

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

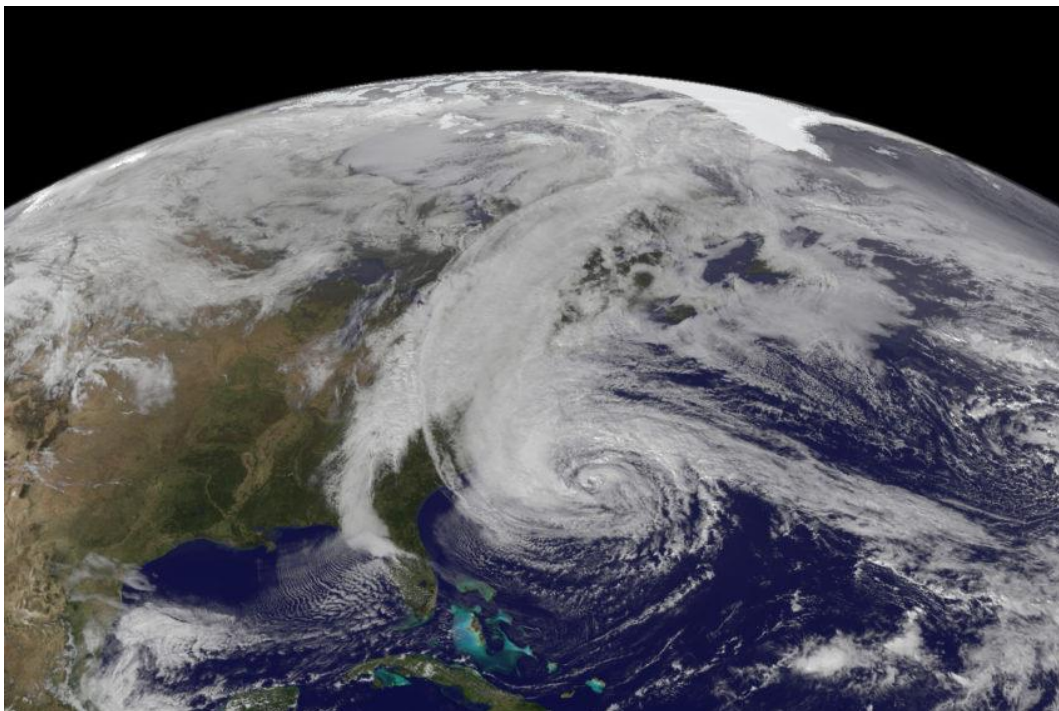
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΜΑΘΗΜΑ: ΦΥΣΙΚΗ Ι

1^ο ΕΞΑΜΗΝΟ

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ: 2020-2021

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΣΕ ΚΙΝΗΣΗ-ΔΥΝΑΜΗ CORIOLIS



ΑΛΕΞΑΚΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

ΔΗΜΑΙΝΑ ΣΤΥΛΙΑΝΗ

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ/ABSTRACT.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	4
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	5
Ατμοσφαιρική κίνηση και δυναμική.....	5
Μαθηματική περιγραφή της ατμοσφαιρικής κίνησης.....	7
Δύναμη Βαρύτητας.....	10
Δύναμη Τριβής.....	11
Δύναμη Βαροβαθμίδας.....	12
Αδράνεια.....	14
Φυγόκεντρος Δύναμη.....	14
Δύναμη Coriolis.....	15
Φαινόμενο Κοριόλις (Coriolis Effect).....	18
Αιτίες του φαινομένου Coriolis.....	18
Αποτελέσματα του φαινομένου Coriolis.....	19
ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	20
Η δύναμη Coriolis στα τρένα και στις περιστρεφόμενες πλατφόρμες.....	20
Η δύναμη Coriolis στις πτήσεις.....	21
Θαλάσσια ρεύματα και δύναμη Coriolis.....	22
Ο καιρός και η δύναμη Coriolis (Weather patterns).....	24
Το φαινόμενο Coriolis σε άλλους πλανήτες.....	24
Ενδεικτική άσκηση στη δύναμη Coriolis.....	25
BINTEO.....	25
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	26

Περίληψη

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος της Φυσικής Ι και έχει ως αντικείμενο την μελέτη και κατανόηση της ατμοσφαιρικής κίνησης και της δύναμης Coriolis. Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία είναι η κίνηση του αέρα σε όλα τα επίπεδα της ατμόσφαιρας. Οι κινητήριες δυνάμεις μεταξύ άλλων, πίσω από την ατμοσφαιρική κίνηση είναι η ηλιακή ενέργεια και η δύναμη Coriolis. Η δύναμη Coriolis παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1651 από τον Giovanni Riccioli, ωστόσο η επίσημη ανακάλυψη πραγματοποιήθηκε από τον Gustave Coriolis το 1853. Στη φυσική η δύναμη Coriolis είναι μια αδρανειακή δύναμη που δρα σε αντικείμενα τα οποία κινούνται μέσα σε ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται. Έτσι, επειδή είναι ενδιαφέρον και αναγκαίο να γνωρίζει κανείς που οφείλεται η ατμοσφαιρική κίνηση επιλέχθηκε η εκπόνηση αυτού του θέματος.

Abstract

This work was carried out in the context of the course of Physics I and aims to study and understand the atmospheric motion and Coriolis force . Atmospheric circulation is the movement of air at all levels of the atmosphere. The driving forces behind atmospheric motion, among others, are solar energy and the Coriolis force. The Coriolis force was first observed in 1651 by Giovanni Riccioli, however the official discovery was made by Gustave Coriolis in 1853. In physics the Coriolis force is an inertial force acting on objects that move in a rotating frame of reference. Thus, because it is interesting and necessary to know the cause of atmospheric motion, this topic was chosen.

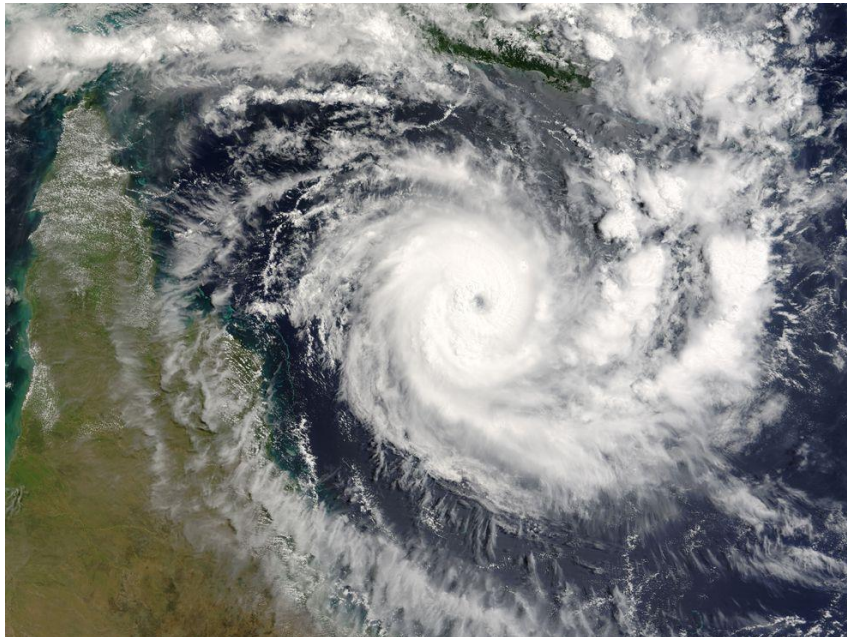
Εισαγωγή

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η κατανόηση της κίνησης των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα της γης είναι το αέριο σώμα που περιβάλλει τη Γη και συγκρατείται λόγω της βαρύτητάς της. Η ατμόσφαιρα είναι εκείνη, που συγκρατεί την υπεριώδη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, που προκαλεί τους χρωματισμούς του ουρανού και των νεφών, ενώ συγχρόνως αποτελεί το μέσον στη διάδοση του ήχου, αλλά και στη διάχυση του φωτός.

Ειδικότερα, η ατμοσφαιρική κυκλοφορία περιγράφει την κίνηση σε πλανητική κλίμακα του αέρα που μαζί με την αντίστοιχη κυκλοφορία του νερού των ωκεανών, αποτελούν τον βασικό τρόπο ανακατανομής της ηλιακής θερμικής ενέργειας στην επιφάνεια της Γης.

