Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών
Τομέας Αεροναυπηγικής
Εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής

Τεχνολογίες Προσαρμοζόμενων Πτερύγων: Ανασκόπηση Τεχνολογιών Morphing, Μεθόδων Δυναμικού Ροής και Έξυπνων Υλικών

Σπουδαστική Εργασία

Θεόδωρος Ηλιόπουλος
1093547

Επιβλέποντες
Καθηγητής Βασίλειος Κωστόπουλος
Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πατρών

Πάτρα, 2026

Περίληψη

Η εργασία εξετάζει τις τεχνολογίες προσαρμοζόμενης γεωμετρίας, γνωστές ως morphing technologies, με κύρια εφαρμογή τις αεροπορικές πτέρυγες. Η κεντρική ιδέα τους είναι ότι ένα αεροσκάφος ή ένα επιμέρους τμήμα του μπορεί να μεταβάλλει ελεγχόμενα τη γεωμετρία του κατά την πτήση, ώστε να προσαρμόζεται σε διαφορετικές αποστολές, ταχύτητες και περιβαλλοντικές συνθήκες. Η ανάγκη αυτή προκύπτει από έναν βασικό περιορισμό της συμβατικής αεροναυπηγικής: τα περισσότερα αεροσκάφη βελτιστοποιούνται για ένα μικρό σύνολο σχεδιαστικών σημείων, ενώ η απόδοσή τους υποβαθμίζεται σε άλλες φάσεις του φακέλου πτήσης, όπως η απογείωση, η προσγείωση ή οι ελιγμοί.

Οι συμβατικές λύσεις, όπως τα πτερύγια καμπυλότητας, τα slats, τα air brakes και οι μεταβλητές διατάξεις σάρωσης, επιτρέπουν κάποια προσαρμογή της γεωμετρίας. Ωστόσο, λειτουργούν συνήθως ως διακριτοί μηχανισμοί, με αρθρώσεις, διάκενα και αυξημένη μηχανική πολυπλοκότητα. Για τον λόγο αυτό δεν εκφράζουν πλήρως τη σύγχρονη έννοια του morphing, η οποία συνδέεται περισσότερο με συνεχείς και ομαλές παραμορφώσεις, ενσωματωμένες στην ίδια τη δομή του αεροσκάφους. Η εργασία υπογραμμίζει ότι ο στόχος των morphing τεχνολογιών δεν είναι απλώς η αλλαγή σχήματος, αλλά η επίτευξη αποδοτικής πολυσημειακής προσαρμοστικότητας.

Η έννοια αυτή σχετίζεται άμεσα με τα αντικρουόμενα σχεδιαστικά κριτήρια της αεροναυπηγικής. Για παράδειγμα, μια λεπτή αεροτομή είναι ευνοϊκή για πτήσεις υψηλής ταχύτητας, αλλά μπορεί να παρουσιάζει μειονεκτήματα σε χαμηλές ταχύτητες. Αντίστοιχα, μια πτέρυγα μεγάλου λόγου διατάματος μειώνει την επαγόμενη αντίσταση, αλλά αυξάνει τις δομικές απαιτήσεις και το βάρος. Οι morphing πτέρυγες επιχειρούν να αντιμετωπίσουν τέτοιου είδους συμβιβασμούς μεταβάλλοντας παραμέτρους όπως το εκπέτασμα, η χορδή, η καμπυλότητα, το πάχος, η στρέψη, η δίεδρος και η γωνία σάρωσης.

Η ανάπτυξη ενός λειτουργικού morphing συστήματος αποτελεί κατ’ εξοχήν διεπιστημονικό πρόβλημα. Η αεροδυναμική καθορίζει τις επιθυμητές γεωμετρικές μεταβολές που μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση άντωσης, μείωση αντίστασης, καθυστέρηση αποκόλλησης ή βελτίωση ελέγχου. Η δομική μηχανική, όμως, επιβάλλει περιορισμούς, επειδή η πτέρυγα πρέπει να παραμένει ικανή να μεταφέρει αεροδυναμικά φορτία, ροπές και κόπωση. Η επιστήμη υλικών αναζητά υλικά που να συνδυάζουν ευκαμψία, αντοχή, χαμηλό βάρος και ελεγχόμενη ακαμψία, ενώ τα συστήματα ελέγχου καθορίζουν πότε και με ποιον τρόπο θα πραγματοποιείται η μεταβολή σχήματος.

