και ακροφύσια στο διάγραμμα ενθαλπίας h- εντροπίας s	11.24
11.5	ΚΡΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ	11.27
11.5.1	Η επιβράδυνση της υπερηχητικής ροής και η μετάπτωσή της σε υποηχητική	11.27
11.5.2	Κάθετο κρουστικό κύμα και η καταστατική μεταβολή των Ράνκιν (Rankine, 1870) και Υγκονιό (Hugoniot, 1887)	11.28
11.5.3	Απώλειες μηχανικής ενέργειας σε κρουστικά κύματα	11.32
11.5.4	Πλάγιο κρουστικό κύμα	11.35
11.5.5	Σχηματισμός πλάγιου κρουστικού κύματος σε σφηνοειδή σώματα	11.37
11.5.6	Ασθενή και ισχυρά κρουστικά κύματα	11.40
11.5.7	Κίνηση και διάδοση κρουστικών κυμάτων στο χώρο	11.42
11.6	ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΗ ΡΟΗ ΠΑΝΩ ΣΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	11.44
11.6.1	Η υπερηχητική εκτόνωση Prandtl-Meyer	11.44
11.6.2	Υπολογισμός της εκτόνωσης Prandtl – Meyer σε καμπύλες επιφάνειες πτερυγίων	11.46
11.7	ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΡΟΗ ΣΕ ΣΩΛΗΝΩΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ – ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΕΝΕΚΑ ΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΚΡΙΣΙΜΑ ΜΕΓΕΘΗ	11.49
11.7.1	Η μεταφορά αερίων σε σωληνώσεις και σωληνογραμμές	11.49
11.7.2	Αδιαβατική ροή σε αγωγό σταθερής διατομής – Ροή Fanno	11.50
11.7.3	Υπερηχητική και υποηχητική αδιαβατική ροή σε αγωγό (ροή Fanno)	11.53
11.7.4	Το κρίσιμο μήκος αγωγού σε αδιαβατική ροή με τριβή	11.56
11.7.5	Ισόθερμη ροή σε αγωγό σταθερής διατομής με τριβή	11.59
11.7.5A	Σωληνογραμμές μεταφοράς αερίων	11.59
11.7.5B	Το κρίσιμο μήκος	11.61
11.7.6	Η γραμμή Fanno (αδιαβατική ροή ιδανικού αερίου σε αγωγό)	11.62

11.8	ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΑΤΡΙΒΗ ΡΟΗ ΜΕ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - ΡΟΗ RAYLEIGH	11.64
11.8.1	Ροή σε αγωγό σταθερής διατομής	11.64
11.8.2	Η γραμμή Rayleigh (διάθερμη άτριβη ροή σε αγωγό).....	11.69

Εισαγωγικές παρατηρήσεις και παραδοχές

Όπως όλα τα υλικά μέσα έτσι και τα ρευστά παρουσιάζουν ελαστικότητα και κατ' επέκταση συμπιεστότητα, η οποία οδηγεί σε μεταβολές όγκου και αντίστοιχα σε μεταβολές πυκνότητας. Το μέτρο ελαστικότητας E_f καθορίζει το βαθμό συμπιεστότητας των υλικών. Τα στερεά παρουσιάζουν πολύ μικρή συμπιεστότητα, το νερό, με εκατό περίπου φορές μικρότερο E_f , έχει μεγαλύτερη συμπιεστότητα (αλλά αμελητέας επίδρασης για τις συνήθεις εφαρμογές ροής νερού), ενώ τα αέρια από τη φύση τους έχουν τον υψηλότερο βαθμό συμπιεστότητας.

Έτσι ο όρος συμπιεστή ροή έχει κυρίως εφαρμογή στα αέρια, αφού στην επιφάνεια σώματος (σημείο ανακοπής) σε ταχύτητα περίπου 50 m/s η αύξηση της πίεσης (και αντίστοιχα της πυκνότητας) είναι ήδη 1%. Αυτή η μεταβολή θεωρείται συμβατικά το όριο, άνω του οποίου η ροή αερίων θεωρείται συμπιεστή. Τούτο σημαίνει, ότι οι σχέσεις για ασυμπίεστη ροή δεν δίνουν πλέον ακριβή αποτελέσματα, αν εφαρμοστούν σε συμπιεστή ροή, δηλ. σε ροές με ταχύτητες μεγαλύτερες των 50 m/s, οι οποίες για αέρα (υπό κανονικές συνθήκες) αντιστοιχούν σε αριθμό Mach $M \approx 0,15$. Είναι ο αδιάστατος αυτός χαρακτηριστικός αριθμός, δηλ. ο λόγος της τοπικής ταχύτητας ροής προς την ταχύτητα του ήχου στο ίδιο σημείο, ο οποίος χρησιμοποιείται ως μέτρο όχι μόνο για τη συμπιεστότητα των αερίων αλλά επίσης για την οριοθέτηση των ροικών περιοχών της συμπιεστής ροής.

Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να θεωρηθούν ροϊκά πεδία γύρω από αεροχήματα (αεροπλάνα, πύραυλοι, διαστημοπλάνα, διαστημοχήματα κ.α.), τα οποία στη σύγχρονη αεροναυτική κινούνται σε όλα τα ύψη της ατμόσφαιρας της γης (αλλά και πλανητών) και σ' όλο το διάστημα. Το φάσμα των αριθμών Mach πτήσης είναι ευρύ και φθάνει μέχρι και $M = 30$, ενώ παράλληλα στην επιφάνεια των αεροχημάτων αυξάνει η θερμοκρασία και η πίεση με φαινόμενα αφετεροίωσης (διάσπασης της δομής των μορίων) και ιοντισμού (των ατόμων) και συνακόλουθη πολυπλοκότητα των εξισώσεων ροής και δυσκολία επίλυσης. Κατά συνέπεια οι ιδιομορφίες της συμπιεστής ροής σε διάφορες περιοχές πτήσης καθορίζουν το μαθηματικό χαρακτήρα και την πολυπλοκότητα της υπολογιστικής προσομοίωσης. Γι' αυτό έχει συμβατικά καθιερωθεί, όπως αναλύθηκε ήδη, η ακόλουθη οριοθέτηση βάσει τιμών του αριθμού Mach της απέραντης ροής (δηλ. της πτήσης του αεροχήματος), οι οποίες έχουν συμβατική σημασία και δεν αποτελούν αυστηρά όρια φυσικομαθηματικού χαρακτήρα:

• υποηχητική ροή	$M_\infty < 0,15$	ασυμπίεστη	(11.1)
• υποηχητική ροή	$0,15 < M_\infty < 0,8$	συμπιεστή	
• διηχητική ροή	$0,8 < M_\infty < 1,2$	συμπιεστή	
• υπερηχητική ροή	$1,2 < M_\infty < 3,5$	συμπιεστή	
• υπερυπερηχητική ροή	$3,5 < M_\infty$	συμπιεστή	

Από τις παραπάνω περιοχές η πρώτη, της υποηχητικής ροής, διατρέχει το μεγαλύτερο μέρος του βιβλίου. Το παρόν Κεφάλαιο πραγματεύεται την συμπιεστή ροή για $0,15 < M_\infty < 3,5$, ενώ η υπερυπερηχητική εξετάζεται κυρίως στο Κεφάλαιο 17 και εν μέρει στα 18 και 19. Η χρησιμοποίηση του αριθμού Mach παραπέμπει αμέσως σε αεροπλάνα και άλλα ιπτάμενα αντικείμενα σε υψηλές ταχύτητες. Όμως η συμπιεστή ροή παρουσιάζεται και σε πολλές άλλες "προσγειωμένες" εφαρμογές. Είναι, ενδεικτικά, η ροή σε αγωγούς μεταφοράς αερίων και ατμών, όπου οι μεταβολές πυκνότητας οφείλονται λιγότερο στις μεταβολές ταχύτητας και πολύ περισσότερο στην πτώση πίεσης, η ροή υψηλών ταχυτήτων αέρα σε

περιοχές εκρήξεων και ασφαλώς η ροή αέρα, καυσαερίων και ατμών σε πτερυγώσεις αεροστροβίλων, ατμοστροβίλων και σε χώρους κινητήρων εσωτερικής καύσεως κ.ά. μηχανές.

Η ευρύτητα εφαρμογών της συμπιεστής ροής και η εκπαιδευτική σκοπιμότητα επιβάλλει τη διερεύνησή της στο παρόν ειδικό κεφάλαιο, το οποίο έχει ως αφετηρία τον ορισμό και το ρόλο της ταχύτητας του ήχου και αριθμού Mach αμέσως στις δύο πρώτες παραγράφους, που ακολουθούν.