Οι κύριες δυνάμεις που προκαλούν την κίνηση του ανέμου, είναι η ασύμμετρη θέρμανση του πλανήτη ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή (που προκαλεί διαφορές στην θερμοκρασία και την πυκνότητα των αέριων μαζών) και η περιστροφική κίνηση της Γης (που προκαλεί τη δύναμη Κοριόλις και επηρεάζει την φορά των ανέμων). Η δύναμη

Κοριόλις είναι μια αδρανειακή ή πλασματική δύναμη που ενεργεί στα αντικείμενα που κινούνται σε ένα πλαίσιο αναφοράς.



Ιστορική αναδρομή

Ο Τζοβάνι Μπατίστα Ριτσιόλι (Giovanni Battista Riccioli) ήταν Ιταλός αστρονόμος, που ανήκε στο θρησκευτικό τάγμα των Ιησουιτών από το 1614. Το 1651 ενώ προσπαθούσε να αποδείξει ότι η Γη δεν κινείται με τον βοηθό του Francesco Maria Grimaldi, περιέγραψε αυτό που στη φυσική ονομάζεται δύναμη Coriolis – την αδρανειακή δύναμη που αλλάζει την τροχιά σωμάτων όταν αυτά κινούνται σε περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Ο Giovanni Riccioli δημοσίευσε 77 επιχειρήματα εναντίον της ιδέας ότι οι φαινομενικές κινήσεις των ουράνιων σωμάτων οφείλονταν και στην περιστροφή της Γης και στην τροχιά της γύρω από τον ήλιο. Ισχυρίστηκε ότι αν η Γη περιστρεφόταν, η ταχύτητα του εδάφους στα διάφορα γεωγραφικά πλάτη θα ήταν διαφορετική, οπότε οι βολές των κανονιών προς βορά ή προς νότο, κοντά στον ισημερινό, θα παρουσιάζουν απόκλιση ανατολική ή δυτική, αντίστοιχα, διότι το έδαφος μετακινείται κατά τη διάρκεια της βολής. Επειδή όμως δεν είχε παρατηρηθεί τέτοιο φαινόμενο κατέληξε, λανθασμένα, στο συμπέρασμα ότι η Γη είναι ακίνητη.

Ύστερα, το 1674 ο Claude François Milliet Dechaux, Γάλλος Ιησουίτης ιερέας και μαθηματικός, αναφέρεται στο φαινόμενο της δύναμης Coriolis ακολουθώντας το έργο του Giovanni Battista Riccioli.

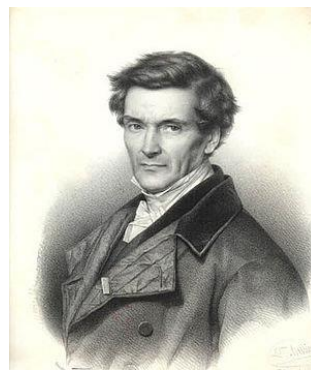
Ο Γκασπάρ-Γκυστάβ ντε Κοριόλις (Gaspard-Gustave de Coriolis) ήταν Γάλλος φυσικός, μαθηματικός και μηχανικός. Στα τέλη του 18ου αιώνα και στις αρχές του 19ου αιώνα, ο Gaspard-Gustave Coriolis ενδιαφερόταν να καταστήσει τη θεωρητική μηχανική εφαρμόσιμη

στην κατανόηση και την ανάπτυξη βιομηχανικών μηχανημάτων. Στο άρθρο του σχετικά με τις εξισώσεις της σχετικής κίνησης των συστημάτων σώματος (1835) ο Κοριόλης περιέγραψε μαθηματικά τη δύναμη που επρόκειτο να φέρει το όνομά του. Σε αυτό το άρθρο, η δύναμη του Coriolis εμφανίζεται ως ένα πρόσθετο συστατικό της φυγοκεντρικής δύναμης, αισθητή από ένα κινούμενο σώμα σε σχέση με ένα περιστρεφόμενο αποθετήριο, όπως θα μπορούσε να συμβεί για παράδειγμα στη λειτουργία μιας μηχανής.

Το όνομα του Κοριόλη άρχισε να εμφανίζεται στη μετεωρολογική βιβλιογραφία στα τέλη του 19ου αιώνα, αν και ο όρος «Coriolis force» δεν χρησιμοποιήθηκε μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα. Σήμερα, το όνομα Coriolis έχει συνδεθεί έντονα με τη μετεωρολογία, αλλά όλες οι σημαντικές ανακαλύψεις σχετικά με τη γενική κυκλοφορία και τη σχέση μεταξύ της πίεσης και των πεδίων του ανέμου έγιναν χωρίς γνώση για τον Gaspard Gustave Coriolis.



Giovanni Battista Riccioli



Gaspard-Gustave de Coriolis

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Ατμοσφαιρική κίνηση και δυναμική

Η κυκλοφορία του ανέμου στην ατμόσφαιρα καθοδηγείται από την περιστροφή της γης και την εισερχόμενη ενέργεια από τον ήλιο. Ο άνεμος κυκλοφορεί σε κάθε ημισφαίριο σε τρία ξεχωριστά κύτταρα που βοηθούν στη μεταφορά ενέργειας και θερμότητας από τον ισημερινό στους πόλους. Οι άνεμοι οδηγούνται από την ενέργεια του ήλιου στην επιφάνεια καθώς ο θερμός αέρας ανεβαίνει και ο κρύος αέρας βυθίζεται.

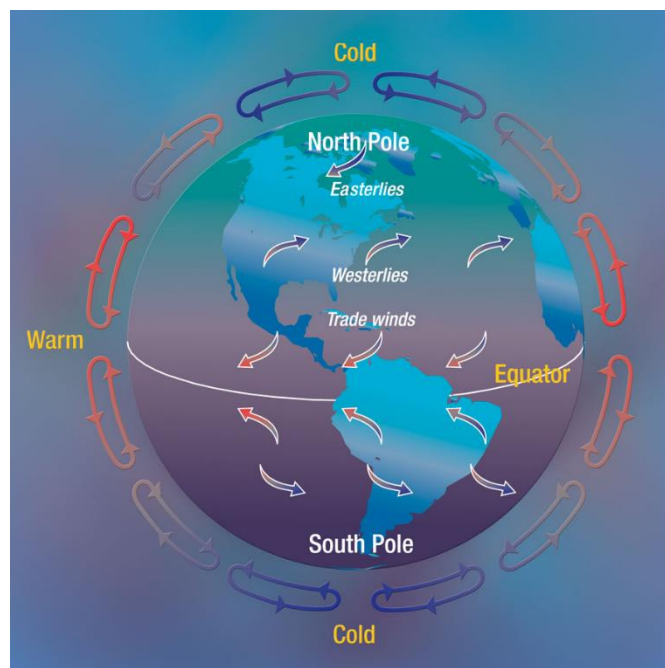
Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία είναι η μεγάλης κλίμακας κίνηση του αέρα και μαζί με την ωκεάνια κυκλοφορία είναι το μέσο με το οποίο η θερμική ενέργεια αναδιανέμεται στην επιφάνεια της Γης. Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία της Γης ποικίλλει από χρόνο σε χρόνο, αλλά η μεγάλης κλίμακας δομή της κυκλοφορίας της παραμένει αρκετά σταθερή.

Ακόμη και με διαταραχές όπως καιρικά φαινόμενα και καταιγίδες, υπάρχει ένα σταθερό μοτίβο για το πώς ο αέρας κινείται γύρω από την ατμόσφαιρα του πλανήτη μας. Αυτό το μοτίβο, που ονομάζεται ατμοσφαιρική κυκλοφορία, προκαλείται επειδή ο Ήλιος θερμαίνει

τη Γη περισσότερο στον ισημερινό παρά στους πόλους. Επίσης επηρεάζεται από την περιστροφή της Γης.

Στις τροπικές περιοχές, κοντά στον ισημερινό, αυξάνεται ο θερμός αέρας. Όταν φτάνει περίπου 10-15 χλμ. (6-9 μίλια) πάνω από την επιφάνεια της Γης, αρχίζει να ρέει μακριά από τον ισημερινό και προς τους πόλους. Ο αέρας που ανέβηκε βόρεια του ισημερινού ρέει βόρεια και αέρας που ανέβηκε νότια του ισημερινού ρέει νότια. Όταν ο αέρας ψύχεται, πέφτει πίσω στο έδαφος, ρέει πίσω προς τον Ισημερινό και θερμαίνεται ξανά. Ο θερμός αέρας τώρα ανεβαίνει ξανά και το μοτίβο επαναλαμβάνεται. Αυτό το μοτίβο, γνωστό ως μεταφορά, συμβαίνει σε παγκόσμια κλίμακα. Συμβαίνει επίσης και σε μικρή κλίμακα σε μεμονωμένες καταιγίδες.

