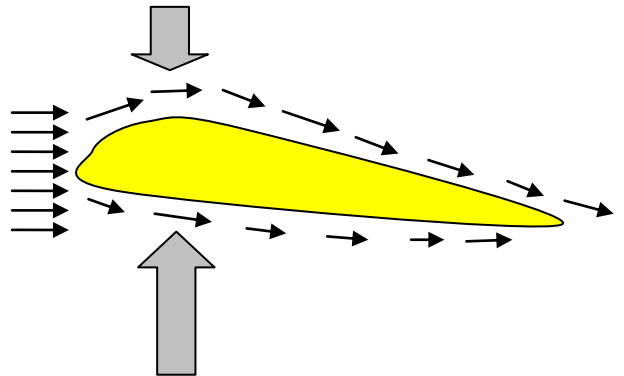


## Πως πετάνε τα αεροπλάνα;

Σίγουρα όλοι έχουμε βρεθεί κοντά σε ένα αεροδρόμιο και έχουμε θαυμάσει την προσγείωση ή την απογείωση ενός αεροπλάνου. Όσες φορές και να έχουμε δει την πτήση ενός αεροπλάνου, πάντα μένουμε έκθαμβοι θαυμάζοντας αυτό το τεχνολογικό θαύμα, εκατοντάδες τόνους μέταλλο να γλιστράνε απαλά πάνω σε ένα στρώμα αέρα.

Η ερμηνεία που δίνουν τα βιβλία και οι φυσικοί για το φαινόμενο δεν μειώνουν στο ελάχιστο αυτό το θαυμασμό, όπως εξάλλου συμβαίνει και με πολλά άλλα τεχνολογικά θαύματα. Η εξοικείωσή μας με την τεχνολογία και μόνο αυτή, δεν μας αφήνει να διερωτηθούμε πώς είναι δυνατό να συμβαίνει κάτι στη μια μεριά του πλανήτη και να το βλέπουμε και να το ακούμε με διαφορά δευτερολέπτων στην τηλεόρασή μας; Ή πως είναι δυνατό να καίμε το κάρβουνο στην Κοζάνη και να ζεσταίνεται το νερό στο θερμοσίφωνα του σπιτιού μας. Ή πως ένα μικρό φλασάκι μνήμης μπορεί και χωράει εκατοντάδες εγκυκλοπαίδειες;. Οι γνώσεις που αποκτάμε στο σχολείο δεν είναι καθόλου επαρκείς αλλά πολλές φορές και λανθασμένες για την ερμηνεία πολλών από αυτά τα τεχνολογικά θαύματα. Η πιο λανθασμένη όμως ερμηνεία θεωρώ ότι είναι αυτή που έχει να κάνει με την πτήση του αεροπλάνου.

Η ερμηνεία που αναφέρουν τα περισσότερα εγχειρίδια για την πτήση ενός αεροπλάνου είναι αυτή που βασίζεται στην αρχή του Bernoulli. Λόγω του ειδικού σχήματος της πτέρυγας, ο αέρας διαγράφει μεγαλύτερο διάστημα όταν διανύει το πάνω μέρος της πτέρυγας από ότι το κάτω. Λόγω της ασυμπίεστότητας του αέρα, θα πρέπει να οι δύο αυτές αποστάσεις να διανύονται στον ίδιο χρόνο. Άρα η ταχύτητα του αέρα στο πάνω μέρος της πτέρυγας είναι μεγαλύτερη από ότι η ταχύτητα στο κάτω μέρος. Αυτή η διαφορά ταχυτήτων λόγω της σχέσεως Bernoulli δημιουργεί και μια διαφορά πιέσεων. Η πίεση προς τα πάνω είναι μεγαλύτερη από την πίεση προς τα κάτω και έτσι δημιουργείται η δύναμη της άντωσης που ανυψώνει το αεροπλάνο.



$$\text{Σχέση Bernoulli } P_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho u_2^2$$

Η ερμηνεία αυτή μολονότι λογικοφανής έχει πολλά κενά. Μπορούμε να εκφράσουμε πολλές ενστάσεις πάνω σε αυτή την ερμηνεία όπως:

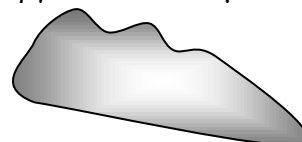
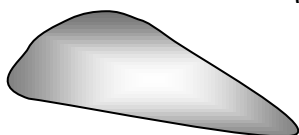
### 1<sup>η</sup> Ένσταση

Αν η δύναμη που κρατάει στον αέρα το αεροπλάνο οφείλεται στο ειδικό σχήμα της πτέρυγας, τότε τα αεροπλάνα δεν θα μπορούσαν να πετάξουν ανάποδα. Παρόλα αυτά όλοι πιστεύω έχουμε θαυμάσει σε αγώνες επίδειξης πτήσης, αεροπλάνα να πετάνε ανάποδα.



