



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2020-21  
ΦΥΣΙΚΗ Ι

13 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2021

# ΦΥΣΙΚΟΙ ΝΟΜΟΙ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗΝ ΠΤΗΣΗ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΜΠΑΡΙΑΜΑΪ [mm19432]  
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΜΠΑΡΜΠΕΡΗΣ [mm20049]

ΔΙΔΑΣΚΩΝ:

ΤΣΙΓΑΡΙΔΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

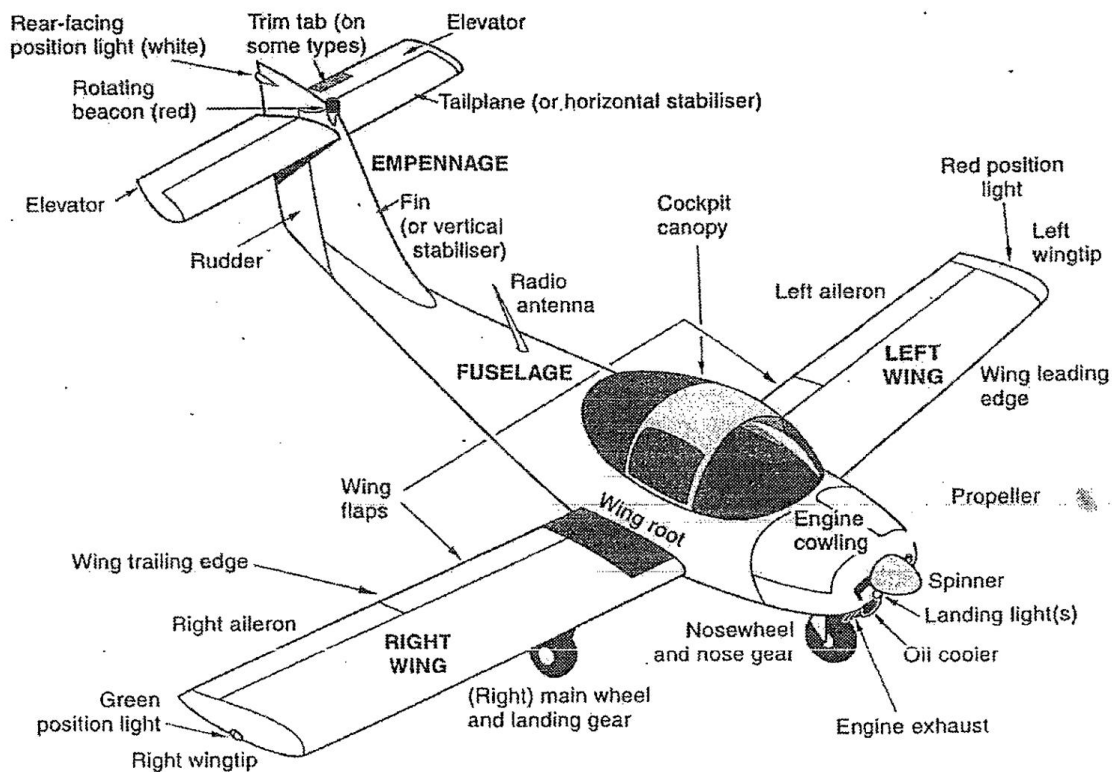
## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                    | ΣΕΛ       |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> ΕΙΣΑΓΩΓΗ                                                  | <b>3</b>  |
| <b>2</b> ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΕΠΕΝΕΡΓΟΥΝ ΣΕ ΕΝΑ ΑΕΡΟΠΛΑΝΟ               | <b>3</b>  |
| 2.1 ΒΑΡΟΣ (WEIGHT)                                                 | 3         |
| 2.2 ΑΝΤΩΣΗ (LIFT)                                                  | 3         |
| 2.2.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ Η ΡΟΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΕΡΟΤΟΜΗ | 3         |
| 2.2.2 Η ΡΟΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΑΕΡΟΠΛΑΝΟ                         | 4         |
| 2.3 ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑ (DRAG)                                            | 4         |
| 2.4 ΩΣΗ (THRUST)                                                   | 4         |
| <b>3</b> ΦΥΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ                      | <b>4</b>  |
| 3.1 Η ΡΟΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΑΕΡΟΠΛΑΝΟ                           | 4         |
| 3.1.1 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΡΟΗ                                             | 4         |
| 3.1.2 ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ                                                 | 4         |
| 3.2 ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΟΥ ΒΕΡΝΟΥΛΛΙ                                       | 5         |
| 3.3 ΑΕΡΟΤΟΜΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΜΑ ΒΕΡΝΟΥΛΛΙ                                 | 5         |
| 3.4 ΣΧΗΜΑΤΑ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ                                              | 6         |
| 3.5 ΚΥΡΤΟΤΗΤΑ                                                      | 6         |
| 3.6 Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ Η ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ                    | 7         |
| <b>4</b> ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ                                                 | <b>7</b>  |
| 4.1 ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΣΤΗΝ ΕΥΘΕΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΠΤΗΣΗ                          | 7         |
| 4.2 ΟΙ ΤΡΕΙΣ ΑΞΟΝΕΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ                                    | 7         |
| 4.3 ΑΝΟΔΟΣ                                                         | 8         |
| 4.4 ΚΑΘΟΔΟΣ                                                        | 8         |
| 4.5 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΤΡΟΦΗ                                        | 9         |
| <b>5</b> ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ (STALL)                                  | <b>9</b>  |
| 5.1 ΟΡΙΣΜΟΣ                                                        | 9         |
| 5.2 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ                               | 9         |
| 5.3 ΓΩΝΙΑ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ                           | 9         |
| 5.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ       | 10        |
| 5.5 ΠΕΡΙΔΙΝΗΣΗ                                                     | 10        |
| <b>6</b> ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ                                  | <b>11</b> |
| 6.1 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΒΙΟΫΛΙΚΑ                                            | 11        |
| 6.2 ΑΥΤΟΘΕΡΑΠΕΥΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ                                         | 11        |
| 6.3 ΑΝΑΚΑΜΠΤΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ                                            | 11        |
| 6.4 ΕΞΥΠΝΗ ΠΤΕΡΥΓΑ                                                 | 11        |
| 6.5 ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ                                     | 11        |
| ΛΙΣΤΑ ΜΕ ΣΥΜΒΟΛΑ                                                   | 12        |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ                                               | 13        |

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Το αεροπλάνο είναι μια ανθρώπινη κατασκευή, σχεδιασμένη να χρησιμοποιεί φυσικές δυνάμεις για να την κίνησή του μέσα στον αέρα. Αέρας είναι το μίγμα των αερίων που περιβάλλουν τη γη. Εάν οποιαδήποτε πίεση ασκηθεί στον αέρα, αυτός θα αλλάξει ροή και σχήμα, γι' αυτό κατατάσσεται στα ρευστά. Αεροδυναμική είναι η επιστήμη που μελετά την κίνηση ενός σώματος μέσα στον αέρα ή τη ροή του αέρα γύρω από ένα σώμα. Ασχολείται με τη σχετική κίνηση του αέρα και του σώματος. Οι βασικές αρχές της αεροδυναμικής που σχετίζονται με την κίνηση του αεροπλάνου μέσα στον αέρα αποκαλούνται αρχές της πτήσης. Για να ελέγχει ο χειριστής το αεροπλάνο με ασφάλεια και να παίρνει τις σωστές αποφάσεις κατά τη διάρκεια της πτήσης, πρέπει να έχει κατανοήσει τις αρχές της πτήσης. Αν και κατά τη διάρκεια της πτήσης ο χρήστης δεν έχει χρόνο να αναλύσει λεπτομερώς την επίδραση των ενεργειών του, πρέπει να γνωρίζει τις βασικές αρχές.

An airplane is a man-made device designed to use natural forces to enable motion through the air, or to enable flight. Air is that mixture of gases which surrounds the earth. If even the slightest pressure is applied to air, it will flow and change its shape as long as it remains 'free' or unconstrained. Hence it may be classified as a fluid. The study of the motion of any 'thing' (often called 'a body' by scientists, engineers and applied mathematicians in particular) or the flow of air past it is described as 'aerodynamics'. Thus, aerodynamics describes the motion of an airplane through the air; and the subject forms a significant part of the principles of flight. To control an airplane safely and to make correct decisions during the course of a flight a pilot must understand the principles of flight. When in flight no pilot has time to analyze in detail the effect of everything that he or she does, or is about to do, or fails to do, but all pilots should be aware of what their aircraft are doing, and why, as well as what is happening as consequence of their action or inaction.



Εικόνα 1: Ένα μοντέρνο εκπαιδευτικό αεροπλάνο

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την αρχαιότητα, ο άνθρωπος ονειρεύτηκε να γίνει ο άρχοντας των αιθέρων. Όμως αυτοί που έκαναν το όνειρο πραγματικότητα ήταν οι αδερφοί Ράιτ το 1903. Από τότε η εξέλιξη στον χώρο της αεροπλοΐας είναι τεράστια. Το αεροπλάνο λοιπόν μια ανθρώπινη κατασκευή από τις πιο σπουδαίες αλλά και πιο πολύπλοκες είναι σχεδιασμένο να χρησιμοποιεί φυσικές δυνάμεις για να πετυχαίνει την κίνηση του μέσα στον αέρα. Μαζί με την αεροδιαστημική, η αεροπορική βιομηχανία είναι πάντα στην αιχμή της τεχνολογίας και υλικά και τεχνικές που αναπτύχθηκαν αρχικά για αεροσκάφη βρήκαν εφαρμογή σε κατασκευές και προϊόντα όλων των βιομηχανιών.

## 2 ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΕΠΕΝΕΡΓΟΥΝ ΣΕ ΕΝΑ ΑΕΡΟΠΛΑΝΟ

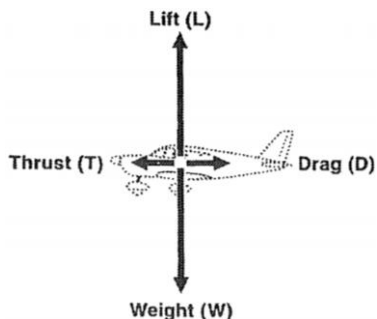
Όπως όλα τα αντικείμενα το αεροπλάνο έχει **βάρος**, μια δύναμη που δρα κάθετα με διεύθυνση προς το κέντρο της γης. Όταν το αεροπλάνο βρίσκεται στο έδαφος, το βάρος του εξισορροπείται από την αντίθετη δύναμη του εδάφους προς το αεροπλάνο, που εφαρμόζεται στους τροχούς.