Αλλά επειδή η Γη περιστρέφεται, ο αέρας που κινείται βόρεια και νότια από τον ισημερινό στρέφεται επίσης με την περιστροφή της Γης. Ο αέρας που πηγαίνει βόρεια στρίβει δεξιά ενώ ο αέρας που ταξιδεύει νότια στρίβει αριστερά. Η δύναμη της περιστροφής της Γης που μετατρέπει τον ρέοντα αέρα είναι γνωστή ως το Coriolis Effect. Εάν η Γη δεν περιστρεφόταν, θα υπήρχε μόνο ένα μεγάλο κελί μεταφοράς μεταξύ του ισημερινού και του Βόρειου Πόλου και ένα μεγάλο κελί μεταφοράς μεταξύ του ισημερινού και του Νότιου Πόλου. Αλλά επειδή η Γη περιστρέφεται, η μεταφορά χωρίζεται σε τρία κελιά βόρεια του ισημερινού και τρία νότια του ισημερινού.



Σχήμα 1. Ο αέρας στην ατμόσφαιρα κινείται σε όλο τον κόσμο σε ένα μοτίβο που ονομάζεται παγκόσμια ατμοσφαιρική κυκλοφορία.

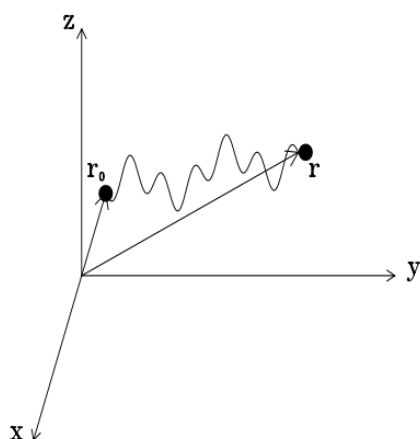
Μαθηματική περιγραφή της ατμοσφαιρικής κίνησης

Είναι δυνατό να γίνει η περιγραφή της κίνησης του αέρα (όπως και οποιουδήποτε άλλου ρευστού) μέσω δύο ισοδύναμων τρόπων. Ο ένας είναι γνωστός ως περιγραφή κατά Lagrange και ο άλλος ως περιγραφή κατά Euler.

Στην περιγραφή κατά Lagrange ακολουθείται η κίνηση κάθε στοιχείου αέρα, dt , προσδιορίζοντας τη θέση του σαν συνάρτηση του χρόνου (Σχήμα 1). Η κίνηση στην περίπτωση αυτή περιγράφεται μέσω των συναρτήσεων $x(x_0, y_0, z_0, t)$, $y(x_0, y_0, z_0, t)$ και $z(x_0, y_0, z_0, t)$ που καθορίζουν τη θέση x, y, z τη χρονική στιγμή t , του στοιχείου του οποίου η θέση τη χρονική στιγμή t_0 ήταν x_0, y_0, z_0 . Στην περιγραφή κατά Lagrange κάθε στοιχείο ατμοσφαιρικού αέρα υπακούει το 2^ο νόμο του Newton.

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = \frac{d}{dt}\left(m \frac{d\mathbf{r}}{dt}\right) = \mathbf{F}$$

Αν ήταν γνωστή η δύναμη $\mathbf{F}$ τότε η παραπάνω εξίσωση είναι μία διαφορική εξίσωση, η λύση της οποίας θα δώσει την παραμετρική τροχιά του στοιχείου $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t_0, t)$ σαν συνάρτηση του χρόνου και της αρχικής θέσης $\mathbf{r}_0$, που παίζει ρόλο ταυτότητας για το συγκεκριμένο στοιχείο.



Σχήμα 2. Κίνηση ενός μικρού στοιχείου αέρα στο χώρο. $\mathbf{r}$ είναι το διάνυσμα θέσης τη χρονική στιγμή t . Η ταχύτητα στην περίπτωση αυτή είναι $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{r}_0, t)$.

Στην περιγραφή κατά Euler μελετήθηκε η κατάσταση του ρευστού σε διάφορες θέσεις στο χώρο συναρτήσει του χρόνου. Δηλαδή καθορίζονται οι διάφορες φυσικές ποσότητες που καθορίζουν την κατάσταση του ρευστού σαν συναρτήσεις της θέσης στο χώρο $\mathbf{r}$ και του χρόνου t . Κάθε φυσική ποσότητα q που μπορεί να περιγράψει την κατάσταση του μέσου (π.χ. πίεση, θερμοκρασία, ταχύτητα) εκφράζεται σαν συνάρτηση των συντεταγμένων του χώρου και του χρόνου, $q = q(x, y, z, t) = q(\mathbf{r}, t)$. Με τον τρόπο αυτό επικεντρώνεται η προσοχή στο τι ακριβώς συμβαίνει σ' ένα ορισμένο στοιχείο στο χώρο κάθε χρονική στιγμή αντί να ακολουθείται η κίνηση ενός στοιχείου αέρα στο χώρο κάθε χρονική στιγμή.

Στη μελέτη κινήσεων του ατμοσφαιρικού αέρα χρησιμοποιείται η μέθοδος Euler, γιατί η μαθηματική ανάλυση είναι ευκολότερη. Στην περιγραφή κατά Euler το πρόβλημα περιορίζεται στη λύση ενός συστήματος μερικών διαφορικών εξισώσεων στις οποίες οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι x, y, z, t . Στη μέθοδο Lagrange είναι αναγκαίο να ακολουθήσουμε τη χρονική εξέλιξη των διαφόρων ποσοτήτων για διάφορες μάζες (στοιχεία) αέρα. Η ανάλυση στη περίπτωση αυτή είναι πιο πολύπλοκη.

Αν τώρα υπάρχει μία φυσική παράμετρος χαρακτηριστική της κατάστασης του αέρα, π.χ. της θερμοκρασίας T , τότε στην περιγραφή κατά Euler υπάρχει, $T = T(r, t) = T(x, y, z, t)$ όπου x, y, z, t είναι ανεξάρτητες μεταβλητές. Το ολικό διαφορικό είναι,

$$dT = \frac{\partial T}{\partial t} dt + \frac{\partial T}{\partial x} dx + \frac{\partial T}{\partial y} dy + \frac{\partial T}{\partial z} dz$$

Η παραπάνω σχέση γράφεται

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

Αλλά, εξ ορισμού,

$$\frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = v, \quad \frac{dz}{dt} = w$$

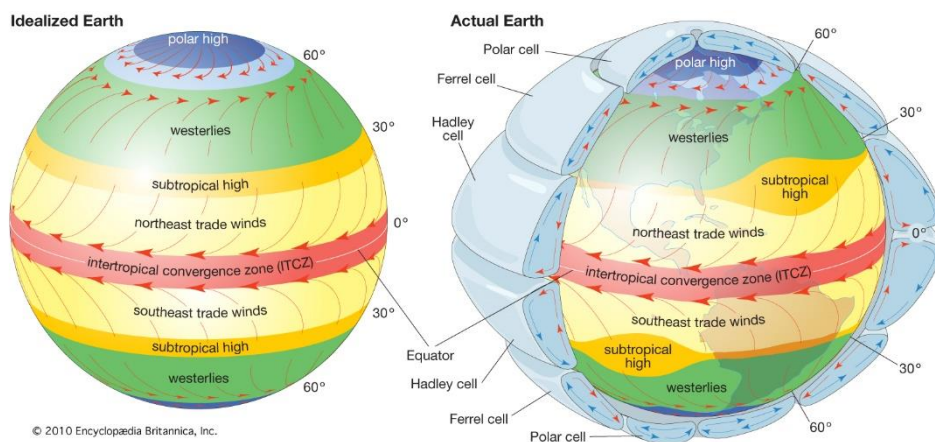
είναι συνιστώσες της ταχύτητας,

$$V = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \hat{\mathbf{x}}u + \hat{\mathbf{y}}v + \hat{\mathbf{z}}w$$