### 2<sup>η</sup> Ένσταση

Κάποια σχήματα πτερυγών όπως τα παρακάτω που θα περιμέναμε με την παραπάνω λογική ότι θα δημιουργούσαν μεγαλύτερη δύναμη άντωσης, αφού θα δημιουργούσαν μεγαλύτερη διαφορά ταχυτήτων πάνω και κάτω από την πτέρυγα, αντίθετα δεν λειτουργούν αποτελεσματικά.



### 3<sup>η</sup> Ένσταση

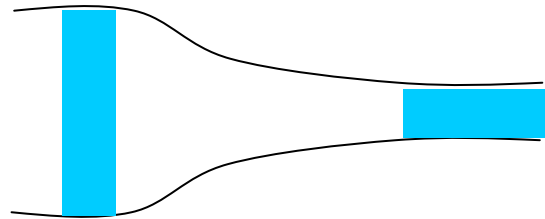
Ούτε όμως τα νούμερα βγαίνουν. Ας προβούμε και σε κάποιους ποσοτικούς υπολογισμούς.

Ας πάρουμε ένα μικρό μοντέλο αεροπλάνου με τα εξής χαρακτηριστικά.

Μάζα :	0,7 Kg
Μήκος πτέρυγας:	1m
Μήκος της πάνω χορδής της πτέρυγας:	0,1636m
Μήκος της κάτω χορδής της πτέρυγας:	0,1624m
Τυπική ταχύτητα του μοντέλου:	10m/s
Πυκνότητα αέρα:	1,2Kg/m <sup>3</sup>

Εφαρμόζοντας τη σχέση Bernoulli βρίσκουμε ότι η ανυψωτική δύναμη είναι 0,14N που είναι όμως 50 φορές μικρότερη από την απαιτούμενη των 6,9N που είναι το βάρος του μοντέλου μας. Άρα παρατηρούμε ότι η αρχή του Bernoulli αποτυγχάνει παταγωδώς να ερμηνεύσει την κίνηση των αεροπλάνων.

Αν το δούμε από άλλη σκοπιά η σχέση του Bernoulli η απόδειξη της οποίας στα περισσότερα βιβλία γίνεται με την αρχή διατήρησης της μηχανικής ενέργειας, δεν είναι τίποτε άλλο από ένα πόρισμα του θεμελιώδη νόμου. ( όπως εξάλλου πόρισμα του θεμελιώδη νόμου είναι και η αρχή διατήρησης της μηχανικής ενέργειας ). Για του λόγου το αληθές θα αποδείξουμε τη σχέση



Bernoulli, με τη βοήθεια του θεμελιώδη νόμου.

Έστω μια ποσότητα νερού που μεταβαίνει από ένα φαρδύτερο σωλήνα σε έναν στενότερο. Η ταχύτητα αυτής της μάζας αλλάζει, αφού στο φαρδύ μέρος κινείται με ταχύτητα  $u_1$  ενώ στο στενό με ταχύτητα  $u_2$ . Άρα από το πέρασμα ασκήθηκε στη μάζα μία δύναμη. Η δύναμη αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$F_{ολ} = \frac{m(u_2 - u_1)}{\Delta t} \rightarrow \Delta P \cdot \bar{S} = \frac{d \cdot V(u_2 - u_1)}{\Delta t} \rightarrow \Delta P \cdot \bar{S} = \frac{d \cdot \Delta \ell \cdot \bar{S}(u_2 - u_1)}{\Delta t} \rightarrow$$

$$\Delta P = d(u_2 - u_1) \left( \frac{u_1 + u_2}{2} \right) \rightarrow P_1 + \frac{1}{2} du_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} du_2^2$$

Στην παραπάνω απόδειξη το  $\bar{S}$  παριστάνει το μέσο εμβαδό και το  $\frac{\Delta \ell}{\Delta t}$  τη μέση ταχύτητα που είναι το ημιάθροισμα των δύο ταχυτήτων. Μολονότι η απόδειξη δεν είναι αυστηρή, φανερώνει ότι η σχέση Bernoulli δεν είναι μία ξεχωριστή αρχή της φυσικής, αλλά απόρροια του θεμελιώδη νόμου.