Κατά τη διάρκεια της πτήσης, το βάρος του αεροπλάνου εξισορροπείται από την δύναμη της **άντωσης**, που παράγεται αεροδυναμικά από το ρεύμα του αέρα γύρω από τις πτέρυγες (επίσης γνωστές ως κυρίως αεροτομές). Επιπρόσθετα, καθώς το αεροπλάνο κινείται μέσα στον αέρα, δημιουργείται μια ακόμη δύναμη, που λέγεται **οπισθέλκουσα**, και αν δεν εξισορροπηθεί, θα αναγκάσει το αεροπλάνο να επιβραδύνει, άρα να χάσει ταχύτητα.

Στην ευθεία οριζόντια πτήση, η οπισθέλκουσα εξισορροπείται από την ώση, που παράγεται από το προωθητικό σύστημα. Το προωθητικό σύστημα στα περισσότερα ελαφρά αεροπλάνα είναι ο συνδυασμός κινητήρα – έλικα, ενώ στα τζετ είναι ο αεροστροβίλος κινητήρας (τουρμπίνα). Καθώς και οι τέσσερις δυνάμεις είναι σε ισορροπία, η συνισταμένη δύναμη αυτών είναι μηδέν και το αεροπλάνο δεν θα επιταχύνει ούτε θα επιβραδύνει. Άρα το αεροπλάνο βρίσκεται σε **ισορροπία**. Στην ευθεία οριζόντια πτήση:

- Το βάρος εξισορροπείται από την άντωση,
- Η οπισθέλκουσα εξισορροπείται από την ώση.

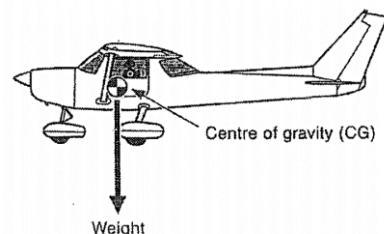
Το αεροπλάνο θα συνεχίσει να πετά αδρανειακά διατηρώντας την ίδια ταχύτητα και την ίδια διεύθυνση. Ο νόμος της αδράνειας μας λέει ότι «εάν σ' ένα σώμα δεν εξασκείται καμία δύναμη, αυτό τείνει να διατηρήσει καμία δύναμη, αυτό τείνει να διατηρήσει την κινητική του κατάσταση»



Εικόνα 2: Οι τέσσερις δυνάμεις σε ισορροπία: άντωση (L), οπισθέλκουσα (D), ιδιον βάρος (W), ώση (T)

### 2.1 ΒΑΡΟΣ (WEIGHT)

Βαρύτητα είναι η δύναμη που εξασκεί η γη σε όλα τα σώματα και δρα κάθετα με διεύθυνση προς το κέντρο αυτής. Το όνομα που δόθηκε στη δύναμη της βαρύτητας είναι το βάρος και για την μελέτη των αρχών πτήσης είναι το ολικό βάρος ενός φορτωμένου αεροπλάνου. Το βάρος θεωρείται ότι είναι μια δύναμη που εξασκείται στο **κέντρο βάρους (Centre of gravity)**.



Εικόνα 2: Το βάρος δρα προς τα κάτω, μέσω του κέντρου βάρους

Το κέντρο βάρους είναι το σημείο ισορροπίας και η θέση του εξαρτάται από το βάρος και τη θέση κάθε ξεχωριστού μέρους του αεροπλάνου και από το φορτίο που αυτό μεταφέρει. Εάν το αεροπλάνο κρεμαστεί από ένα σκοινί δεμένο στο κέντρο βάρους του, το αεροπλάνο θα ισορροπήσει. Το μέγεθος του βάρους είναι σημαντικό και υπόκειται σε διάφορους περιορισμούς, όπως το μέγιστο βάρος απογείωσης που ορίζεται για το κάθε αεροπλάνο. Οι περιορισμοί βάρους εξαρτώνται από τη δομική αντοχή του αεροπλάνου και από τις επιχειρησιακές ανάγκες που αυτό σχεδιάστηκε να καλύψει.

Το σημείο ισορροπίας (κέντρο βάρους) είναι πολύ σημαντικό κατά τη διάρκεια της πτήσης, λόγω της επίδρασης του στην ευστάθεια και στις επιδόσεις του αεροπλάνου. Πρέπει να παραμένει μέσα στα επιτρεπτά όρια σε όλες τις φάσεις της πτήσης. Η θέση του Κ.Β εξαρτάται από το βάρος και τη θέση των διαφόρων φορτίων μέσα στο αεροπλάνο. Το Κ.Β θα μετακινηθεί αν η κατανομή των φορτίων αλλάξει, όπως μετακίνηση επιβατών ή μεταφορά καυσίμου από τη μια δεξαμενή στην άλλη. Το Κ.Β μπορεί να μετακινηθεί και με τις αλλαγές του βάρους από την κατανάλωση καυσίμου ή από αλεξιπτωτιστές που εκτελούν πτώσεις.

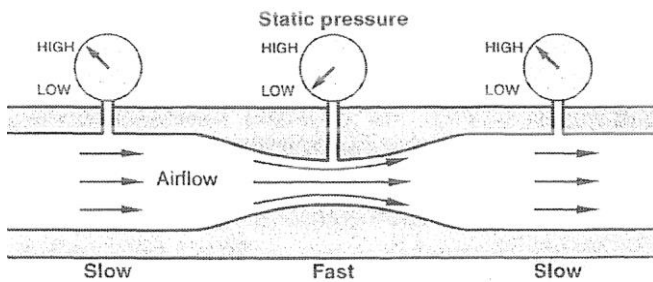
Μια χρήσιμη πληροφορία που περιγράφει το φορτίο που οι πτέρυγες υποστηρίζουν σε ευθεία οριζόντια πτήση, είναι η φόρτιση της πτέρυγας -Wing Loading, που είναι απλώς το βάρος που υποστηρίζει κάθε τετραγωνική μονάδα πτερυγικής επιφάνειας.

$$\text{Φόρτιση πτέρυγας} = \frac{\text{βάρος του αεροπλάνου}}{\text{Εμβαδόν πτέρυγας}} \quad (1)$$

### 2.2 ΑΝΤΩΣΗ (LIFT)

#### 2.2.1 Κατανομή της Πίεσης και η Ροή του αέρα γύρω από την αεροτομή

Η αεροτομή είναι μια επιφάνεια σχεδιασμένη να παράγει άντωση αεροδυναμικά. Μερικές γνωστές αεροτομές είναι η πτέρυγα, το οριζόντιο σταθερό, το κάθετο στερεό και τα φύλλα της έλικας. Ο τρόπος παραγωγής της δύναμης της άντωσης από μια αεροτομή εξηγείται από το θεώρημα Bernoulli («Η μεγάλη ταχύτητα ρεύματος δίνει μικρή στατική πίεση» - επίσης γνωστή ως φαινόμενο του Venturi)

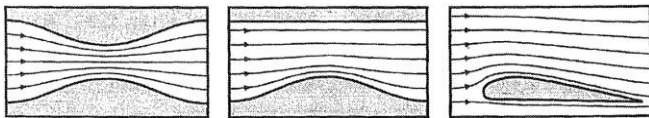


**Εικόνα 3:** Σωλήνας Venturi – μεγάλη ταχύτητα ρεύματος, μικρή στατική πίεση

### 2.2.2 Η Ροή του Αέρα γύρω από το Αεροπλάνο

Η τροχιά που διαγράφει το ρεύμα του αέρα γύρω από το αεροπλάνο εξαρτάται κυρίως από το σχήμα του αεροπλάνου και τη στάση του σε σχέση με το ελεύθερο ρεύμα του αέρα. Σημασία έχει η σχετική ταχύτητα του αεροπλάνου και του ρεύματος του αέρα και όχι αν το αεροπλάνο κινείται μέσα στον αέρα ή ο αέρας φυσά προς το αεροπλάνο. Όπως και το εξετάσει κανείς θα έχει τα ίδια αποτελέσματα.

Το πιο σημαντικό μέρος του αεροπλάνου είναι η αεροτομή. Καθώς το ρεύμα του αέρα ταξιδεύει γύρω από τις κυρίως αεροτομές (πτέρυγες), παράγεται η άντωση, η δύναμη που κάνει το αεροπλάνο να πετάει. Το ρεύμα του αέρα γύρω από μια αεροτομή μπορεί να συγκριθεί με το ρεύμα του αέρα μέσα σ' ένα σωλήνα Venturi.



**Εικόνα 4:** Η ροή του αέρα γύρω από μια αεροτομή και στον σωλήνα Venturi

Μερικοί παράγοντες, εκτός από την ταχύτητα του αέρα γύρω από μια αεροτομή, πρέπει να συμπεριληφθούν. Το μέγεθος του αεροπλάνου, το σχήμα των πτερύγων, η πυκνότητα και το ιξώδες (ρευστότητα) του αέρα παίζουν σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά της ροής του αέρα γύρω από το αεροπλάνο.

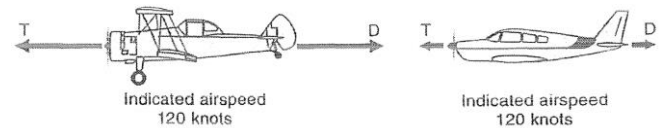
Η συμπεριφορά του ρεύματος αέρα κοντά στην επιφάνεια της αεροτομής είναι πολύ σημαντική και αυτό το στρώμα του αέρα ονομάζεται οριακό στρώμα. Η τριβή μεταξύ της επιφάνειας και του ρεύματος αέρα γύρω από αυτήν επιβραδύνει τα στρώματα αέρα που γειτονεύουν με αυτήν. Τα μόρια του αέρα που έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια έχουν μηδενική ταχύτητα. Το πάχος του οριακού στρώματος, μέσα στο οποίο η σχετική ταχύτητα μειώνεται, είναι συνήθως μερικά χιλιοστά.

Σε κάποιο σημείο της επιφάνειας το στρωτό οριακό στρώμα γίνεται τυρβώδες και το πάχος του αυξάνει σημαντικά. Αυτό είναι γνωστό ως σημείο μετάπτωσης.

### 2.3 ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑ (DRAG)

Είναι η δύναμη της αντίστασης του αέρα που επιδρά πάνω στο αεροπλάνο κατά την κίνησή του στον άνεμο. Δρα αντίθετα από τη διεύθυνση της κίνησης του αεροπλάνου μέσα στον σχετικό άνεμο και παράλληλα προς αυτόν.