Τα κύρια οφέλη των morphing τεχνολογιών εντοπίζονται στη δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης σε πολλαπλά σημεία λειτουργίας. Ένα αεροσκάφος με προσαρμοζόμενη πτέρυγα μπορεί θεωρητικά να λειτουργεί αποδοτικά σε μεγαλύτερο εύρος αποστολών, να μειώνει την κατανάλωση καυσίμου, να βελτιώνει την ευελιξία και να ελέγχει καλύτερα την κατανομή φορτίων. Επιπλέον, η ομαλή μεταβολή καμπυλότητας ή πάχους μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη του οριακού στρώματος, να καθυστερήσει την αποκόλληση και να περιορίσει την παρασιτική αντίσταση. Παρόλα αυτά, η πρακτική υλοποίηση παραμένει δύσκολη, διότι τα πρόσθετα συστήματα δεν πρέπει να ακυρώνουν τα αεροδυναμικά κέρδη μέσω αυξημένου βάρους, κόστους ή μειωμένης αξιοπιστίας.

Η εργασία ταξινομεί τις morphing μεταβολές σε τρεις κύριες αεροδυναμικές κατηγορίες: μεταβολές κάτοψης, μεταβολές εκτός επιπέδου και μεταβολές αεροτομής. Οι μεταβολές κάτοψης περιλαμβάνουν αλλαγές στο εκπέτασμα, στη χορδή και στη γωνία σάρωσης. Η μεταβολή του εκπετάσματος επηρεάζει τον λόγο διατάματος και επομένως την επαγόμενη αντίσταση, την εμβέλεια και την αντοχή πτήσης. Η μεταβολή της χορδής αλλάζει την επιφάνεια της πτέρυγας, ενώ η μεταβολή σάρωσης εξυπηρετεί κυρίως ανάγκες υψηλών ταχυτήτων. Οι μεταβολές αυτές έχουν

σημαντική αεροδυναμική αξία, αλλά συχνά απαιτούν σύνθετους μηχανισμούς και ενισχυμένη δομική αντοχή.

Οι μεταβολές εκτός επιπέδου περιλαμβάνουν τη στρέψη, τη δίεδρο και την καμπτική παραμόρφωση κατά το άνοιγμα της πτέρυγας. Τέτοιες μεταβολές σχετίζονται συχνά με τον έλεγχο πτήσης, τη βελτίωση της ευστάθειας, την κατανομή άντωσης και την αεροελαστική συμπεριφορά. Αντίθετα, η μεταβολή αεροτομής αφορά κυρίως την καμπυλότητα και το πάχος. Η μεταβολή καμπυλότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι μπορεί να αυξήσει τον μέγιστο συντελεστή άντωσης σε χαμηλές ταχύτητες, να βελτιώσει την απόδοση σε επιμέρους φάσεις πτήσης και να επιτρέψει ομαλότερο έλεγχο της ροής σε σχέση με τα συμβατικά αρθρωτά πτερύγια.

Από δομική άποψη, η εργασία διακρίνει δύο βασικές αρχιτεκτονικές: άκαμπτες και ενδοτικές ή συμμορφούμενες δομές. Οι άκαμπτες δομές είναι η κυρίαρχη συμβατική επιλογή, επειδή παρέχουν υψηλή ικανότητα μεταφοράς φορτίων και μικρές παραμορφώσεις. Ωστόσο, είναι λιγότερο κατάλληλες για συνεχείς μορφοποιήσεις, επειδή απαιτούν διακριτά κινητά μέρη. Οι ενδοτικές δομές, αντίθετα, επιτρέπουν ελαστική παραμόρφωση και μπορούν να διατηρούν ομαλή επιφάνεια, όμως απαιτούν προσεκτική ισορροπία μεταξύ ευκαμψίας και ακαμψίας. Το βασικό δομικό παράδοξο είναι ότι το ίδιο σύστημα πρέπει να παραμορφώνεται εύκολα στην επιθυμητή διεύθυνση, αλλά να παραμένει ισχυρό στις διευθύνσεις φόρτισης.