Τελικά προκύπτει

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \\ &= \frac{\partial T}{\partial t} + (\hat{\mathbf{x}}u + \hat{\mathbf{y}}v + \hat{\mathbf{z}}w) \cdot \left(\hat{\mathbf{x}} \frac{\partial T}{\partial x} + \hat{\mathbf{y}} \frac{\partial T}{\partial y} + \hat{\mathbf{z}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ \frac{dT}{dt} &= \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \equiv \frac{DT}{Dt} \end{aligned}$$

όπου $\frac{DX}{Dt} \equiv \frac{\partial X}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla X$ είναι η ολική παράγωγος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής της φυσικής ποσότητας X ($X = p, T$) κατά την κίνηση μιας μάζας, στην περιγραφή κατά Euler. Ο πρώτος όρος $\frac{\partial X}{\partial t}$ αναπαριστά το ρυθμό μεταβολής του X στο σημείο $\mathbf{r}$ και ονομάζεται τοπική παράγωγος. Ο όρος $\mathbf{v} \cdot \nabla X$ αντιπροσωπεύει τη μεταβολή του X λόγω της κίνησης του και ονομάζεται παράγωγος μεταφοράς (convective derivative). Παραδείγματος χάριν, ο όρος $\mathbf{v} \cdot \nabla T$ στην παραπάνω εξίσωση δίνει το ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας λόγω μεταφοράς (convection) θερμότητας μέσω της κίνησης της αέριας μάζας με ταχύτητα $\mathbf{v}$ στο χώρο όπου υπάρχει μια βαθμίδα στη θερμοκρασία ∇T .



Σχήμα 3. Γενικά μοτίβα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας πάνω από μια εξιδανικευμένη Γη με ομοιόμορφη επιφάνεια (αριστερά) και την πραγματική Γη (δεξιά). Τόσο τα οριζόντια όσο και τα κατακόρυφα σχήματα της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας απεικονίζονται στο διάγραμμα της πραγματικής Γης.

Η ατμοσφαιρική δυναμική ασχολείται με τη μελέτη των κινήσεων του ατμοσφαιρικού αέρα. Οι ατμοσφαιρικές κινήσεις υπακούν στους βασικούς νόμους της μηχανικής, δηλαδή τους νόμους διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Για να κατανοήσουμε τη πολυπλοκότητα των ατμοσφαιρικών κινήσεων πρέπει να καταλάβουμε τη φύση των δυνάμεων που τις προκαλούν. Ο 2ος νόμος του Newton δέχεται ότι, σ' ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ενός σώματος ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων που ενεργούν σ' αυτό. Για τις ατμοσφαιρικές κινήσεις μετεωρολογικού ενδιαφέροντος, οι δυνάμεις που ενεργούν στην ατμόσφαιρα είναι η δύναμη βαρύτητας, η δύναμη τριβής και η δύναμη βαροβαθμίδας η οποία οφείλεται στις μεταβολές της πίεσης στο χώρο. Όμως, επειδή στη μελέτη των ατμοσφαιρικών κινήσεων δεν χρησιμοποιούμε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς αλλά ένα σύστημα που συμπεριστρέφεται με τη γη, στην εξίσωση κίνησης συμπεριλαμβάνονται και «φαινομενικές» δυνάμεις που οφείλονται στην περιστροφή της γης. Τέτοιες δυνάμεις είναι η φυγόκεντρος δύναμη και η δύναμη coriolis. Όταν συμπεριλάβουμε και τις δυνάμεις αυτές τότε μπορούμε να εφαρμόσουμε το 2ο νόμο του Newton όπως και σε ένα αδρανειακό (μη επιταχυνόμενο) σύστημα αναφοράς.

Οι δυνάμεις που καθορίζουν την κίνηση μίας αέριας μάζας στην ατμόσφαιρα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: δυνάμεις όγκου και δυνάμεις επιφάνειας. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις δυνάμεις που ενεργούν σε μία αέρια μάζα (ή όγκο) ανεξάρτητα από την ύπαρξη άλλων αερίων μαζών σε γειτνίαση με τη μάζα. Στις δυνάμεις αυτές περιλαμβάνονται η δύναμή της βαρύτητας και οι δυνάμεις αδράνειας (στην προκείμενη περίπτωση, η δύναμή coriolis και η φυγόκεντρος). Οι δυνάμεις επιφάνειας οφείλονται στην αλληλεπίδραση μίας ορισμένης αέριας μάζας με το περιβάλλον της και ενεργούν στην επιφάνεια που περιβάλλει την εν λόγω αέρια μάζα. Σ' αυτές τις δυνάμεις ανήκουν η δύναμη

βαροβαθμίδας και οι δυνάμεις τριβής. Θα εξετάσουμε σύντομά τη φύση των ατμοσφαιρικών δυνάμεων.

Δύναμη Βαρύτητας

βαρύτητα ονομάζεται η ιδιότητα των υλικών σωμάτων να έλκουν και να έλκονται αμοιβαία με άλλα υλικά σώματα. Τα ελκόμενα σώματα κινούνται με επιταχυνόμενη κίνηση προς το έλκον σώμα. Οι έλξεις είναι αμοιβαίες.

Ο νόμος του Νεύτωνα για τη βαρύτητα διατυπώνεται ως εξής:

«Κάθε σώμα στο σύμπαν έλκει κάθε άλλο σώμα με δύναμη ανάλογη του γινομένου των μαζών τους και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης του κέντρου μάζας τους».

Ο νόμος αυτός εκφράζεται ως:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Όπου:

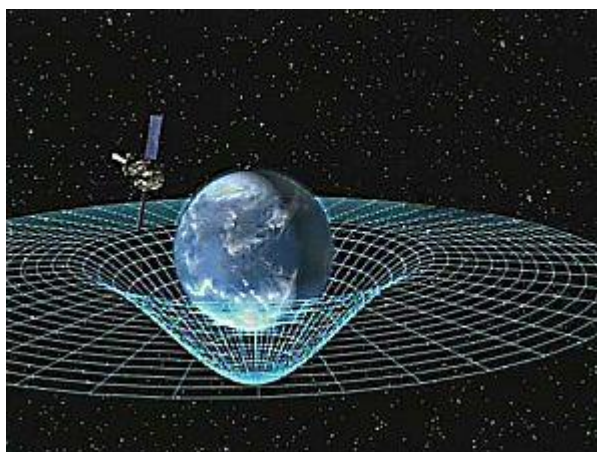
F: το μέτρο της βαρυτικής δύναμης

G: η παγκόσμια βαρυτική σταθερά.

m_1, m_2 : οι μάζες των σωμάτων.

r: η απόσταση των κέντρων μάζας των σωμάτων.

Γενικά, για ένα παρατηρητή στην επιφάνεια της γης, ένα σώμα που ηρεμεί υφίσταται εκτός από τη δύναμη της βαρύτητας και μία φυγόκεντρο δύναμη.

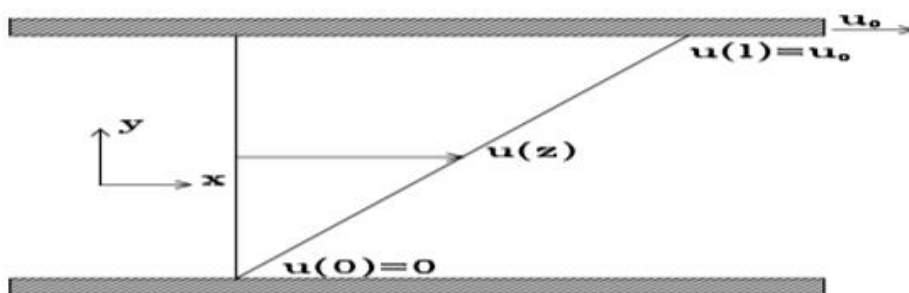


Σχήμα 4. Η δισδιάστατη αναλογία παραμόρφωσης χωροχρόνου που δημιουργείται από τη μάζα ενός αντικειμένου.