Η οπισθέλκουσα είναι ο «εχθρός» των μεγάλων ταχυτήτων πτήσης. Το σχήμα και η στιλπνότητα των διαφόρων επιφανειών, όπ



**Εικόνα 5:** Η μικρή οπισθέλκουσα απαιτεί μικρή ώση για να εξισορροπηθεί

και άλλων σχεδιαστικών χαρακτηριστικών, αυξάνουν ή μειώνουν την οπισθέλκουσα.

Είναι ανάλογη της επιφάνειας, σε καμπύλη επιφάνεια δημιουργείται λιγότερο drag σε αντίθεση με κάποια πιο μυτερή καθώς ο αέρας δυσκολεύεται να την προσπεράσει με αποτέλεσμα δημιουργία μεγαλύτερης αντίστασης.

### 2.4 ΩΣΗ (THRUST)

Είναι η δύναμη που ασκούν οι κινητήρες ή η έλικα του αεροπλάνου. Έχει διεύθυνση και φορά (κατεύθυνση) την κατεύθυνση της κίνησης του αεροπλάνου

## 3 ΦΥΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ

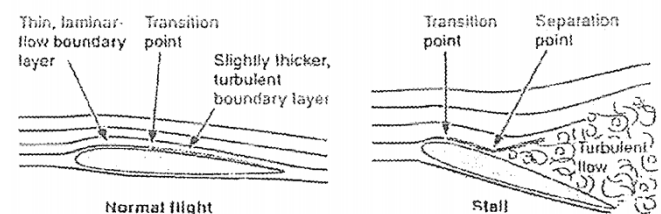
### 3.1 Η ΡΟΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΑΕΡΟΠΛΑΝΟ

#### 3.1.1 Αεροδυναμική Ροή

Αεροννημάτιο είναι η τροχιά που διαγράφει ένα μόριο αέρα κατά την κίνηση του μέσα στο ρεύμα του αέρα. Όταν όλα τα μόρια του αέρα ακολουθούν την ίδια σταθερή τροχιά, τότε σχηματίζουν ένα αεροννημάτιο. Τότε δεν υπάρχει ροή κάθετα στο αεροννημάτιο, παρά μόνο κατά μήκος αυτού.

Σε κάθε σημείο της αεροδυναμικής ροής, κάθε μόριο έχει την ίδια ταχύτητα και στατική πίεση που έχει και το προηγούμενο μόριο καθώς περνούσε από το ίδιο σημείο. Οι τιμές ταχύτητας και πίεσης διαφέρουν στα διαφορά σημεία του ρεύματος. Μια μείωση της ταχύτητας της ροής απεικονίζεται με μείωση της απόστασης μεταξύ αυτών.

Κάθε μόριο που ακολουθεί ένα αεροννημάτιο ταξιδεύει με τις ίδιες ταχύτητες και πιέσεις όπως το προηγούμενο από αυτό.



**Εικόνα 6:** Η ομαλή ροή σαφώς προτιμάται από την τυρβώδη ροή

#### 3.1.2 Τυρβώδης Ροή

Στην τυρβώδη ροή τα διαδοχικά μόρια δεν ακολουθούν το ίδιο αεροννημάτιο. Τα επερχόμενα μόρια ακολουθούν μια διαφορετική



διαδρομή απ' ό,τι τα προπορευόμενα τους. Η τυρβώδης ροή είναι ανεπιθύμητη σε όλες τις φάσεις της πτήσης.

Η ομαλή ροή αντίθετα είναι επιθυμητή και η τυρβώδης πρέπει να αποφεύγεται. Το σημείο όπου το οριακό στρώμα αποκολλάται από την επιφάνεια της αεροτομής, προκαλώντας τη διαταραχή της ομαλής ροής και την αρχή της τυρβώδους λέγεται σημείο διαχωρισμού και θα αναλυθεί παρακάτω στην ενότητα της απώλειας στηρίξεως.

### 3.2 ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΟΥ BERNOULLI

Ένα ρευστό σε σταθερή κίνηση έχει ενέργεια:

- Ενέργεια Στατικής Πίεσης
- Ενέργεια Δυναμικής Πίεσης (Κινητική ενέργεια)

Ο αέρας είναι ρευστό και, εάν το θεωρήσουμε ασυμπίεστο, είναι ιδανικό ρευστό. Ο Daniel Bernoulli απέδειξε ότι σε ένα ιδανικό ρευστό, η ολική ενέργεια σε σταθερή ομαλή ροή παραμένει σταθερή. Άρα:

$$\text{Ενέργεια πίεσης} + \text{κινητική ενέργεια} = \text{ολική ενέργεια} \quad (2)$$

(στατική)                      (δυναμική)                      (σταθερή)

Η ενέργεια μπορεί να αλλάξει από τη μια μορφή στην άλλη αλλά η ολική περιεχόμενη ενέργεια παραμένει σταθερή. Εάν η ενέργεια πίεσης μειωθεί (μικρή στατική πίεση), τότε η κινητική ενέργεια θα αυξηθεί (μεγάλη δυναμική πίεση). Αυτό είναι το φαινόμενο του σωλήνα Venturi.

Η στατική πίεση σε κάθε σημείο ενός ρευστού δρα ισότοπα προς κάθε κατεύθυνση. Η στατική πίεση της ατμόσφαιρας εξασκείται ομοιόμορφα σε κάθε σημείο του χεριού αυτή την στιγμή. Η ενέργεια της κίνησης ονομάζεται κινητική ενέργεια «K» και εκφράζεται:

$$K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (3)$$

Η κινητική ενέργεια μιας μάζας αέρα που κινείται σε σχέση με κάποιο αντικείμενο εξασκεί μια δύναμη σε αυτό. Αυτή η δύναμη εάν υπολογιστεί ανά μονάδα επιφάνειας, μας δίνει τη δυναμική πίεση, η οποία εκφράζεται:

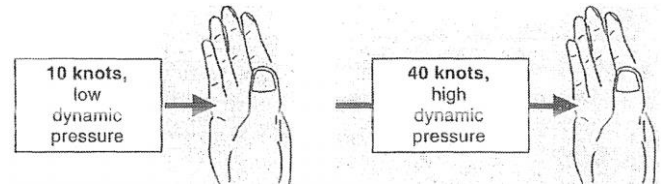
$$Q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (4)$$

Η δυναμική πίεση είναι ευθέως ανάλογη της πυκνότητας του αέρα «ρ», που είναι η μάζα στην μονάδα του όγκου και του τετραγώνου της ταχύτητας «V» (Velocity). Στην αεροδυναμική είναι πιο χρήσιμη η δυναμική πίεση απ' ό,τι η κινητική ενέργεια.

Εάν κρατήσει κάποιος το χέρι ψηλά με ένα δυνατό άνεμο ή έξω από το παράθυρο ενός αυτοκινήτου που κινείται, θα αισθανθεί μια πίεση πάνω στο χέρι του, από τα μόρια του αέρα που χτυπούν πάνω σε αυτό. Αυτή η πίεση καλείται δυναμική πίεση και δημιουργείται από τη σχετική κίνηση του χεριού και του αέρα.

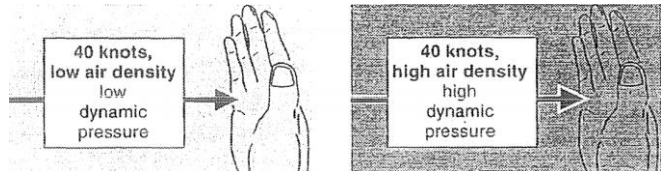
Η ένταση είναι η δυναμική πίεση εξαρτάται από δυο παράγοντες:

1. Την ταχύτητα της σχετικής κίνησης. Όσο πιο γρήγορα ταξιδεύει το αυτοκίνητο, τόσο πιο δυνατά φυσά ο αέρας και τόσο πιο μεγάλη είναι η δυναμική πίεση που αισθάνεται κάποιος στο χέρι του. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο αριθμό μόριο που χτυπούν το χέρι του το δευτερόλεπτο.



Εικόνα 7: Η δυναμική πίεση αυξάνεται με την ταχύτητα

2. Την πυκνότητα του αέρα. Με την ίδια ταχύτητα αλλά σε πιο πυκνό αέρα, περισσότερα μόρια του αέρα θα χτυπούν το χέρι του ανά δευτερόλεπτο, άρα μεγαλύτερη δυναμική πίεση.



Εικόνα 8: Η δυναμική πίεση είναι μεγαλύτερη στον πυκνό αέρα

Λόγω της σχέσης (4) η εξίσωση μπορεί να γίνει :

$$\text{Στατική πίεση} + \text{δυναμική πίεση} = \text{ολική σταθερή πίεση} \quad (3)$$

(p)                       $(\frac{1}{2} \times \rho \times V^2)$

Η σχέση (4) είναι μια από τις πιο σημαντικές στην αεροδυναμική. Πρέπει να εξασκηθεί δυναμική πίεση σε μια αεροτομή για να παράγει άντωση (Η δυναμική πίεση είναι επίσης σημαντική στην εξέταση άλλων αεροδυναμικών θεμάτων, όπως είναι η οπισθέλκουσα και η ενδοεικνυόμενη ταχύτητα αέρα).

Είναι γνωστό ότι η στατική πίεση συν τη δυναμική πίεση ισούται με τη σταθερή ολική πίεση. Εάν η ταχύτητα (V) του ρεύματος αέρα αυξηθεί, τότε η δυναμική πίεση θα αυξηθεί και η στατική πίεση θα μειωθεί (Θεώρημα Bernoulli).

*Αύξηση της ταχύτητας σημαίνει μείωση της στατικής πίεσης.*

Αντίθετως, εάν η ταχύτητα (άρα και η δυναμική πίεση) μειωθεί, η στατική πίεση θα αυξηθεί.

*Μείωση της ταχύτητας σημαίνει αύξηση της στατικής πίεσης.*

### 3.3 ΑΕΡΟΤΟΜΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΜΑ BERNOULLI

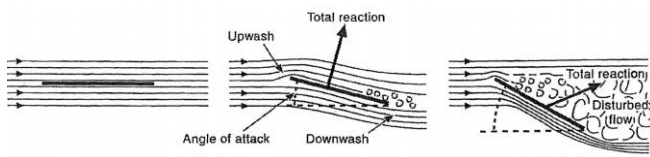
Όλα τα μέρη του αεροπλάνου συνεισφέρουν και στην άντωση και στην οπισθέλκουσα, αλλά οι πτέρυγες είναι σχεδιασμένες να παράγουν την απαραίτητη άντωση και να υποστηρίζουν όλο το αεροσκάφος.