Αντίστοιχη διάκριση γίνεται και στους ενεργοποιητές. Τα κινηματικά συστήματα βασίζονται σε αρθρώσεις, συνδέσμους, υδραυλικούς, μηχανικούς ή ηλεκτρικούς μηχανισμούς. Είναι τεχνολογικά ώριμα, αλλά συχνά βαριά και πολύπλοκα. Τα ενδοτικά συστήματα ενεργοποίησης αξιοποιούν την ελαστική παραμόρφωση υλικών ή μηχανισμών και συνδέονται στενά με έξυπνα υλικά, όπως κράματα μνήμης σχήματος, πολυμερή μνήμης σχήματος και πιεζοηλεκτρικά σύνθετα. Η μετάβαση από συμβατικούς μηχανισμούς σε τέτοιες λύσεις αποτελεί βασικό λόγο για την αναβίωση του ενδιαφέροντος στις morphing τεχνολογίες.

Η ιστορική αναδρομή δείχνει ότι η ιδέα της προσαρμοζόμενης γεωμετρίας εμφανίζεται ήδη από τα πρώτα στάδια της αεροπορίας. Το wing-warping των αδελφών Wright αξιοποιούσε τη δομική ευκαμψία της πτέρυγας για έλεγχο της πτήσης, ενώ ο Clement Ader είχε προτείνει πτέρυγες εμπνευσμένες από νυχτερίδες με δυνατότητα μεταβολής σχήματος. Αργότερα, οι προτάσεις μεταβλητής καμπυλότητας των Holle, Judge και Parker έδειξαν ότι οι μηχανικοί είχαν αναγνωρίσει πολύ νωρίς την ανάγκη για προσαρμογή της αεροτομής στις συνθήκες πτήσης. Η τεχνολογία της εποχής, όμως, δεν μπορούσε να συνδυάσει μεγάλη παραμόρφωση με επαρκή ακαμψία και αξιοπιστία.

Στις επόμενες δεκαετίες εμφανίστηκαν πειραματικά αεροσκάφη με μεταβλητό εκπέτασμα και κυρίως αεροσκάφη μεταβλητής σάρωσης, όπως τα Bell X-5, F-111, F-14, MiG-23 και B-1. Αν και οι εφαρμογές αυτές πέτυχαν σημαντική προσαρμογή σε διαφορετικά καθεστώτα ταχύτητας, συνοδεύονταν από κόπωση, μεγάλο βάρος και αυξημένη πολυπλοκότητα. Το πρόγραμμα Mission Adaptive Wing αποτέλεσε καθοριστική εξέλιξη, διότι στόχευσε στη συνεχή μεταβολή καμπυλότητας με ομαλή επιφάνεια. Οι δοκιμές του έδειξαν ότι η τεχνολογία μπορεί να βελτιώσει την απόδοση εκτός σχεδιαστικού σημείου, αλλά ανέδειξαν και την ανάγκη συνδυασμένης θεώρησης αεροδυναμικής, δομής, βάρους και συντήρησης.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση εστιάζει κυρίως σε morphing πτέρυγες μεταβαλλόμενης καμπυλότητας, επειδή η συγκεκριμένη κατηγορία συνδυάζει ισχυρό αεροδυναμικό ενδιαφέρον με ρεαλιστικές δυνατότητες υλοποίησης. Το finger concept του Monner αντικαθιστά τις συμβατικές άκαμπτες νευρώσεις με κινηματικά συνδεδεμένα στοιχεία που μπορούν να καμπυλώνονται και να διαμορφώνουν ομαλή εξωτερική επιφάνεια. Το belt-rib concept αξιοποιεί έναν κλειστό «ιμάντα» γύρω από την αεροτομή και εσωτερικά στοιχεία που μεταφέρουν την ενεργοποίηση σε ελεγχόμενη

μεταβολή καμπυλότητας. Αυτές οι λύσεις επιδιώκουν να μειώσουν την απαιτούμενη ενεργοποίηση, διατηρώντας παράλληλα τη δομική λειτουργικότητα.

Το πρόγραμμα Smart Wing των DARPA/AFRL/NASA ενσωμάτωσε κράματα μνήμης σχήματος σε πτέρυγα με ομαλά διαμορφούμενα πτερύγια και ailerons. Οι δοκιμές σε αεροσήραγγα έδειξαν μείωση αποκόλλησης, βελτίωση ροπής κύλισης και παραγωγή μεγαλύτερης άντωσης με μικρότερες γωνίες εκτροπής συγκριτικά με συμβατικές διατάξεις. Παράλληλα, όμως, ανέδειξαν κρίσιμους περιορισμούς των SMA, όπως κόπωση, χαμηλό εύρος συχνοτήτων ενεργοποίησης, μη ομοιόμορφη παραμόρφωση κατά το άνοιγμα και περιορισμένη δυνατότητα εκτροπής. Η αξία του προγράμματος ήταν ότι επιβεβαίωσε την τεχνική εφικτότητα, αλλά και τα βασικά προβλήματα ωρίμανσης.