Εγκαταλείποντας τώρα την ερμηνεία με τη βοήθεια της σχέσης Bernoulli προσφεύγουμε στην δύναμη της αντίστασης του αέρα για μεγάλες σχετικά ταχύτητες όπου η ροή δεν μπορεί να θεωρηθεί στρωτή. Τότε μια καλή προσέγγιση είναι να πάρουμε την αντίσταση του αέρα ως εξάρτηση της ταχύτητας στο τετράγωνο. Ο αντίστοιχος τύπος είναι ο νόμος του Stokes:

$$F_{αντ} = \frac{1}{2} d C_{αντ} S u^2$$

Όπου  $d=1,25\text{Kg/m}^3$  η πυκνότητα του αέρα

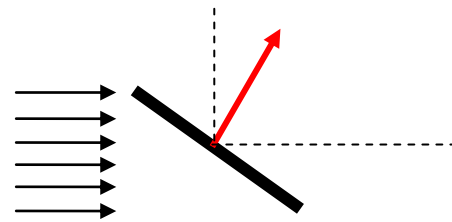
$S$  το εμβαδόν της επιφάνειας που εμποδίζει την κίνηση του αέρα

$u$  η ταχύτητα του αέρα

$C_{αντ}$  μια σταθερά που έχει να κάνει με το σχήμα του σώματος και μια τυπική τιμή της είναι 0,2

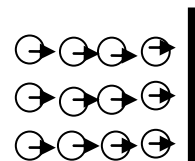
*Πως πετάνε τα αεροπλάνα;*

Η αντίσταση του αέρα είναι πάντα κάθετη στην επιφάνεια. Έτσι μπορεί να αναλυθεί σε μία οριζόντια που αντιστέκεται στην κίνηση του αεροπλάνου και λέγεται οπισθέλκουσα και μία κατακόρυφη που λέγεται άντωση. Η αντίσταση του αέρα ερμηνεύει λοιπόν την δύναμη της άντωσης καθώς και το ότι τα πολεμικά αεροπλάνα που έχουν σχεδόν επίπεδα πτερύγια



μπορούν να πετάξουν και ανάποδα. Αρκεί να αντιστρέψουν την κλίση της πτέρυγας. Αν όμως κάνουμε τους απαραίτητους υπολογισμούς θα δούμε ότι πάλι αυτή η δύναμη δεν μπορεί να κρατήσει ένα αεροπλάνο αφού είναι τουλάχιστον 50 φορές μικρότερη από το βάρος του αεροπλάνου. Άρα το πρόβλημα παραμένει. Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι ότι και αυτή η δύναμη δεν είναι τίποτε άλλο παρά μία απόρροια του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα. Να και η απόδειξη:

Έστω μόρια του αέρα που χτυπάνε μια επιφάνεια εμβαδού  $S$ . Τότε το κάθε μόριο ασκεί στην επιφάνεια δύναμη  $F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = k \frac{mu}{\Delta t}$



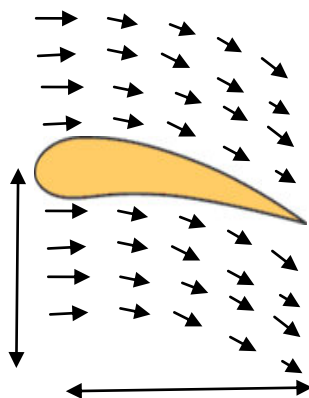
Όπου  $k$  μία σταθερά που κυμαίνεται από 1 μέχρι 2 ανάλογα αν η κρούση είναι πλαστική ή ελαστική ή ανελαστική. Η συνολική δύναμη που θα δέχεται η επιφάνεια σε χρόνο  $t$  θα είναι:

$$F_{ολ} = \frac{kNmu}{\Delta t} = k \frac{m_{oz}u}{\Delta t} = k \frac{dVu}{\Delta t} = kdS \frac{\Delta x}{\Delta t} u = kdSu^2$$

Η απόδειξη μπορεί να μην είναι αυστηρή αλλά δείχνει ξεκάθαρα ότι αυτή η αντίσταση του αέρα προέρχεται και πάλι από την εφαρμογή του 2<sup>ου</sup> Νόμου του Νεύτωνα και τη βασική κινητική θεωρία των αερίων.