Η μελέτη της κατανομής της στατικής πίεσης και της ταχύτητας γύρω από την αεροτομή, χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Bernoulli, είναι ο ευκολότερος, μη μαθηματικός τρόπος, κατανόησης της παραγωγής της άντωσης (και της οπισθέλκουσας) από την αεροτομή.

Μια λεπτή επίπεδη πλάκα, εάν τοποθετηθεί με μηδενική γωνία προσβολής κόντρα σε ένα ρεύμα αέρα, δεν θα προκαλέσει σχεδόν καμία αλλαγή στην ροή του αέρα και συνεπώς δεν θα παραχθεί καμία δύναμη εξ αντίδρασης. Γωνία προσβολής (angle of attack) είναι η γωνία που σχηματίζει η επίπεδη πλάκα σε σχέση με η ροή του αέρα.

Εάν όμως η γωνία προσβολής αλλάξει και γίνει θετική, η αντίδραση θα προκαλέσει άντωση και οπισθέλκουσα, όπως αντιδρά το χέρι έξω από το παράθυρο του αυτοκινήτου. Η δύναμη της αντίδρασης

εξαρτάται από την ταχύτητα και την γωνία προσβολής μεταξύ της πλάκας και του σχετικού ρεύματος αέρα.



Εικόνα 9: Ένα ρεύμα αέρα μπορεί να παράγει άντωση σε μια επίπεδη πλάκα

Λόγω της γωνίας προσβολής, η ευθύγραμμη ομαλή ροή του αέρα διαταράσσεται. Ένα μικρό ανώρευμα δημιουργείται στο μπροστινό μέρος της πλάκας προκαλώντας μια πιο σφιχτή ροή του αέρα, σχεδόν σαν να υπήρχε ένας σωλήνας Venturi πάνω από την πλάκα. Καθώς ο αέρας περνά από αυτή τη περιοχή, η ταχύτητα του αυξάνεται.

**Αύξηση της ταχύτητας σημαίνει μείωση της στατικής πίεσης (θεώρημα Bernoulli)**

Η στατική πίεση πάνω από τη πλάκα είναι μικρότερη από τη στατική πίεση κάτω από αυτή, προκαλώντας ξεκάθαρα μια προς τα πάνω αντίδραση. Περνώντας την πλάκα δημιουργείται ένα κατώρευμα, καθώς η τροχιά του ρεύματος κατευθύνεται προς τα κάτω. Η ολική αντίδραση της πλάκας, που προκλήθηκε από τη διαταραχή της ροής του αέρα αναλύεται σε δυο συνιστώσες. Μια κάθετη στο σχετικό άνεμο, που ονομάζεται Άντωση, και μια παράλληλη στο σχετικό άνεμο, που ονομάζεται οπισθέλκουσα.



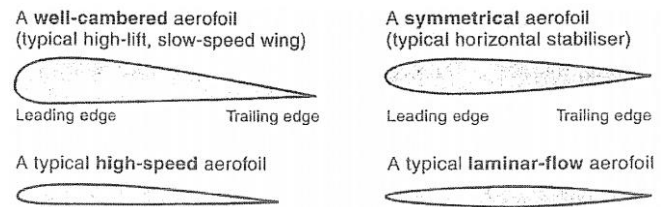
Εικόνα 10: Το κατώρευμα πίσω από την επίπεδη πλάκα

### 3.4 ΣΧΗΜΑΤΑ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ

Τα περισσότερα αεροπλάνα δεν έχουν επίπεδες πλάκες για πτέρυγες. Μια επίπεδη πλάκα δεν θα ήταν ιδανική για διάφορους λόγους. Αφ' ενός διαταράσσει απότομα τη ροή του αέρα προκαλώντας τυρβώδη ροή, με αποτέλεσμα αύξηση της οπισθέλκουσας, και αφ' ετέρου είναι δύσκολο δομικά να κατασκευαστεί μια επίπεδη και λεπτή αεροτομή.

Μια αεροτομή με καμπύλη επιφάνεια, εκτός του ότι παράγει μεγαλύτερη άντωση απ' ό,τι οπισθέλκουσα συγκρινόμενη με μια επίπεδη πλάκα, είναι επίσης ευκολότερο να κατασκευαστεί όσο αφορά τη δομική αντοχή.

Υπάρχουν πολλά σχήματα αεροτομών. Ο κάθε σχεδιαστής αεροπλάνων επιλέγει το κατάλληλο σχήμα αεροτομής που θα του δώσει τα επιθυμητά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά που θα καλύπτουν τις ανάγκες του. Αν και οι περισσότερες αεροτομές μικρών ταχυτήτων μοιάζουν στο σχήμα, η κάθε μια δίνει διαφορετικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 11: Διάφορες αεροτομές

### 3.5 ΚΥΡΤΟΤΗΤΑ

Κυρτότητα είναι η καμπυλότητα.



Εικόνα 12: Μεγαλύτερη κυρτότητα – μεγαλύτερη άντωση

Αυξάνοντας την κυρτότητα της πάνω επιφάνειας, προκαλείται αύξηση της ταχύτητας του ρεύματος αέρα πάνω από αυτή και παραγωγή μεγαλύτερης άντωσης στην ίδια γωνία προσβολής (Αφού η μεγαλύτερη ταχύτητα σημαίνει μικρότερη στατική πίεση). Οι πτέρυγες με μεγάλη κυρτότητα δίνουν περισσότερη άντωση και είναι ιδανικές για πτήση με μικρές ταχύτητες και μεταφορά βαριών φορτίων. Η μέση γραμμή καμπυλότητας απεικονίζει την κυρτότητα της αεροτομής.

**ΜΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ** : γραμμή που ενώνει το χείλος προσβολής με το χείλος εκ φυγής και ισαπέχει από την κάτω και την πάνω επιφάνεια της πτέρυγας.

Χορδή της αεροτομής είναι η ευθεία γραμμή που ενώνει το χείλος προσβολής με το χείλος εκ φυγής αυτής. Ένας άλλος ορισμός:

**ΧΟΡΔΗ ΤΗΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ** : ευθεία γραμμή που ενώνει τις δυο άκρες της μέσης γραμμής καμπυλότητας.

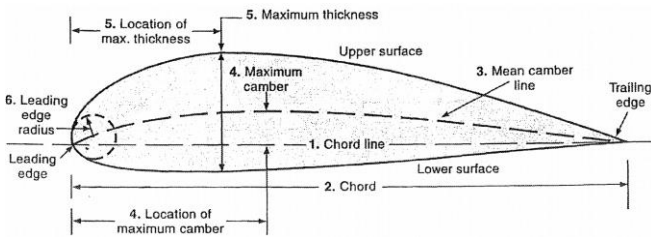
**ΚΥΡΤΟΤΗΤΑ** : η απόσταση μεταξύ της μέσης γραμμής καμπυλότητας και της χορδής.

Το σχήμα της μέσης γραμμής καμπυλότητας είναι εξαιρετικά σημαντικό στην μελέτη των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της αεροτομής. Το μέγεθος και η θέση της μεγίστης καμπυλότητας σε σχέση με τη χορδή της αεροτομής βοηθούν να οριστεί το σχήμα της μέσης γραμμής καμπυλότητας, που συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό της χορδής.

Να σημειωθεί ότι μια πτέρυγα μεγάλης καμπυλότητας μπορεί να είναι παχιά ή λεπτή και ότι οι συμμετρικές αεροτομές έχουν μηδέν καμπυλότητα.

**ΠΑΧΟΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ** : η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ της πάνω και της κάτω επιφάνειας

Μια παχιά πτέρυγα με πολύ καμπύλη την πάνω επιφάνεια αυτής είναι ιδανική για παραγωγή άντωσης σε μικρές ταχύτητες.



Εικόνα 12: Περιληπτικά η ορολογία της αεροτομής

### 3.6 Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ Η ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ

Είναι ενδιαφέρον η παρατήρηση της κατανομής της πίεσης γύρω από μια αεροτομή καθώς διαφοροποιείται συνεχώς η γωνία προσβολής. Στην φυσιολογική πτήση το ρεύμα του αέρα επιταχύνει πάνω από το χείλος προσβολής της αεροτομής και ο ρυθμός επιτάχυνσης είναι μεγαλύτερος σε μεγαλύτερες γωνιές προσβολής. Καθώς η ταχύτητα μειώνεται, η στατική πίεση μειώνεται και στο σημείο της μέγιστης ταχύτητας συναντάμε την ελάχιστη στατική πίεση.

Το ρεύμα του αέρα στο κάτω μέρος της αεροτομής επιταχύνεται με πιο αργό ρυθμό, άρα και η στατική πίεση μειώνεται λιγότερο. Από την γωνία προσβολής εξαρτάται αν η στατική πίεση στο κάτω μέρος της αεροτομής θα ναι είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη στατική πίεση του ελεύθερου ρεύματος αέρα.

Στις μικρές γωνιές προσβολής υπάρχει μείωση της στατικής πίεσης γύρω από την πάνω και την κάτω επιφάνεια και η άντωση παράγεται από τη διαφορά πίεσης.

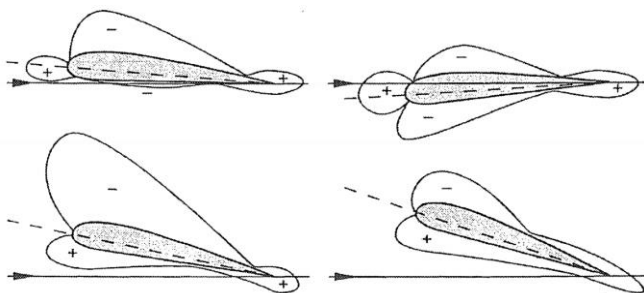
Η στατική πίεση μειώνεται περισσότερο στην πάνω επιφάνεια απ' ό,τι στην κάτω επιφάνεια της πτέρυγας σε μικρές γωνιές προσβολής.

Σε μικρή αρνητική γωνία προσβολής, περίπου  $-4^\circ$ , η μείωση της πίεσης είναι περίπου ίδια στην κάτω και πάει να επιφάνεια της πτέρυγας και έτσι δεν παράγεται άντωση.