Δύναμη Τριβής

Όταν μία αέρια μάζα κινείται ως προς το περιβάλλον της, λόγω της θερμικής κίνησης των μορίων, υπάρχει μια συνεχής ανταλλαγή μορίων, και συνεπώς ορμής, μεταξύ της εν λόγω μάζας και του περιβάλλοντός της. Η δύναμη τριβής είναι το μακροσκοπικό αποτέλεσμα αυτής της ανταλλαγής ορμής στο μοριακό επίπεδο. Προκύπτει ότι σ' όλη την ατμόσφαιρα οι δυνάμεις τριβής είναι σχετικά μικρές και σε πρώτη προσέγγιση μπορεί να αγνοηθούν, εκτός από ένα στρώμα πάχους ~ 1 km αμέσως πάνω από την επιφάνεια της γης, το οποίο ονομάζεται πλανητικό οριακό στρώμα. Στο στρώμα αυτό η ροή του αέρα πάνω από την (σχετικά) ακίνητη και ακανόνιστη επιφάνεια του πλανήτη οδηγεί στην ανάπτυξη μιας ανασχετικής δύναμης τριβής, της οποίας το μέγεθος είναι συγκρίσιμο με τις άλλες δυνάμεις που υπεισέρχονται στην εξίσωση κίνησης του ατμοσφαιρικού αέρα.

Παρόλο που μία αυστηρή ανάλυση της φύσεως της δύναμης της τριβής είναι δύσκολη, η βασική φυσική ιδέα μπορεί να δοθεί αρκετά απλά. Έστω ένα στρώμα ασυμπίεστου ρευστού που περιορίζεται μεταξύ δύο οριζοντίων πλακών, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η κάτω πλάκα (που μπορεί να σχετιστεί με το έδαφος) παραμένει σταθερή ενώ η άνω κινείται προς την κατεύθυνση x με σταθερή ταχύτητα U_0 (π.χ. αντιστοιχεί σ' ένα στρώμα αέρα που κινείται οριζόντια). Τα μόρια του ρευστού σε επαφή με την κινούμενη πλάκα, θα κινούνται με την ταχύτητα της πλάκας. Δηλαδή στο ύψος $z=l$ το ρευστό κινείται με ταχύτητα $U(l) = U_0$, ενώ στο ύψος $z=0$, $U(0)=0$.



Σχήμα 5. Η μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος δημιουργεί μία διατμητική-τάση (shearing stress).

Προκύπτει ότι η δύναμη που ενεργεί στην πάνω πλάκα, και που χρειάζεται να διατηρήσει την ομαλή κίνησή της, εξουδετερώνοντας τη δύναμη τριβής, είναι ανάλογη της επιφάνειας της πλάκας A , της ταχύτητας U_0 και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης l που διαχωρίζει τις πλάκες. $F = \eta A U_0 / l$ όπου η είναι ο συντελεστής ιξώδους του ρευστού, ο οποίος εξαρτάται από τη φύση του ρευστού και τις ενδομοριακές δυνάμεις. Η δύναμη αυτή ασκείται από την

κινούμενη πλάκα στο στρώμα του ρευστού που βρίσκεται σ' επαφή μ' αυτή. Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών τείνει στο μηδέν, ορίζεται η δύναμη τριβής ανά μονάδα επιφάνειας μέσω της σχέσης:

$$\tau_{zx} = \eta \frac{\partial u}{\partial z}$$

όπου με τ_{zx} συμβολίζεται η διατμητική τάση στην κατεύθυνση x λόγω της μεταβολής της ταχύτητας στην κατεύθυνση z. Αυτή η δύναμη οφείλεται στη μεταφορά ορμής, λόγω της θερμικής κίνησης των μορίων από τα ανώτερα προς τα κατώτερα στρώματα. Επειδή η ταχύτητα αυξάνεται με το ύψος, τα μόρια, σε ένα ορισμένο επίπεδο, που περνούν προς τα κάτω σε μία χρονική στιγμή μεταφέρουν περισσότερη ορμή απ' αυτά που περνούν προς τα πάνω από το ίδιο επίπεδο. Το αποτέλεσμα είναι μία καθαρή μεταφορά ορμής προς τα κάτω. Αυτή η μεταφορά ορμής ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα χρόνου είναι η διατμητική τάση. Επειδή η μεταβολή της ορμής οφείλεται στη διαφορά των συνιστωσών των μοριακών ταχυτήτων κατά μήκος της διεύθυνσης x, η διατμητική τάση κατευθύνεται προς την ίδια διεύθυνση και είναι αντίθετη της κίνησης.

Δύναμη Βαροβαθμίδας

Από τη στατιστική φυσική γνωρίζουμε ότι η πίεση στην επιφάνεια μιας στοιχειώδους αέριας μάζας είναι η κάθετη συνιστώσα των δυνάμεων που προέρχεται από κρούσεις των μορίων του περιβάλλοντος αέρα ανά μονάδα επιφάνειας. Η δύναμη αυτή κατευθύνεται πάντα προς το εσωτερικό της αέριας μάζας και, για χωρικά ομοιόμορφες πιέσεις, έχει συνισταμένη ίση με μηδέν. Η αέρια μάζα δέχεται δύναμη διαφορετική του μηδενός, μόνο όταν η πίεση μεταβάλλεται στο χώρο. Η δύναμη που οφείλεται στη μεταβολή της πίεσης στο χώρο ονομάζεται δύναμη βαροβαθμίδας.

Έστω ένας στοιχειώδης όγκος αέρα, $\delta v = \delta x \delta y \delta z$, του οποίου το κέντρο βρίσκεται στο σημείο x_0, y_0, z_0 , (Σχήμα 3). Αν η πίεση στο κέντρο του στοιχειώδους όγκου είναι p_0 , τότε, χρησιμοποιώντας ανάπτυξη Taylor, η πίεση στην πλευρά A του στοιχειώδους όγκου είναι

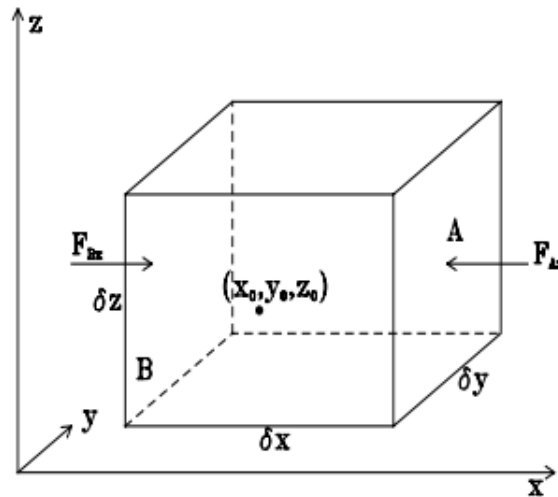
$$p_0 + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2} + O^2 + \dots$$

Από την παραπάνω εξίσωση, αγνοώντας όρους μεγαλύτερης τάξης, προκύπτει ότι η δύναμη που εξασκείται στην επιφάνεια A είναι,

$$F_{Ax} = -(p_0 + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2}) \delta y \delta z$$

όπου $\delta y \delta z$ είναι το εμβαδόν της επιφάνειας A. Ομοίως, η δύναμη στην πλευρά B είναι

$$F_{Bx} = (p_0 - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2}) \delta y \delta z.$$



Σχήμα 6. Δύναμη λόγω διαφοράς πίεσεως σε δύο αντίθετες πλευρές ενός στοιχειώδους όγκου ατμοσφαιρικού αέρα.

Κατά συνέπεια η ολική δύναμη που ενεργεί στον όγκο κατά τη διεύθυνση x είναι

$$F_x = F_{Ax} + F_{Bx} = -\frac{\partial p}{\partial x} \delta x \delta y \delta z$$

Η μάζα του στοιχειώδους όγκου είναι $m = \rho \delta v = \rho \delta x \delta y \delta z$, όπου ρ είναι η πυκνότητα. Συνεπώς, η δύναμη ανά μονάδα μάζας, λόγω της διαφοράς πίεσης στη διεύθυνση x, είναι

$$\frac{F_x}{m} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

Κατά τον ίδιο τρόπο μπορεί να δειχτεί ότι

$$\frac{F_y}{m} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad \frac{F_z}{m} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}.$$

Τελικά, η ολική δύναμή βαροβαθμίδας ανά μονάδα μάζας είναι

$$\frac{\mathbf{F}_p}{m} = \hat{\mathbf{x}} \frac{F_x}{m} + \hat{\mathbf{y}} \frac{F_y}{m} + \hat{\mathbf{z}} \frac{F_z}{m} = -\frac{1}{\rho} \left(\hat{\mathbf{x}} \frac{\partial p}{\partial x} + \hat{\mathbf{y}} \frac{\partial p}{\partial y} + \hat{\mathbf{z}} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = -\frac{\nabla p}{\rho}.$$