Η σχέση στην οποία καταλήγουμε είναι της ίδιας τάξεως με τη σχέση που θα καταλήγαμε αν χρησιμοποιούσαμε την αρχή του Bernoulli, οπότε καταλήγουμε και πάλι σε αδιέξοδο.

Η λύση από αυτό το αδιέξοδο ερμηνείας της πτήσης των αεροπλάνων προέρχεται από το φαινόμενο Coanda. Φαινόμενο Coanda, ονομάζουμε την τάση ενός ρεύματος αέρα ή ρευστού γενικότερα, να μένει σε επαφή κατά την πορεία του με μια κυρτή επιφάνεια, από το να ακολουθήσει μια πορεία σε ευθεία γραμμή όπως η αρχική του. Έτσι μια πτέρυγα ενός αεροπλάνου δεν στρεβλώνει μόνο το τμήμα του αέρα που πέφτει πάνω της, αλλά και ένα μεγάλο μέρος πάνω και κάτω από την πτέρυγα, όσο περίπου το πλάτος της πτέρυγας.



Λόγω αυτού του φαινομένου, ο αέρας που εκτρέπεται προς τα κάτω από μια πτέρυγα, δεν είναι ανάλογος της μετωπικής επιφάνειας της πτέρυγας, αλλά ανάλογος του πλάτους της πτέρυγας. Έτσι η κίνηση του αεροπλάνου δημιουργεί μία ορμή του αέρα στον άξονα  $y$  προς τα κάτω. Με άλλα λόγια η κίνηση της πτέρυγας ασκεί στον αέρα μία δύναμη προς τα κάτω η οποία είναι ίση με το ρυθμό μεταβολής της ορμής του αέρα στον άξονα  $y$ . Λόγω της δράσης αντίδρασης και ο αέρας θα ασκεί στο αεροπλάνο μια αντίθετη δύναμη προς τα πάνω, η οποία θα εξουδετερώνει το βάρος του αεροπλάνου.

Που οφείλεται όμως το φαινόμενο Coanda;. Η ερμηνεία του φαινομένου κρύβεται στις δυνάμεις Van der Waals που αναπτύσσονται μεταξύ πτέρυγας και μορίων του αέρα καθώς και μεταξύ των μορίων του αέρα μεταξύ τους. Η πτήση του αεροπλάνου είναι τελικά το αποτέλεσμα της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ μορίων του αέρα καθώς και μεταξύ μορίων του αέρα και αεροπλάνου. Η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να ερμηνευτεί αποκλειστικά από το θεμελιώδη νόμο.

Το φαινόμενο Coanda σε συνδυασμό με τον θεμελιώδη νόμο δίνουν μία τυπική ερμηνεία την πτήσης των αεροπλάνων. Ας πάρουμε το παράδειγμα ενός Airbus a300

Άνοιγμα φτερών 45m

Μέγιστο βάρος 170 tn

Ταχύτητα 0,8\*340m/s

Ισχύς κινητήρων 300KN 67000 Λίβρες=67000\*0,45Kp

Εφαρμόζοντας τώρα το νόμο της αντίστασης Stokes και λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο Coanda θα πάρουμε ως επιφάνεια που αντιστέκεται στην κίνηση του αέρα το μήκος των πτερυγίων επί το πλάτος τους δηλαδή  $45 \cdot 6 = 270m^2$ . Πήραμε το ύψος 6 μέτρα αφού ο αέρας που εκτρέπεται είναι όπως αναφέραμε όσο περίπου το πλάτος του φτερού που είναι 3 μέτρα και από πάνω και από κάτω από το φτερό.