Σε μεγάλες γωνιές προσβολής η άντωση παράγεται από τη μείωση της πίεσης στην πάνω επιφάνεια της πτέρυγας και τη μικρή αύξηση αυτής στην κάτω επιφάνεια της πτέρυγας.

Μετά την κρίσιμη γωνία προσβολής (γωνία απώλειας στήριξης), η ομαλή ροή αέρα στην πάνω επιφάνεια της πτέρυγας μειώνεται, με αποτέλεσμα να αδυνατεί η περιοχή χαμηλών πιέσεων και να δημιουργείται τυρβώδης ροή. (Το θεώρημα του Bernoulli έχει εφαρμογή μόνο στην ομαλή ροή αέρα.)

Ένα μικρό ποσοστό άντωσης που εξακολουθεί να παράγεται είναι λόγω της αύξησης της πίεσης στην κάτω επιφάνεια.



Εικόνα 13: Η κατανομή της στατικής πίεσης σε διάφορες γωνιές προσβολής

## 4 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

### 4.1 ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΣΤΗΝ ΕΥΘΕΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΠΤΗΣΗ

Όπως προαναφέρθηκε οι 4 δυνάμεις που ενεργούν σε ένα αεροπλάνο κατά την πτήση είναι το βάρος η άντωση, η ώση και η οπισθέλκουσα.

- Η **άντωση** ενεργεί στο κέντρο πίεσης, το οποίο μετακινείται συνεχώς με κάθε αλλαγή της γωνίας προσβολής.
- Το **βάρος** ενεργεί κάθετα στο κέντρο βάρους, το οποίο μετακινείται καθώς καταναλώνεται καύσιμο και φορτίο ή επιβάτες μετακινούνται. Έτσι ισχύει:

$$\Sigma F_y = L - W$$

- Η **οπισθέλκουσα** είναι αντίθετη στην κίνηση του αεροπλάνου, άρα παράλληλη με το σχετικό άνεμο και με αντίθετη διεύθυνση από το ίχνος πτήσης.
- Η **ώση** ενεργεί στον έλικα ή στο διαμήκη άξονα ενός αεροσπρόβιλου κινητήρα. Είναι η μόνη δύναμη που δε διαφοροποιείται κατά τη διάρκεια της πτήσης. Έτσι ισχύει:

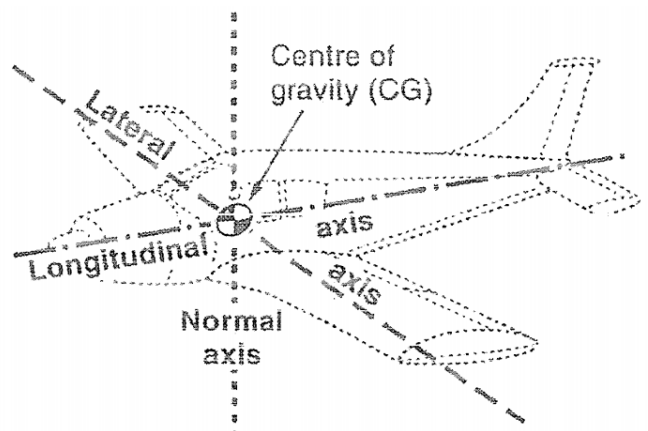
$$\Sigma F_x = T - D$$

Για να παραμένει το αεροπλάνο σε ισορροπία σε ευθεία οριζόντια πτήση, οι αντίθετες πρέπει να είναι ίσες, ώστε να αλληλοϊσορροπούνται και να μην υπάρχει καμία συνισταμένη δύναμη που θα ενεργεί στο αεροπλάνο. Η άντωση λοιπόν είναι ίση και αντίθετη του βάρους και η ώση και αντίθετη της οπισθέλκουσας. Στο αεροπλάνο δεν ενεργεί καμία συνισταμένη δύναμη και συνεχίζει να πετά αδρανειακά διατηρώντας ευθεία οριζόντια μη επιταχυνόμενη πτήση. Με βάση το νόμο της αδράνειας αν σε ένα σώμα δεν ενεργεί καμία δύναμη, αυτό τείνει να διατηρεί την κινητική του κατάσταση. Μαθηματικά πρέπει να ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$\Sigma F_y = 0, \quad \Sigma F_x = 0 \Rightarrow L = C_L \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot S = mg, \quad D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot S = T$$

### 4.2 ΟΙ ΤΡΙΕΣ ΑΞΟΝΕΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ

Οι 3 άξονες περνούν από το κέντρο βάρους του αεροπλάνου και τέμνονται μεταξύ τους.



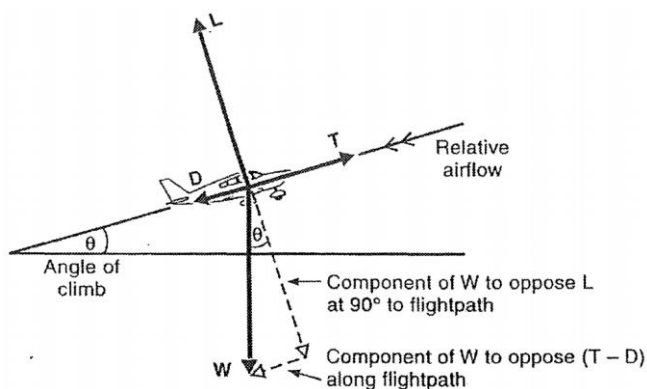
Εικόνα 14: το αεροπλάνο περιστρέφεται γύρω από τρεις άξονες



- Ο διαμήκης άξονας περνά κατά μήκος του αεροπλάνου από το κέντρο βάρους του αεροπλάνου και η κίνηση γύρω από αυτόν λέγεται διατοιχισμός. Η ευστάθεια γύρω του λέγεται εγκάρσια ευστάθεια, αφού η κίνηση γίνεται στο εγκάρσιο επίπεδο.
- Ο εγκάρσιος άξονας περνά κατά πλάτος του αεροπλάνου από το κέντρο βάρους και η κίνηση γύρω από αυτόν λέγεται πρόνευση. Η ευστάθεια γύρω του λέγεται διαμήκης ευστάθεια, αφού η κίνηση γίνεται στο διάμηκες επίπεδο.
- Ο κάθετος άξονας περνά από το κέντρο βάρους και είναι κάθετος στους άλλους δύο. Η κίνηση γύρω από αυτόν λέγεται εκτροπή. Η ευστάθεια γύρω του λέγεται παρειακή ευστάθεια και η κίνηση γίνεται στο οριζόντιο επίπεδο.

### 4.3 ΑΝΟΔΟΣ

Η άνοδος μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε **απότομα** είτε **σταθερά**. Καθώς το αεροπλάνο ανέρχεται, κερδίζει δυναμική ενέργεια (λόγω του ύψους).



Εικόνα 15: Οι τέσσερις δυνάμεις σε μια σταθερή άνοδο

Η απότομη άνοδος επιτυγχάνεται με την ανταλλαγή κινητικής ενέργειας σε δυναμική ενέργεια, μετατρέποντας, δηλαδή, τη μεγάλη ταχύτητα σε αύξηση ύψους. Η απότομη άνοδος μπορεί να είναι μόνο προσωρινή αφού η ταχύτητα δε μπορεί να μειωθεί κάτω από την ταχύτητα απώλειας στήριξης.

Η σταθερή άνοδος επιτυγχάνεται με την ανταλλαγή της επιπρόσθετης (από αυτήν που απαιτείται για ΕΟΠ) προωθητικής ενέργειας σε δυναμική ενέργεια. Η προωθητική ενέργεια είναι προϊόν της ενέργειας του καυσίμου, που μετατρέπεται σε προωθητική ενέργεια από το σύστημα κινητήρα- έλικας/ τουρμπίνας. Έτσι διατηρείται σταθερή η άνοδος.

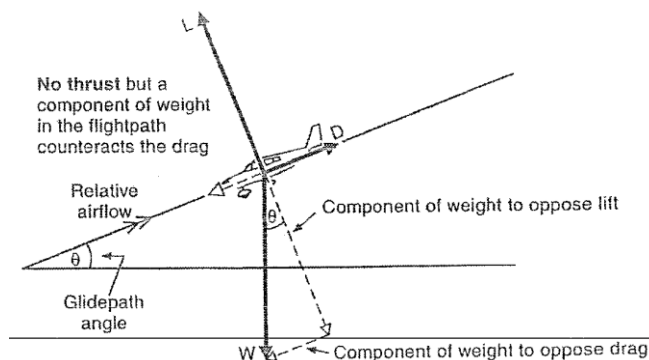
Σε μία σταθερή άνοδο η δύναμη της ώσης δρα κατά τη διεύθυνση της πτήσης και αντίθετα από την οπισθέλκουσα. Η δύναμη της άντωσης δρα κάθετα στο ίχνος της πτήσης. Η δύναμη του βάρους δρα κάθετα αλλά με κατεύθυνση το κέντρο της γης, οπότε δημιουργείται μια συνιστώσα που δρα αντίθετα από τη διεύθυνση της κίνησης. Για να διατηρηθεί η σταθερή άνοδος με σταθερή ταχύτητα το προωθητικό σύστημα πρέπει να παράγει ώση ικανή ώστε να εξισορροπεί την οπισθέλκουσα και να βοηθά να ανυψωθεί το βάρος του αεροπλάνου με κάθετη ταχύτητα, που ονομάζεται βαθμός ανόδου. Στη σταθερή άνοδο δεν υπάρχει επιτάχυνση, αφού το σύνολο των δυνάμεων είναι σε ισορροπία και συνεπώς το άθροισμά τους είναι μηδέν, άρα δε δημιουργείται συνισταμένη δύναμη. Κατά την άνοδο η δύναμη της άντωσης (που παράγεται αεροδυναμικά από τις πτέρυγες) είναι λίγο μικρότερη του βάρους. Αυτή η διαφορά καλύπτεται για να υπάρχει ισορροπία από την κάθετη συνιστώσα της περίσσειας ώσης.