Η οριζόντια συνιστώσα

$$\frac{\mathbf{F}_h}{m} = \hat{\mathbf{x}} \frac{F_x}{m} + \hat{\mathbf{y}} \frac{F_y}{m} = -\frac{1}{\rho} \left(\hat{\mathbf{x}} \frac{\partial p}{\partial x} + \hat{\mathbf{y}} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = -\frac{\nabla_h p}{\rho}$$

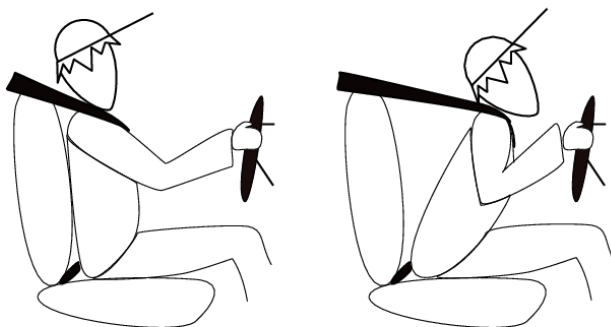
είναι αυτή που ενδιαφέρει στην ατμοσφαιρική δυναμική γιατί αντιπροσωπεύει την αιτία για τις οριζόντιες κινήσεις του αέρα. Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι δύναμη βαροβαθμίδας κατευθύνεται από περιοχές υψηλών σε περιοχές χαμηλών πιέσεων. Η δύναμη βαρύτητας και η δύναμη βαροβαθμίδας είναι οι μόνες δύο δυνάμεις που μπορούν να βάλουν μία αέρια μάζα σε κίνηση.

Αδράνεια

Για να εφαρμοστούν οι νόμοι της κλασικής μηχανικής σε σύστημα αναφοράς που κινείται ευθύγραμμα με σταθερή επιτάχυνση a , πρέπει να γίνει δεκτό ότι σε κάθε μάζα m του συστήματος επιδρά μια δύναμη:

$$F = -ma$$

που ονομάζεται δύναμη αδράνειας. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο αδράνεια ονομάζεται η χαρακτηριστική ιδιότητα των σωμάτων να αντιστέκονται στην οποιαδήποτε μεταβολή της κινητικής τους κατάστασης. Το ίδιο γίνεται και όταν το σύστημα αναφοράς περιστρέφεται. Στην περίπτωση αυτή διακρίνουμε δυο δυνάμεις αδρανείας, την φυγόκεντρη δύναμη και τη δύναμη Coriolis.



Σχήμα 7. Newton's First Law in Action: Seat Belts.

Φυγόκεντρος Δύναμη

Η φυγόκεντρος δύναμη είναι φαινόμενη (ψευδής) δύναμη που φαινομενικά εμφανίζεται να ασκείται σε ένα σώμα το οποίο εκτελεί κυκλική κίνηση όταν ο παρατηρητής είναι στο περιστρεφόμενο μη αδρανειακό σύστημα. Η φυγόκεντρος είναι ίση σε μέτρο και αντίθετη προς της κεντρομόλο η οποία στην πραγματικότητα είναι η μόνη που ασκείται στο περιστρεφόμενο σώμα.

Κάθε σώμα που κινείται σε μη επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς διατηρεί την ταχύτητα που έχει κάθε στιγμή.

$$F = m\omega^2 r$$

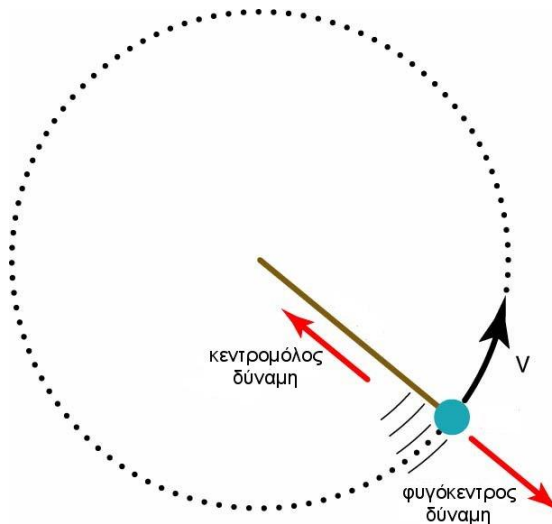
Όπου:

F: φυγόκεντρος δύναμη

m: μάζα σώματος.

ω : γωνιακή ταχύτητα.

r: η απόσταση των κέντρων μάζας των σωμάτων.



Σχήμα 8. Φυγόκεντρος δύναμη.

Δύναμη Coriolis

Η δύναμη Κοριόλις (Coriolis force) είναι φαινόμενη δύναμη η οποία εμφανίζεται σε μη αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα σε ένα σύστημα αναφοράς του οποίου οι άξονες περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα $\vec{\omega}$ γράφεται για σταθερή μάζα :

$$m \left(\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_R = m \left(\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_I - 2m \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$$

Ο δείκτης I υποδηλώνει το αδρανειακό σύστημα αναφοράς (άρα $m \left(\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_I$

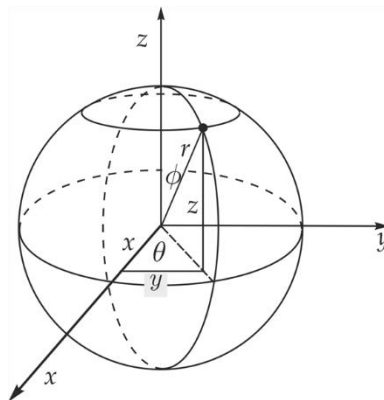
είναι η πραγματική δύναμη η οποία δέχεται το σώμα) και ο δείκτης R υποδηλώνει το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Ως εκ τούτου $\times \frac{d\vec{r}}{dt}$, η επιτάχυνση του σώματος στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς είναι αποτέλεσμα της συνισταμένης της πραγματικής δύναμης που του ασκείται και δύο επιπλέον "φανταστικών" δυνάμεων, οι οποίες δεν έχουν κάποιο φυσικό αίτιο και δεν εμφανίζονται στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Ο όρος $-2m \vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt}$ αποτελεί τη δύναμη Coriolis, η οποία είναι πάντα κάθετη στην ταχύτητα του σώματος.

Είναι γνωστό απ' τη μηχανική, ότι η δύναμη Coriolis εμφανίζεται όταν η κίνηση εξετάζεται σ' ένα σύστημα αναφοράς που περιστρέφεται και εφόσον το σώμα κινείται στο σύστημα αυτό με ταχύτητα V . Η δύναμη αυτή, για ένα παρατηρητή πάνω στη γη, είναι αποτρεπτική γιατί ενεργεί κάθετα στην ταχύτητα V και δίνεται από τη σχέση :

$$C = -2m\Omega V$$

όπου Ω είναι η γωνιακή ταχύτητα της γης με μέτρο ίσο με την γωνιακή συχνότητα περιστροφής και διεύθυνση κατά μήκος του άξονα περιστροφής.

Ανάλυση της δύναμης Coriolis



Σχήμα 9.

Για την ανάλυση της δύναμης Coriolis θεωρούμε ένα σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων σ' ένα ορισμένο τόπο στην επιφάνεια της γης σε γεωγραφικό πλάτος ϕ . Η ταχύτητα V μιας αέριας μάζας, στο παραπάνω σύστημα, εκφράζεται ως

$V = \hat{x}u + \hat{y}v + \hat{z}w$ όπου u, v, w συμβολίζουν τις συνιστώσες της ταχύτητας κατά μήκος των αξόνων x, y, z , αντίστοιχα και $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ είναι τα αντίστοιχα μοναδιαία διανύσματα.