Το SARISTU πρόγραμμα προσέγγισε το morphing trailing edge από αερο-δομική σκοπιά, ενσωματώνοντας προκαταρκτική βελτιστοποίηση που απέκλειε δομικά μη εφικτά σχήματα πριν την αεροδυναμική αξιολόγηση. Αντίστοιχα, οι εργασίες των Karagiannis et al., Hutapea et al. και Icardi-Ferrero μελέτησαν SMA σύρματα, SMA ελατήρια, SMA μοχλούς και SMA torque tubes ως τρόπους ενεργοποίησης μεταβλητής καμπυλότητας. Οι προσεγγίσεις αυτές δείχνουν ότι τα SMA μπορούν να παράγουν ικανές παραμορφώσεις, αλλά η τεχνολογική τους ετοιμότητα παραμένει περιορισμένη για μεγάλης κλίμακας αεροπορικές εφαρμογές.

Άλλες σημαντικές λύσεις βασίζονται σε ανισότροπες δομές. Οι κυματοειδείς δομές του Takahashi et al. αξιοποιούν υψηλή ακαμψία κατά το άνοιγμα και χαμηλή ακαμψία κατά τη χορδή, επιτρέποντας μεταβολή καμπυλότητας χωρίς απώλεια της ικανότητας μεταφοράς φορτίων. Η fishbone δομή των Woods, Bilgen και Friswell είναι βιομιμητική διάταξη με ενδοτικό σκελετό, ελαστομερές σύνθετο δέρμα, ζεύγος ανταγωνιστικών τενόντων και άκαμπτη κύρια δοκό. Οι δοκιμές της έδειξαν μείωση αντίστασης και βελτίωση του λόγου άντωσης προς αντίσταση σε σχέση με συμβατικό πτερύγιο. Τέλος, το Adaptive Compliant Trailing Edge της FlexSys/NASA αποτελεί σημαντικό παράδειγμα πτητικής δοκιμής ενδοτικού πτερυγίου, με αναφερόμενα οφέλη σε απόδοση και θόρυβο.

Το δεύτερο κεφάλαιο θέτει το αεροδυναμικό υπόβαθρο που απαιτείται για τη μελλοντική ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων. Αρχικά παρουσιάζονται οι αρχές διατήρησης μάζας και γραμμικής ορμής με προσέγγιση όγκου ελέγχου. Μέσω του θεωρήματος απόκλισης του Gauss, οι ολοκληρωτικές μορφές μετατρέπονται σε διαφορικές εξισώσεις. Η εξίσωση συνέχειας περιγράφει τη διατήρηση μάζας και, για ασυμπίεστη ροή, καταλήγει στη συνθήκη μηδενικής απόκλισης του πεδίου ταχύτητας. Αντίστοιχα, η διατήρηση ορμής οδηγεί στη γενική μορφή των εξισώσεων κίνησης, όπου οι επιφανειακές τάσεις περιλαμβάνουν πίεση και ιξώδεις συνεισφορές.

Στη συνέχεια εισάγονται η στροβιλότητα και η αστρόβιλη ροή. Η στροβιλότητα εκφράζει την τοπική περιστροφή των στοιχείων του ρευστού και ισούται με τη στροφή του πεδίου ταχύτητας. Υπό προϋποθέσεις ασυμπίεστης ροής, συντηρητικών δυνάμεων σώματος και αμελητέου ιξώδους, δεν παράγεται νέα στροβιλότητα όταν η αρχική ροή είναι αστρόβιλη. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να οριστεί δυναμικό ταχύτητας, του οποίου η κλίση δίνει το πεδίο ταχύτητας. Η ασυμπίεστη συνθήκη οδηγεί τότε στην εξίσωση Laplace για το δυναμικό ταχύτητας.