Η γωνία ανόδου (γ) εξαρτάται από την περίσσεια ώση και το βάρος. Όσο μεγαλύτερο το βάρος τόσο μικρές οι επιδώσεις ανόδου, ενώ όσο πιο μικρό το βάρος, τόσο μεγαλύτερη η γωνία της ανόδου. Η ώση χρησιμοποιείται για να υπερνικήσει την οπισθέλκουσα κι αν το προωθητικό σύστημα δώσει ώση μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζεται για να εξισορροπήσει την οπισθέλκουσα σε ΕΟΠ τότε το αεροπλάνο μπορεί να καταφέρει άνοδο.

$$\begin{aligned} \text{Επομένως ισχύει: } \Sigma F_y &= 0 \Rightarrow T - D - W \cdot \sin \gamma = 0 \\ \text{και: } L - W \cdot \cos \gamma &= 0 \\ \text{και προκύπτει ότι: } \tan \gamma &= \frac{T - D}{L} \end{aligned}$$

### 4.4 ΚΑΘΟΔΟΣ

Όταν ένα αεροπλάνο κατέρχεται χωρίς να παράγεται ώση δρουν μόνο η άντωση, το βάρος και η οπισθέλκουσα.



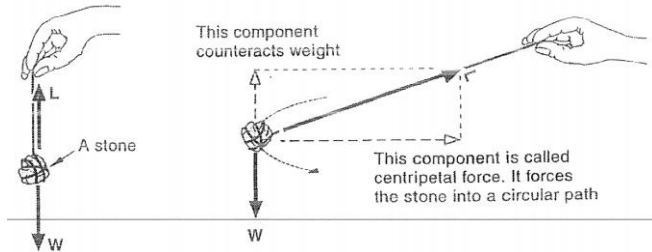
Εικόνα 16: Στην κατολίσθηση, μια συνιστώσα του βάρους εξισορροπεί την οπισθέλκουσα

Σε αυτή τη σταθερή κατολίσθηση οι τρεις δυνάμεις είναι σε ισορροπία, καθώς η συνισταμένη των δυνάμεων που δρα στο αεροπλάνο είναι ίση με το μηδέν. Όταν το αεροπλάνο πετά σε ΕΟΠ και η ώση μειώνεται στο μηδέν η δύναμη της οπισθέλκουσας τείνει να επιβραδύνει το αεροπλάνο, αφού δεν υπάρχει κάποια δύναμη να την εξισορροπήσει. Αν όμως η ΕΟΠ μετατραπεί σε κάθοδο, η συνιστώσα του βάρους που δρα στη διεύθυνση του ίχνους πτήσης είναι ικανή να εξισορροπήσει την οπισθέλκουσα. Έτσι το αεροπλάνο θα είναι ικανό να διατηρήσει την ταχύτητά του κατερχόμενο, μετατρέποντας τη δυναμική ενέργεια σε κινητική. Η πιο επίπεδη κατολίσθηση επιτυγχάνεται όταν για την απαραίτητη άντωση υπάρχει ελάχιστη οπισθέλκουσα, άρα τον καλύτερο λόγο άντωσης (L) / οπισθέλκουσας (D)

Η μεγαλύτερη γωνία κατολίσθησης επιτυγχάνεται αν είναι ο καλός αεροδυναμικός σχεδιασμός του αεροπλάνου που μπορεί να πετύχει μεγάλο λόγο L/D γιατί θα μπορεί να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση στον αέρα από ό,τι ένα αεροπλάνο που θα έχει μικρότερο λόγο L/D.

#### 4.5 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΤΡΟΦΗ

Με βάση τον πρώτο νόμο του Νεύτωνα ένα κινούμενο σώμα τείνει να διατηρήσει την ευθεία οριζόντια μη επιταχυνόμενη κίνησή του. Για να αλλάξει η κατάσταση αυτή αλλάζοντας την ταχύτητα ή την διεύθυνση της κίνησης, άρα για να επιταχυνθεί ένα σώμα μια άλλη δύναμη πρέπει να επιδράσει πάνω του (με βάση τον Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα).



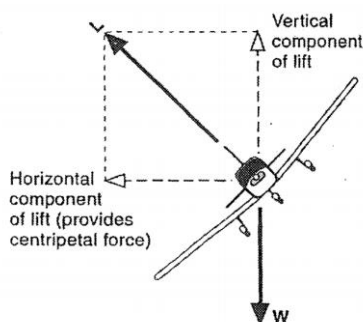
Εικόνα 17: Η κεντρομόλος δύναμη τραβά το σώμα προς το εσωτερικό της στροφής

Ένα σώμα που κατά την κίνησή του διαγράφει καμπύλη τροχιά έχει την τάση να ταξιδέψει διαγράφοντας ευθεία γραμμή, που θα είναι εμφανής στην καμπύλη. Για να παραμείνει σε καμπύλη τροχιά πρέπει μια συνεχόμενη δύναμη με κατεύθυνση το κέντρο της καμπύλης να εφαρμόζεται πάνω του, η κεντρομόλος δύναμη. Έτσι λοιπόν, για να στρέψει ένα αεροπλάνο πρέπει να παραχθεί τέτοια δύναμη στο εσωτερικό της στροφής. Αυτό κατορθώνεται δίνοντας κλίση στο αεροπλάνο, άρα και στη δύναμη της άντωσης, και δημιουργείται μια οριζόντια συνιστώσα της άντωσης. Στην ΕΟΠ η άντωση που παράγεται από τις πτέρυγες εξισορροπεί το βάρος του αεροπλάνου. Κατά τη μιας οριζόντιας στροφής οι πτέρυγες πρέπει να παράγουν μια κάθετη δύναμη που θα εξισορροπεί το βάρος, όπως ακριβώς μια κεντρομόλος δύναμη προς το κέντρο της στροφής, για να διατηρηθεί η στροφή. Η δύναμη της άντωσης σε μια οριζόντια στροφή είναι μεγαλύτερη από ό,τι σε ΕΟΠ. Για να παραχθεί αυτή η αυξημένη άντωση με την ίδια ταχύτητα αέρα, πρέπει να μεγαλώσει η γωνία προσβολής της πτέρυγας. Όσο πιο κλειστή η στροφή τόσο μεγαλύτερη άντωση απαιτείται. Στο αεροπλάνο, λοιπόν, κατά τη στροφή ισχύει ότι:

$$L \cdot \sin \varphi = F_c = m \frac{V^2}{r}, \quad L \cdot \cos \varphi = W = mg$$

Επομένως:

$$\tan \varphi = \frac{V^2}{r \cdot g} \xrightarrow{v=r\omega} \frac{V \cdot (r \cdot \omega)}{r \cdot g} \Rightarrow \tan \varphi = \frac{V\omega}{g}$$



Εικόνα 18: Με τον διατοίχισμό, η άντωση από τις πτέρυγες προσφέρει και μια και κεντρομόλο συνιστώσα

#### 5 ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ (STALL)

##### 5.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Η ροή του αέρα γύρω από την αεροτομή διαφοροποιείται καθώς αλλάζει η γωνία προσβολής. Για τις περισσότερες συνθήκες η ροή πάνω στην πτέρυγα είναι ομαλή κι έτσι έχει εφαρμογή το θεώρημα Bernoulli, σύμφωνα με την οποία με κάθε αύξηση της ταχύτητας μειώνεται η στατική πίεση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή άντωσης αλλά και οπισθέλκουσας. Η ικανότητα παραγωγής άντωσης της πτέρυγας αυξάνεται καθώς αυξάνεται η γωνία προσβολής, αλλά μόνο μέχρι την κρίσιμη γωνία προσβολής. Ιδανικά η ροή γύρω από την αεροτομή είναι στρωτή. Στην πραγματικότητα η ομαλή ροή αποκολλάται σε κάποιο σημείο της επιφάνειας της αεροτομής και γίνεται τυρβώδης. Στις μικρές γωνίες προσβολής το σημείο αποκόλλησης είναι προς το πίσω μέρος της πτέρυγας κι έτσι η τυρβώδης ροή δεν έχει μεγάλη σημασία. Στις μεγαλύτερες, όμως, γωνίες προσβολής το σημείο αποκόλλησης μεταφέρεται προς τα εμπρός. Καθώς η γωνία προσβολής αυξάνεται, προσεγγίζεται η κρίσιμη γωνία προσβολής και μετά από αυτή το σημείο αποκόλλησης μετακινείται ξαφνικά πολύ μπροστά, οπότε υπάρχει τυρβώδης ροή πάνω από το μεγαλύτερο κομμάτι της πτέρυγας.

Η δημιουργία χαμηλής στατικής πίεσης στην πάνω επιφάνεια της πτέρυγας (όπου παράγεται το μεγαλύτερο ποσοστό της άντωσης) μειώνεται από την απότομη αποκόλληση της ομαλής ροής του αέρα. Η τυρβώδης ροή δε βοηθά στη δημιουργία περιοχών χαμηλών πιέσεων. Έτσι, η ικανότητα παραγωγής άντωσης της πτέρυγας μειώνεται σημαντικά μετά την κρίσιμη γωνία προσβολής λόγω αποκόλλησης του οριακού στρώματος.

Η αποκόλληση του οριακού στρώματος και η αρχή της τυρβώδους ροής πάνω από την πτέρυγα λέγεται απώλεια στήριξης της αεροτομής. Η κρίσιμη γωνία προσβολής ή γωνία προσβολής απώλειας στήριξης είναι αυτή που εκφράζει το μέγιστο  $C_{L_{max}}$  και μετά από αυτή μειώνεται σημαντικά. Μετά την κρίσιμη γωνία προσβολής, το κέντρο της πίεσης (το οποίο μετακινείται μπροστά με την αύξηση της γωνίας προσβολής) μετακινείται ξαφνικά προς τα πίσω και παρατηρείται απότομη αύξηση της οπισθέλκουσας.