Αν η ταχύτητα του αεροπλάνου είναι  $250Km/h = 70m/s$  και η κλίση της πτέρυγας με κατεβασμένα τα φλαγκς είναι 60 μοίρες, τότε η συνιστώσα της αντίστασης του αέρα στον άξονα y θα είναι:

$$F_{avt} = \frac{1}{2} dC_{avt} Su^2 = \frac{1}{2} 1,25 \cdot 0,2 \cdot 270 \cdot 4900N \approx 165000N = 16tn$$

Αν λάβουμε υπόψη και τη συνιστώσα της αντίστασης αυτής παίρνοντας ως γωνία τις 45 μοίρες, η δύναμη της άντωσης γίνεται περίπου ίση με 11 τόνοι, αρκετά μικρότερο μέγεθος από τους 170 τόνους. Η μόνη δυνατότητα για την απογείωση του αεροπλάνου είναι η αύξηση της ταχύτητας κατά 4 φορές, πράγμα που είναι αδύνατο, οπότε και πάλι το πρόβλημα της ερμηνείας

Ας δούμε το πρόβλημα μέσα από το δεύτερο θεμελιώδη νόμο.

Αν το αεροπλάνο κατά την απογείωση φθάνει σε ταχύτητα 70m/s σε 20s τότε διαπιστώνουμε ότι αποκτάει λόγω της λειτουργίας των κινητήρων επιτάχυνση  $a = 3,5m/s^2$ . Αν η κλίση του αεροπλάνου κατά την απογείωση είναι περίπου 30 μοίρες, τότε η συνιστώσα της δύναμης του κινητήρα προς τα πάνω είναι B/6. Τώρα έχουμε μία καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας, η θεωρία μας όμως δεν ερμηνεύει ακόμη την πτήση του αεροπλάνου.

Εν κατακλείδι θα λέγαμε ότι στον κατακόρυφο άξονα ασκείται στο αεροπλάνο δύναμη τουλάχιστον όση και το βάρος του. Η δύναμη αυτή προέρχεται από τον περιβάλλοντα αέρα. Άρα και στον αέρα ασκείται μία αντίθετη δύναμη προς τα κάτω η οποία επιφέρει και μία κατακόρυφη μεταβολή της ορμής του αέρα. Ο κατακόρυφος ρυθμός μεταβολής της ορμής του αέρα είναι τουλάχιστον ίσος με το βάρος του αεροπλάνου. Αυτή ίσως η πρόταση είναι εν κατακλείδι και το συμπέρασμα όλου του άρθρου. Η μεταβολή αυτή της ορμής επιτυγχάνεται αφενός μεν από το σχήμα του αεροπλάνου και ειδικά των φτερών του από την ταχύτητά του που πετυχαίνεται μέσω του κινητήρα του, καθώς και από τον ίδιο τον κινητήρα του.

Ίσως η ανάλυση που κάναμε μέχρι τώρα να γίνει πιο κατανοητή αν πάμε να την εφαρμόσουμε για ένα υποβρύχιο. Ένα υποβρύχιο με πυκνότητα μεγαλύτερη από το νερό μπορεί να μην βυθίζεται, η απάντηση είναι ναι. Και αυτό μπορεί να το κάνει με δύο τρόπους. Με τη χρήση μιας έλικας που ρίχνει νερό προς τα κάτω με τέτοιο ρυθμό ώστε να εξουδετερώνει το βάρος του υποβρυχίου. Έτσι το υποβρύχιο μπορεί να ισορροπεί. Το αντίστοιχο αυτού στον αέρα είναι η ισορροπία ενός ελικοπτέρου. Μπορεί όμως με τη βοήθεια πάλι της έλικας να σπρώχνει νερό προς τα πίσω οπότε αυτό να κινείται προς τα μπρος. Τότε με τη βοήθεια κατάλληλων πτερυγίων μπορεί να κινείται σε ευθεία αφού λόγω των πτερυγίων θα έχουμε μία ποσότητα νερού να κινείται προς τα κάτω δημιουργώντας έτσι την απαραίτητη δύναμη για την εξουδετέρωση του βάρους του υποβρυχίου.

Τελικά μπορεί να μην καταφέραμε να ερμηνεύσουμε πλήρως τη λειτουργία της πτήσης ενός αεροπλάνου, αλλά μετά από όλα αυτά θεωρώ ότι γίναμε λίγο σοφότεροι γύρω από το θέμα.

© Πάνος Μουρούζης