Η θεωρία δυναμικού ροής αποτελεί σημαντική βάση για μεθόδους χαμηλού υπολογιστικού κόστους, όπως οι μέθοδοι επιφανειακών ιδιομορφιών. Με τη χρήση των ταυτοτήτων Green και του θεωρήματος αναπαράστασης, η λύση ενός προβλήματος δυναμικού μπορεί να εκφραστεί μέσω τιμών και παραγώγων πάνω στα όρια του πεδίου. Η συνάρτηση Green ερμηνεύεται ως θεμελιώδης λύση για σημειακή διέγερση, ενώ η αρχή της γραμμικής επαλληλίας επιτρέπει την αναπαράσταση πιο σύνθετων πεδίων ως συνεχή κατανομή στοιχειωδών λύσεων.

Στην αεροδυναμική εφαρμογή, η εξίσωση Laplace λύνεται στο εξωτερικό πεδίο της ροής με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Στην επιφάνεια του σώματος επιβάλλεται συνθήκη μη

διαπερατότητας, δηλαδή μηδενική κανονική συνιστώσα της ταχύτητας. Στο άπειρο, η ροή πρέπει να τείνει στην ελεύθερη ροή. Με τη διατύπωση Green, το δυναμικό εκφράζεται με κατανομές πηγών και δίπολων πάνω στα όρια του σώματος και του απορρεύματος. Οι πηγές συνδέονται με άλμα στην κανονική παράγωγο του δυναμικού, ενώ τα δίπολα με άλμα στο ίδιο το δυναμικό. Έτσι, το πρόβλημα ανάγεται στον προσδιορισμό κατάλληλων κατανομών ιδιομορφιών που ικανοποιούν τις συνοριακές συνθήκες.

Η εργασία τονίζει ότι οι παραδοχές δυναμικού ροής δεν περιγράφουν το οριακό στρώμα και τις ιξώδεις δυνάμεις. Παρόλα αυτά, η προσέγγιση είναι χρήσιμη για την εξωτερική ροή, όπου σε υψηλούς αριθμούς Reynolds οι ιξώδεις όροι είναι σχετικά μικροί. Η πίεση στην επιφάνεια μπορεί συχνά να εκτιμηθεί ικανοποιητικά, άρα η θεωρία δυναμικού αποτελεί κατάλληλη βάση για προκαταρκτική αεροδυναμική

Το τρίτο κεφάλαιο εξετάζει τις δομικές απαιτήσεις των morphing πτερύγων. Η αεροδυναμική επιδιώκει σχήματα που μεγιστοποιούν την απόδοση, αλλά η δομή πρέπει να διατηρεί επαρκή αντοχή, ακαμψία, αξιοπιστία και δυνατότητα επιθεώρησης. Τα βασικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται είναι ελεγχόμενες ιδιότητες ακαμψίας, ικανότητα μεταφοράς φορτίων, χαμηλό βάρος και συνεχής λεία εξωτερική επιφάνεια. Η σύζευξη αεροδυναμικής και δομικής συμπεριφοράς είναι απαραίτητη, επειδή η μεταβολή σχήματος επηρεάζει τα φορτία, την αεροελαστικότητα και την κατανομή τάσεων.

Οι προσαρμοζόμενες επικαλύψεις είναι κρίσιμες, διότι πρέπει να παραμορφώνονται χωρίς να δημιουργούν ασυνέχειες στην επιφάνεια. Τα ελαστομερή υλικά παρέχουν μεγάλη ελαστική παραμόρφωση και καλή ανάκτηση σχήματος, αλλά δεν είναι ιδανικά ως κύριοι φορείς υψηλών φορτίων και επηρεάζονται από θερμοκρασιακές μεταβολές. Τα αυξητικά υλικά διαθέτουν αρνητικό λόγο Poisson, παραμορφώνονται με μικρή απαιτούμενη ενεργοποίηση και παρουσιάζουν καλή κόπωση, αλλά συχνά έχουν χαμηλή ακαμψία. Οι κυματοειδείς δομές θεωρούνται ιδιαίτερα υποσχόμενες, επειδή παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία: μπορούν να είναι άκαμπτες σε μία διεύθυνση και εύκαμπτες σε άλλη. Ωστόσο, ενδέχεται να προκαλέσουν ανεπιθύμητες παραμορφώσεις, αποκόλληση ροής ή προβλήματα αποκόλλησης στρώσεων σε σύνθετα υλικά.