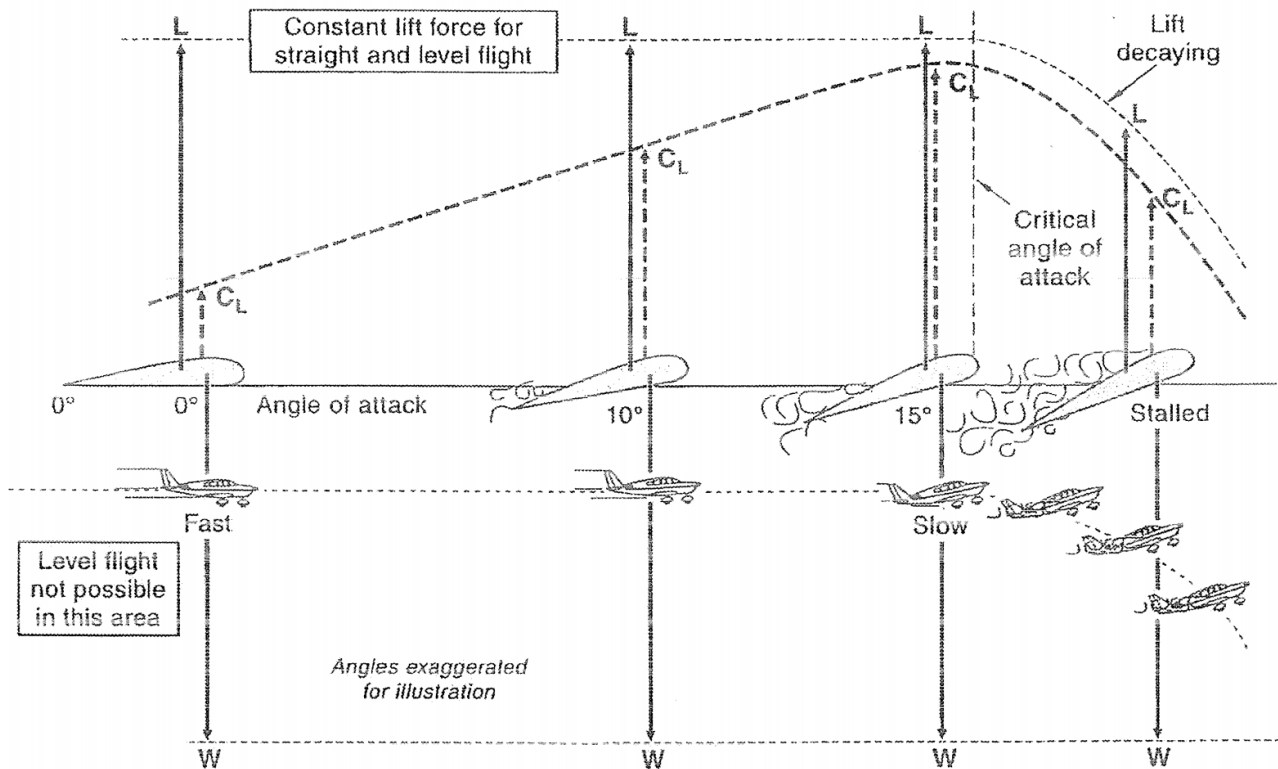
##### 5.2 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ

Προσεγγίζοντας την κρίσιμη γωνία προσβολής, η ομαλή ροή αέρα διαταράσσεται πάνω από την πτέρυγα και η τυρβώδης ροή συναντά το οριζόντιο ουραίο πτέρωμα. Το αεροπλάνο μπορεί να παραχθεί από τη ρίτιση που προκαλεί η τυρβώδης ροή.

Λόγω της απώλειας στήριξης η μείωση της άντωσης θα προκαλέσει βύθιση του αεροπλάνου και η προς τα πίσω κίνηση του κέντρου πίεσης θα προκαλέσει βύθιση της κεφαλής. Στα περισσότερα αεροπλάνα η κρίσιμη γωνία προσβολής είναι περίπου  $15^\circ$  με  $16^\circ$ .

##### 5.3 ΓΩΝΙΑ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ

Η απώλεια στήριξης εξαρτάται μόνο από την γωνία προσβολής κι όχι από την ταχύτητα. Η γωνία προσβολής όμως σχετίζεται με την ταχύτητα. Η σχέση αυτή εξαρτάται την άντωση που παράγεται στην αεροτομή, το βάρος, τον συντελεστή φόρτου, τη γωνία διατοίχισμού, την ισχύ και την απόκλιση των πτερυγών καμπυλότητας.

Εικόνα 19: Μια αεροτομή έχει τον  $C_{Lift\ max}$  στην κρίσιμη γωνία προσβολής

#### 5.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ

Μελετώντας τον τύπο της άντωσης:

$$L = C_{Lift} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot S$$

Για την απώλεια στήριξης, κι αφού η περυγική επιφάνεια ( $S$ ) είναι σταθερή και ενδεικνυόμενη ταχύτητα αέρα « $\frac{1}{2} \rho V^2$ » βγαίνει το εξής συμπέρασμα: Η άντωση είναι ανάλογη της σχέσης

$$C_{Lift} \cdot (ETA)^2$$

Στην κρίσιμη γωνία προσβολής ο συντελεστής άντωσης έχει τη μεγαλύτερη τιμή του κι έτσι η παραπάνω σχέση κατά την απώλεια γίνεται:  $C_{Lift\ max} \cdot (ETA_{Stall})^2$  (η άντωση τη στιγμή της απώλειας στήριξης είναι ανάλογη αυτής της σχέσης).

Επιπλέον, αφού ο όρος  $C_{Lift\ max}$  είναι σταθερός για κάθε δεδομένη αεροτομή προκύπτει ότι η άντωση τη στιγμή της απώλειας στήριξης είναι ανάλογη του  $(ETA_{Stall})^2$ , δηλαδή το τετράγωνο της ενδεικνυόμενης ταχύτητας αέρα εξαρτάται από την άντωση που πρέπει να παράγουν οι πτέρυγες. Μαθηματικά αυτό μπορεί να γραφεί:

$$(ETA_{Stall})^2 \propto L \Rightarrow (ETA_{Stall}) \propto \sqrt{L}.$$

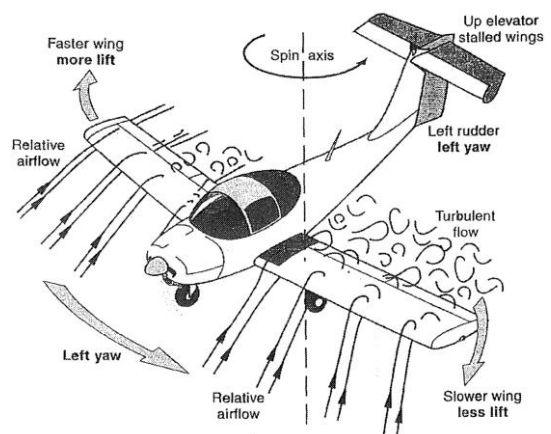
Η ταχύτητα αέρα από την οποία εξαρτώνται οι επιδόσεις του αεροπλάνου και η ταχύτητα την οποία ο χειριστής διαβάζει την ένδειξη ταχύτητας είναι η ενδεικνυόμενη ταχύτητα αέρα.

Έτσι, τη στιγμή τα απώλειας στήριξης η ταχύτητα απώλειας στήριξης εξαρτάται από την τετραγωνική ρίζα της απαιτούμενης άντωσης και η απαιτούμενη άντωση εξαρτάται από το βάρος και το συντελεστή φόρτισης. Η κρίσιμη γωνία προσβολής παραμένει ίδια για κάθε γωνία προσβολής, ενώ η ταχύτητα απώλειας στήριξης αυξάνεται ο συντελεστής φόρτισης.

#### 5.5 ΠΕΡΙΔΙΝΗΣΗ

Περιδίνηση είναι μια κατάσταση απώλειας στήριξης όπου το αεροπλάνο ακολουθεί μια σπειροειδή βύθιση μετά από μια εκτροπή λόγω πτώσης της μιας πτέρυγας τη στιγμή της απώλειας στήριξης.

Η περιδίνηση είναι μια κατάσταση απώλειας στήριξης, οπότε η πρώτη προϋπόθεση είναι οι πτέρυγες του αεροπλάνου να έχουν μεγάλη γωνία προσβολής. Δεύτερη προϋπόθεση είναι να πέσει πρώτη μια πτέρυγα. Η αυτοπεριστροφή θα αρχίσει γιατί στη χαμηλωμένη πτέρυγα που βρίσκεται σε απώλεια στήριξης η άντωση έχει μειωθεί και η οπισθέλκουσα έχει αυξηθεί. Το αεροπλάνο θα διατοιχιστεί, μια πλαγιολίσθηση θα δημιουργηθεί κι η κεφαλή θα πέσει. Έτσι ο ρυθμός της περιστροφής του αεροπλάνου θα αυξηθεί και θα εξελιχθεί σε περιδίνηση.



Εικόνα 19: Το αεροπλάνο σε περιδίνηση

## 6 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

### 6.1 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΒΙΟΪΛΙΚΑ

Τα περισσότερα αεροπλάνα σήμερα είναι φτιαγμένα από αλουμίνιο, ανθρακόνημα ή σύνθετα υλικά από υαλοβάμβακα, που παίζουν καθοριστικό ρόλο. Φαίνεται ότι δεν υπάρχει εναλλακτική λύση σε σχέση με αυτά τα υλικά που είναι στοιχειώδη στην κατασκευή αεροσκαφών. Γίνονται όμως προσπάθειες από επιστήμονες για την αντικατάσταση του ανθρακονήματος από βιο-υλικά. Οι φυσικές ίνες είναι ελαφρύτερες από τα ανθρακονήματα. Απαιτούν λιγότερη ενέργεια για να παραχθούν, είναι οικολογικές και είναι καλύτερες όσον αφορά στη μείωση του θορύβου. Αυτά τα οικολογικά υλικά βασίζονται σε ίνες λινιού, ανακυκλωμένα ανθρακονήματα και βιορητίνες. Τα τελικά υλικά τροποποιούνται για να προσεγγίσουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά, που είναι αναγκαία στο αεροπλάνο. Η πιο σημαντική ιδιότητα που χρειάζεται βελτίωση στα υλικά του αεροπλάνου είναι η ευφλεκτότητα. Επίσης απαιτείται αλλαγή τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, ενισχύοντας την πρόσφυση μεταξύ ινών και ρητίνης. Η ασφάλεια των επιβατών απαιτεί όλα τα σωτηρικά υλικά του αεροσκάφους να μην είναι εύφλεκτα. Σ' αυτό το πείραμα, το νέο αυτό βιοϊλικό δεν αναφλέγεται, ενώ ο φελλός παίρνει φωτιά. Οι φυσικές ίνες είναι πολύ εύφλεκτες, γι' αυτό και αναζητούνται λύσεις για αυτό το ευαίσθητο ζήτημα.