Το διάνυσμα Ω βρίσκεται στο yz επίπεδο και σχηματίζει γωνία ϕ με τον άξονα y , οπότε

$$\Omega = \Omega(\hat{y}\cos\phi + \hat{z}\sin\phi)$$

Οι συνιστώσες της δύναμης Coriolis βρίσκονται από τη σχέση

$$2\vec{\Omega} \times \vec{V} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ 0 & 2\Omega\cos\phi & 2\Omega\sin\phi \\ u & v & w \end{vmatrix} = 2\Omega\{\hat{x}(w\cos\phi - v\sin\phi) + \hat{y}u\sin\phi - \hat{z}u\cos\phi\}$$

ή πιο αναλυτικά οι συνιστώσες είναι

$$C_x = 2\Omega(v \sin \varphi - w \cos \varphi)$$

$$C_y = -2\Omega u \sin \varphi$$

$$C_z = 2\Omega u \cos \varphi$$

Η κατακόρυφος συνιστώσα C_z εξαρτάται μόνο από την οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας u που ανάλογα με την κατεύθυνσή της ενεργεί στην ίδια κατεύθυνση με τη δύναμη βαρύτητας. Αν συγκρίνουμε τις τιμές που παίρνει η C_z με τη δύναμη βαρύτητας ανά μονάδα μάζας, g , βρίσκουμε ότι $C_z \ll g$. Αυτό σημαίνει ότι η συνιστώσα C_z μπορεί να παραληφθεί από τους υπολογισμούς ατμοσφαιρικών κινήσεων. Επειδή στην ατμόσφαιρα οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας (u και v) είναι αρκετές φορές μεγαλύτερες της κατακόρυφης συνιστώσας w , ο όρος $2\Omega w \cos \varphi$ στην πρώτη μπορεί να παραληφθεί σε σύγκριση με τον όρο $2\Omega v \sin \varphi$. Έτσι η συνεισφορά της δύναμης Coriolis κατ' ουσία περιορίζεται στις οριζόντιες συνιστώσες.

$$C_x = 2\Omega v \sin \varphi$$

$$C_y = -2\Omega u \sin \varphi$$

Το μέγεθος της οριζόντιας συνιστώσας της δύναμής Coriolis είναι:

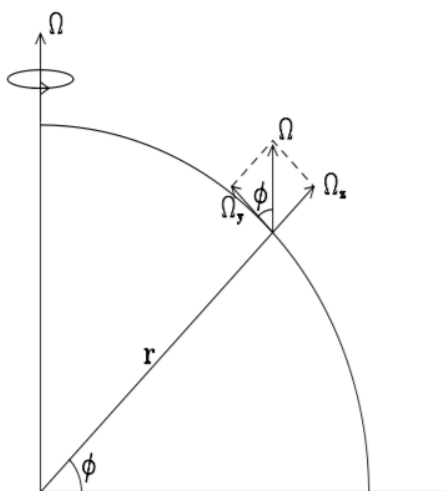
$$C_h = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} = 2\Omega \sqrt{v^2 + u^2} \sin \varphi = 2\Omega V_h \sin \varphi$$

όπου V_h είναι η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας V (στο xy επίπεδο).

Επειδή η δύναμη Coriolis εμφανίζεται πολύ συχνά στις εξισώσεις οριζόντιας κίνησης, ο παράγοντας $2\Omega \sin \varphi$ συμβολίζεται με f και ονομάζεται παράμετρος Coriolis. Εξ ορισμού το f είναι θετικό στο βόρειο ημισφαίριο και αρνητικό στο νότιο. Σε διανυσματική μορφή, η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης Coriolis δίνεται από τη σχέση :

$$C_h = -f \hat{z} \times V_h$$

όπου $\hat{z}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κατά μήκος της κατακόρυφου (θετικό προς τα πάνω). Ο παραπάνω τύπος δείχνει ότι η δύναμη Coriolis βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο, είναι κάθετη στο διάνυσμα ταχύτητας V_h και ότι κατευθύνεται προς τα δεξιά του V_h στο βόρειο ημισφαίριο (όπου $f > 0$) και προς τα αριστερά του V_h στο νότιο ημισφαίριο (όπου $f < 0$).



Σχήμα 10. Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων στην επιφάνεια της γης γεωγραφικού πλάτους ϕ .

Φαινόμενο Κοριόλις (Coriolis Effect)

Το φαινόμενο Coriolis είναι ένα φαινόμενο, μια ψευδαίσθηση που παράγεται από ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Αυτός ο τύπος επίδρασης είναι επίσης γνωστός ως μια πλασματική ή μια αδρανειακή δύναμη. Το φαινόμενο Coriolis παρουσιάζεται όταν ένα αντικείμενο που κινείται κατά μήκος μιας ευθείας διαδρομής προβάλλεται από ένα μη σταθερό πλαίσιο αναφοράς. Συνήθως, αυτό το κινούμενο πλαίσιο αναφοράς είναι η Γη, η οποία περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Όταν προβάλλεται ένα αντικείμενο στον αέρα που ακολουθεί μια ευθεία διαδρομή, το αντικείμενο θα φαίνεται να χάνει την πορεία του λόγω της περιστροφής της Γης. Το αντικείμενο δεν κινείται πραγματικά από την πορεία του αλλά το κάνει μόνο επειδή η Γη γυρίζει από κάτω του.

Αιτίες του φαινομένου Coriolis

Η κύρια αιτία του φαινομένου Coriolis είναι η περιστροφή της Γης. Καθώς η Γη περιστρέφεται αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού στον άξονά της, οτιδήποτε πετάει ή ρέει σε μεγάλη απόσταση πάνω από την επιφάνειά της εκτρέπεται. Αυτό συμβαίνει επειδή η Γη κινείται ανατολικά κάτω από το αντικείμενο με μεγαλύτερη ταχύτητα.

Καθώς το γεωγραφικό πλάτος αυξάνεται και η ταχύτητα της περιστροφής της Γης μειώνεται, το φαινόμενο Coriolis αυξάνεται.

Ο σχηματισμός των τυφώνων οφείλεται στην παραλλαγή του γεωγραφικού πλάτους σε εκτροπή. Αυτές οι καταιγίδες δεν σχηματίζονται εντός πέντε βαθμών από τον ισημερινό, επειδή δεν υπάρχει αρκετή περιστροφή Coriolis. Η μετακίνηση πιο βόρεια και οι τροπικές καταιγίδες μπορούν να ξεκινήσουν να περιστρέφονται με αποτέλεσμα να ενισχυθεί ο σχηματισμός των τυφώνων.

Εκτός από την ταχύτητα της περιστροφής και του γεωγραφικού πλάτους της Γης, όσο πιο γρήγορα κινείται το ίδιο το αντικείμενο, τόσο περισσότερη εκτροπή θα υπάρξει.

Η κατεύθυνση της εκτροπής από το φαινόμενο Coriolis εξαρτάται από τη θέση του αντικειμένου στη Γη. Στο Βόρειο Ημισφαίριο, τα αντικείμενα εκτρέπονται προς τα δεξιά, ενώ στο Νότιο Ημισφαίριο εκτρέπονται προς τα αριστερά.

Αποτελέσματα του φαινομένου Coriolis

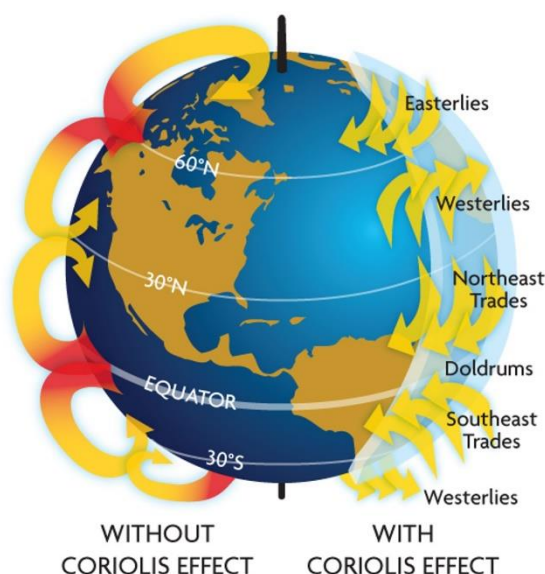
Μερικές από τις σημαντικότερες επιπτώσεις της επίδρασης Coriolis από την άποψη της γεωγραφίας είναι η εκτροπή των ανέμων και των ρευμάτων στον ωκεανό. Υπάρχει επίσης σημαντική επίδραση σε τεχνητά αντικείμενα, όπως αεροπλάνα και πυραύλους.

Όσον αφορά την επίδραση του ανέμου, καθώς ο αέρας ανεβαίνει από την επιφάνεια της Γης, η ταχύτητά του πάνω από αυτή αυξάνεται επειδή υπάρχει λιγότερη έλξη, καθώς ο αέρας δεν χρειάζεται πλέον να κινείται πέρα από τους διάφορους τύπους γεωμορφών της Γης. Επειδή το φαινόμενο Coriolis αυξάνεται με την αυξανόμενη ταχύτητα ενός αντικειμένου, εκτρέπει σημαντικά τις ροές αέρα.