Οι ενεργοποιητές αποτελούν το μέσο με το οποίο πραγματοποιείται η μεταβολή σχήματος. Τα κράματα μνήμης σχήματος, ιδιαίτερα τα Ni-Ti, μπορούν να επανέρχονται σε προκαθορισμένη μορφή μέσω θερμικής διέγερσης, λόγω μετάβασης μεταξύ μαρτενσιτικής και ωστενιτικής φάσης. Προσφέρουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και δυνατότητα απλής, ελαφριάς ενεργοποίησης, αλλά παρουσιάζουν υστέρηση, μη γραμμικότητα, κόπωση και χαμηλούς ρυθμούς απόκρισης λόγω θερμικών περιορισμών. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, όπως τα PZT και τα macro fiber composites, μετατρέπουν ηλεκτρική διέγερση σε μηχανική παραμόρφωση και μπορούν να λειτουργήσουν και ως αισθητήρες. Τα MFC είναι πιο κατάλληλα από τα συμβατικά κεραμικά PZT για morphing εφαρμογές, επειδή μπορούν να καμφθούν και να ενσωματωθούν σε σύνθετες επιφάνειες.

Συμπερασματικά, η εργασία παρουσιάζει τις morphing τεχνολογίες ως πολλά υποσχόμενη αλλά τεχνικά απαιτητική κατεύθυνση. Η βασική δυσκολία δεν βρίσκεται μόνο στην αεροδυναμική βελτίωση, αλλά στη συνολική υλοποίηση ενός συστήματος που να παραμορφώνεται, να φέρει φορτία, να παραμένει αξιόπιστο και να προσφέρει πραγματικό καθαρό όφελος. Η επιτυχής εξέλιξη του πεδίου απαιτεί συνδυασμό αεροδυναμικής μοντελοποίησης, δομικής σχεδίασης, κατάλληλων υλικών και αποδοτικών ενεργοποιητών.

Πίνακας Βασικής Ορολογίας

Όρος	Επεξήγηση
Morphing	Ελεγχόμενη μεταβολή γεωμετρίας αεροσκάφους ή επιμέρους επιφάνειας κατά την πτήση.
Προσαρμοζόμενη πτέρυγα	Πτέρυγα με δυνατότητα αλλαγής χαρακτηριστικών όπως καμπυλότητα, στρέψη, εκπέτασμα ή χορδή.
Πολυσημειακή προσαρμοστικότητα	Ικανότητα διατήρησης καλής απόδοσης σε περισσότερα από ένα σημεία ή φάσεις πτήσης.
Μεταβολή κάτοψης	Αλλαγή γεωμετρίας που επηρεάζει την προβολή της πτέρυγας, όπως εκπέτασμα, χορδή ή σάρωση.
Μεταβολή αεροτομής	Τοπική αλλαγή καμπυλότητας ή πάχους της αεροτομής.
Ενδοτική δομή	Δομή που παραμορφώνεται ελαστικά ώστε να επιτρέπει αλλαγή σχήματος και ταυτόχρονη μεταφορά φορτίων.
Morphing skin	Εξωτερική επικάλυψη που παραμένει λεία και συνεχής κατά τη μορφοποίηση.
Ανισοτροπία	Διαφορετική μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού ανάλογα με τη διεύθυνση φόρτισης.
SMA	Κράματα μνήμης σχήματος που ανακτούν προκαθορισμένη μορφή μετά από θερμική διέγερση.
Πιεζοηλεκτρικά υλικά	Υλικά που συνδέουν ηλεκτρικό πεδίο και μηχανική παραμόρφωση.
Δυναμικό ταχύτητας	Βαθμωτή συνάρτηση της οποίας η χωρική παράγωγος δίνει το πεδίο ταχύτητας σε αστρόβιλη ροή.
Εξίσωση Laplace	Εξίσωση που διέπει το δυναμικό ταχύτητας για ασυμπίεστη και αστρόβιλη ροή.
Συνάρτηση Green	Θεμελιώδης λύση που επιτρέπει την αναπαράσταση λύσεων μέσω οριακών ολοκληρωμάτων.
Πηγή	Στοιχειώδης λύση που συνδέεται με άλμα στην παράγωγο του δυναμικού κατά την κάθετη στην επιφάνεια διεύθυνση.
Δίπολο	Στοιχειώδης λύση που συνδέεται με άλμα στο δυναμικό ταχύτητας.
Συνθήκη μη διαπερατότητας	Συνοριακή συνθήκη που επιβάλλει μηδενική κανονική ταχύτητα στην επιφάνεια του σώματος.