### 6.2 ΑΥΤΟΘΕΡΑΠΕΥΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ

Ερευνητές έχουν δημιουργήσει το πρώτο υλικό που επισκευάζεται αυτόματα και που προσφέρει έναν δυναμικό τρόπο για τη στεγανοποίηση τριχοειδών ρωγμών που αναπτύσσονται στα σύνθετα υλικά. Τα υλικά διαθέτουν μικρές κάψες κόλλας που προστίθενται σε αυτό. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ίνες γυαλιού, άνθρακα ή άλλων ουσιών με ανάμειξη ρητίνης. Η ζημιά στα υλικά αυτά ξεκινά ως μικροσκοπικές ρωγμές. Με τον καιρό οι ρωγμές αυτές αυξάνονται και αποδυναμώνουν το υλικό έως ότου να σπάσει. Για να θεραπευτούν αυτόματα οι ερευνητές ψέκασαν κάψουλες στο πάχος μιας ανθρώπινης τρίχας μέσω ενός πειραματικού fiber-glass (σύνθετο υλικό). Όταν μια ρωγμή εμφανίστηκε, οι κάψουλες άνοιξαν από το σπάσιμο, ρίχνοντας το περιεχόμενό τους και σφραγίζοντας τις ρωγμές. Το υλικό διατήρησε το 75% της αρχικής του δύναμης και αφότου οι ρωγμές είχαν αυτοθεραπευτεί για 48 ώρες. Παρόλα αυτά σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 200 βαθμούς Κελσίου ο μηχανισμός αυτός σταματά να δουλεύει και ο χρόνος της «θεραπείας» είναι πάρα πολύ μεγάλος. Τέλος για τη σωστή λειτουργία το υλικό αυτό περιέχει 100 με 200 κάψουλες ανά κυβική ίντσα. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας θα έχει εφαρμογή στα αεροσκάφη, κάνοντας πιο ασφαλή την πτήση.

### 6.3 ΑΝΑΚΑΜΠΤΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ

Μια ομάδα νέων έξυπνων υλικών που ανακαλύφθηκαν από ερευνητές έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση της καύσης καυσίμου σε κινητήρες τζετ, μειώνοντας το κόστος της πτήσης. Τα υλικά, τα οποία θα μπορούσαν επίσης να μειώσουν τον θόρυβο του αεροπλάνου σε κατοικημένες περιοχές, έχουν πρόσθετες εφαρμογές σε μια ποικιλία άλλων βιομηχανιών. Η ανακάλυψή του βασίζεται στη συγκέντρωση δύο σχετικά νέων τομέων της επιστήμης υλικών που περιλαμβάνουν κράματα μετάλλων ή μέταλλα που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα στοιχεία. Η πρώτη περιοχή περιλαμβάνει κράματα μνήμης σχήματος, "έξυπνα" υλικά που μπορούν να αλλάξουν από το ένα σχήμα στο άλλο με συγκεκριμένα σκανδάλη, σε αυτήν την περίπτωση θερμοκρασία. Φανταστείτε μια ευθεία μεταλλική ράβδο που κάμπτεται σε ανοιχτήρι. Αλλάζοντας τη θερμοκρασία, το τριμπουσόν μετατρέπεται σε ράβδο και αντιστρόφως.

Πολλές πιθανές εφαρμογές για κράματα σχήματος-μνήμης περιλαμβάνουν εξαιρετικά ζεστά περιβάλλοντα, όπως ένας κινητήρας

jet. Μέχρι τώρα, ωστόσο, τα οικονομικά κράματα μνήμης σχήματος υψηλής θερμοκρασίας, λειτουργούσαν μόνο σε θερμοκρασίες έως περίπου 400 βαθμούς Κελσίου. Η προσθήκη στοιχείων όπως ο χρυσός ή η πλατίνα μπορεί να αυξήσει σημαντικά αυτήν τη θερμοκρασία, αλλά τα υλικά που προκύπτουν είναι πολύ ακριβά, μεταξύ άλλων περιορισμών.

### 6.4 ΕΞΥΠΝΗ ΠΤΕΡΥΓΑ

Μια ειδική κατηγορία σταθερών πτερυγίων μικρού αέρα-οχήματος (MAV) σχεδιάζεται επί του παρόντος για να πετάξει και να αιωρηθεί για να παρέχει υπεροχή στην εμβέλεια, καθώς και να μπορεί να αιωρείται μέσω ενός ελιγμού πτήσης που είναι γνωστό ως στήριγμα για να επιτύχει μια ποικιλία αποστολών επιτήρησης. Ο ελιγμός αιωρηματοποίησης απαιτεί έλεγχο ρολού της πτέρυγας μέσω διαφορικής εκτροπής aileron, αλλά ένα συμβατικό σύστημα συμβάλλει σημαντικά στο μικτό βάρος και την πολυπλοκότητα ενός MAV. Επομένως, είναι πλεονεκτικό να χρησιμοποιείτε προσεγγίσεις έξυπνης δομής με ενεργά υλικά για να σχεδιάσετε μια ελαφριά, στιβαρή πτέρυγα για το MAV. Η προτεινόμενη έξυπνη πτέρυγα αποτελείται από ένα ενεργό πτερύγιο ρυμούλκησης, ενσωματωμένο με διμορφικούς ενεργοποιητές με πιεσοκεραμικές ίνες. Η ενεργοποίηση ενισχύεται με την προφόρτιση των ενεργοποιητών δίμορφης με ένα συμπίεστικό αξονικό φορτίο. Η προφόρτιση ασκείται στους ενεργοποιητές μέσω ενός παθητικού δέρματος λατέξ ή ηλεκτροενεργού πολυμερούς (EAP) που τυλίγεται γύρω από το αεροστεγές. Ένα δέρμα EAP θα ενίσχυε περαιτέρω την ενεργοποίηση παρέχοντας ένα ηλεκτροστατικό αποτέλεσμα του διηλεκτρικού πολυμερούς για να αυξήσει την εκτροπή. Η αναλυτική μοντελοποίηση καθώς και η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δείχνουν ότι η προτεινόμενη ιδέα θα μπορούσε να επιτύχει τον στόχο αμφίδρομης απόκλισης 30 ° σε τυπικές συνθήκες πτήσης. Κατασκευάστηκαν αρκετοί ενεργοποιητές δίμορφων και σχεδιάστηκε μια πειραματική ρύθμιση για τη μέτρηση των στατικών και δυναμικών παραμορφώσεων. Τα πειραματικά αποτελέσματα επικύρωσαν την αναλυτική τεχνική και τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω για την πρόβλεψη της απόδοσης του σχεδιασμού έξυπνης πτέρυγας για ένα MAV.

### 6.5 ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ

Η προηγμένη όραση με υπολογιστή και η μηχανική εκμάθηση - από αισθητήρες σε κάμερες - επιτρέπουν γρήγορα σημαντικές προόδους στην ανάπτυξη αυτόνομων τεχνολογιών στα αεροσκάφη. Στα επόμενα χρόνια, η αυτονομία θα μπορούσε να βοηθήσει την αεροπορική βιομηχανία να μετριάσει τις ελλείψεις των πιλότων και να καλύψει με ασφάλεια την αυξανόμενη ζήτηση στα εμπορικά αεροπορικά ταξίδια.

Μόνο πριν από δέκα χρόνια, η ιδέα των αυτόνομων οχημάτων στους δρόμους μας φαινόταν σαν μια μακρινή πραγματικότητα. Ωστόσο, οι ραγδαίες εξελίξεις στη μηχανική μάθηση - καθώς και στην τεχνολογία αισθητήρων, κάμερας και χαρτογράφησης - σημείωσαν μεγάλη πρόοδο. Ωστόσο, οι αυτόνομες τεχνολογίες δεν ισχύουν μόνο για τα αυτοκίνητα: επηρεάζουν επίσης την ανάπτυξη πιο αυτόνομων πτήσεων.

Στην πραγματικότητα, η τεχνολογία έχει ήδη μειώσει τον αριθμό των πιλότων στο πιλοτήριο από τρεις σε δύο και ο αυτόματος πιλότος χρησιμοποιείται συνήθως σε πολλές φάσεις της πτήσης σήμερα. Εκτός από την αντιμετώπιση πιλοτικών ελλείψεων, οι αυτόνομες τεχνολογίες έχουν επίσης τη δυνατότητα να βελτιώσουν τη διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας, να βελτιώσουν τις επιδόσεις και να αυξήσουν περαιτέρω την ασφάλεια των αεροσκαφών, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι διατηρούνται τα σημερινά πρωτοφανή επίπεδα ασφάλειας.



## ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΣΥΜΒΟΛΑ

|           |                                                                       |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| $C_D$     | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ)<br>$C_D = \frac{D}{Q \cdot S}$ |
| $C_L$     | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΩΣΗΣ<br>$C_L = \frac{L}{Q \cdot S}$                     |
| $g$       | ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ                                                  |
| $L$       | ΔΥΝΑΜΗ ΑΝΩΣΗΣ                                                         |
| $D$       | ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑ                                                          |
| $F_c$     | ΚΕΝΤΡΟΜΟΛΟΣ ΔΥΝΑΜΗ                                                    |
| $p$       | ΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ                                                         |
| $m$       | ΜΑΖΑ                                                                  |
| $Q$       | ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΙΕΣΗ<br>$Q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$              |
| $r$       | ΑΚΤΙΝΑ ΣΤΡΟΦΗΣ                                                        |
| $S$       | ΠΤΕΡΥΓΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ                                                   |
| $T$       | ΩΣΗ                                                                   |
| $V$       | ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ                                                       |
| $W$       | ΒΑΡΟΣ ΙΣΟ ΜΕ MG<br>$W = m \cdot g$                                    |
| $\gamma$  | ΓΩΝΙΑ ΑΝΟΔΟΥ                                                          |
| $E$       | ΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ<br>$E = K + Q$                                         |
| $ETA$     | ΕΝΔΕΙΚΝΥΟΜΕΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΕΡΑ                                           |
| $\rho$    | ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ                                                             |
| $\varphi$ | ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ                                                         |
| $\omega$  | ΔΙΑΝΥΣΜΑ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ                                           |



**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ**

1. Giancoli, «*Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, A Vol.*» – Εκδόσεις Τζιόλα, 4<sup>η</sup> έκδοση
2. T.H.G. Megson, «*Δομή Αεροσκαφών για Σπουδαστές Αεροναυπηγούς*» – Εκδόσεις Fountas, 5<sup>η</sup> έκδοση
3. Trevor Thom, «*Air Pilot's Manual, The Aeroplane - Technical*» – Pooley's Air Pilot Publishing
4. «*Principles of flight, ATPL Ground training series*» – CAE Oxford aviation Academy, 2014
5. «*Rotocraft flying handbook*» – U.S. Department of transportation F.A.A., 2000
6. <https://www.airbus.com/newsroom/stories/autonomy-aerial-mobility.html>
7. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/20/12/125007>
8. <https://www.newscientist.com/article/mg19626245-000-smart-composite-detects-and-repairs-airplane-cracks/>
9. <https://gr.euronews.com/2018/04/30/eco-compass-nea-ilika-gia-ta-aeroplana>