Στο Βόρειο Ημισφαίριο αυτοί οι άνεμοι περιστρέφονται προς τα δεξιά ενώ στο Νότιο Ημισφαίριο προς τα αριστερά. Αυτό δημιουργεί συνήθως τους δυτικούς ανέμους που κινούνται από τις υποτροπικές περιοχές στους πόλους.

Επειδή τα ρεύματα οδηγούνται από την κίνηση του ανέμου στα νερά του ωκεανού, το φαινόμενο Coriolis επηρεάζει επίσης την κίνηση των ρευμάτων του ωκεανού. Πολλά από τα μεγαλύτερα ρεύματα του ωκεανού κυκλοφορούν γύρω από ζεστές περιοχές υψηλής πίεσης που ονομάζονται γύρες. Το φαινόμενο Coriolis δημιουργεί το σπειροειδές μοτίβο σε αυτές τις γύρες.

Τέλος, το φαινόμενο Coriolis είναι σημαντικό και για τα τεχνητά αντικείμενα, ειδικά όταν ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις πάνω από τη Γη.



Πρακτικές Εφαρμογές

Ο καιρός που επηρεάζει τα ταχέως κινούμενα αντικείμενα, όπως αεροπλάνα και πυραύλους, επηρεάζεται από το φαινόμενο Coriolis. Οι κατευθύνσεις των επικρατούντων ανέμων καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το φαινόμενο Coriolis, και έτσι οι πιλότοι πρέπει να το λαμβάνουν αυτό υπόψη κατά τη χαρτογράφηση των διαδρομών πτήσης σε μεγάλες αποστάσεις.

Η δύναμη Coriolis στα τρένα και στις περιστρεφόμενες πλατφόρμες

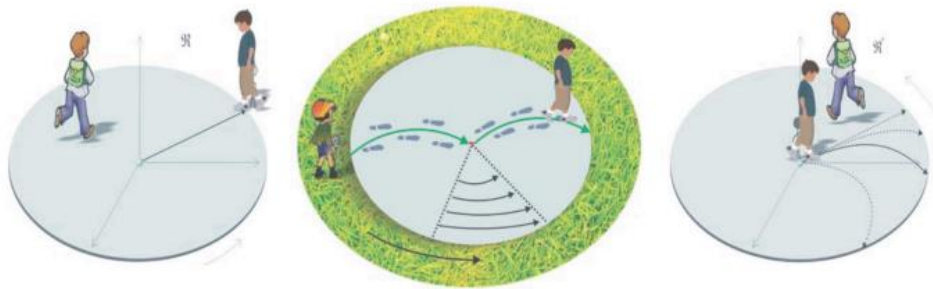
Εύκολα παρατηρήσιμες είναι οι επιπτώσεις των αδρανειακών δυνάμεων αν ένας επιβάτης βαδίζει στο εσωτερικό ενός τρένου που βρίσκεται σε κίνηση. Όταν το τρένο κινείται ομαλά σε ευθύγραμμη πορεία τότε ισχύουν σε αυτό οι νόμοι του Νεύτωνα. Αν ξαφνικά επιβραδυνθεί ή επιταχυνθεί, στην ευθύγραμμη πορεία του, εμφανίζεται η αδρανειακή δύναμη D'Alembert και οι επιβάτες την νοιώθουν να τους σπρώχνει αντίστοιχα προς τα εμπρός ή προς τα πίσω. Όταν το τρένο φτάσει σε στροφή, όπου καμπυλώνει η σιδηροδρομική γραμμή, τότε κάνει την εμφάνιση της η φυγόκεντρη αδρανειακή δύναμη με ένταση ανάλογη προς τη γωνιακή ταχύτητα του τρένου. Αν κατά τη στροφή μεταβληθεί η γωνιακή ταχύτητα τότε θα εμφανιζόταν και η αδρανειακή δύναμη Euler. *Αν κατά τη στροφή ένας επιβάτης επιχειρούσε να περπατήσει γρήγορα μέσα στο βαγόνι, ανάλογα με την ταχύτητά του, θα ένοιωθε σε μικρό ή μεγάλο βαθμό ίσως την πιο μυστήρια από τις αδρανειακές δυνάμεις, τη δύναμη Coriolis.*

Για να γίνει αντιληπτή και να ερμηνευθεί η εμφάνιση της αδρανειακής δύναμης Coriolis στα περιστρεφόμενα συστήματα αναφοράς, παρατηρούνται λίγο πιο προσεκτικά κάποια φαινόμενα. Αν σταθεί κάποιος επάνω σε μια περιστρεφόμενη πλατφόρμα θα αισθανθεί τη φυγόκεντρη δύναμη να τον σπρώχνει μακριά από το κέντρο και κάθετα προς τον άξονα περιστροφής. Αν περπατήσει προς το κέντρο της ενώ αυτή περιστρέφεται, θα αισθανθεί κάποια απρόσμενη δύναμη να εκτρέπει τον ευθύγραμμο βηματισμό του αντίθετα προς τη φορά περιστροφής της. Πρόκειται για την αδρανειακή δύναμη Coriolis. Αν η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της πλατφόρμας δεν είναι σταθερή τότε θα εμφανιστεί και η αδρανειακή δύναμη Euler.

Ρίχνοντας ένα λείο αντικείμενο (ένα κομμάτι πάγου για παράδειγμα) να γλιστρήσει στη λεία επιφάνεια της περιστρεφόμενης πλατφόρμας προς το κέντρο της, αν κάποιος βρίσκεται στο έδαφος και όχι επάνω στην περιστρεφόμενη πλατφόρμα, θα πει με βεβαιότητα ότι αφού οι τριβές είναι αμελητέες και δεν ασκείται κάποια δύναμη στο αντικείμενο, αυτό θα κατευθυνθεί με σταθερή ταχύτητα ευθύγραμμα προς το κέντρο της πλατφόρμας, σύμφωνα με την αρχή της αδράνειας. Ο παρατηρητής που βρίσκεται στο κέντρο της πλατφόρμας, στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς, βλέπει όμως και

δηλώνει ότι η πορεία του αντικειμένου δεν είναι ευθύγραμμη. Τα ίχνη του πάγου θα δείξουν ότι πράγματι η πορεία του ήταν καμπυλόγραμμη. Θα σκεφτεί ορθά ότι δεν είναι η φυγόκεντρη δύναμη που προκάλεσε την καμπύλωση της πορείας του γιατί, αν υπήρχε μόνο αυτή, θα είχε ακολουθήσει ευθύγραμμη πορεία προς το κέντρο της πλατφόρμας και κάποια στιγμή, ανακάμπτοντας, θα τον βλέπατε να επιστρέφει ευθύγραμμα προς την αρχική του θέση οδεύοντας στο να εγκαταλείψει φυγόκεντρα την πλατφόρμα. Αυτό οφείλεται στην αδρανειακή δύναμη Coriolis που, κάθε στιγμή, είναι ορθογώνια στο φορέα της γωνιακής ταχύτητας της πλατφόρμας και κάθετη στο φορέα της ταχύτητας του κινούμενου αντικειμένου ως προς το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς.

(Coriolis Free Throw: <https://www.youtube.com/watch?v=7TjOy56-x8Q>)



Σχήμα 12. Εμφάνιση της αδρανειακής δύναμης Coriolis.

Η δύναμη Coriolis στις πτήσεις

Μία πτήση προς τα δυτικά διαρκεί περισσότερο από την ίδια διαδρομή προς τα ανατολικά. Όταν ένα αεροπλάνο ταξιδεύει αντίθετα από την περιστροφή της Γης δεν φτάνει πιο γρήγορα. Όλα έχουν να κάνουν με την περιστροφή της. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επιδρούν στη χρονική διάρκεια της πτήσης, αλλά σε γενικές γραμμές, πάντα οι πτήσεις προς τα δυτικά θα διαρκούν περισσότερο. Για παράδειγμα, μια πτήση από τη Νέα Υόρκη προς το Λονδίνο διαρκεί περίπου 6 ώρες και 45 λεπτά και η επιστροφή από το Λονδίνο στη Νέα Υόρκη διαρκεί 8 ώρες.

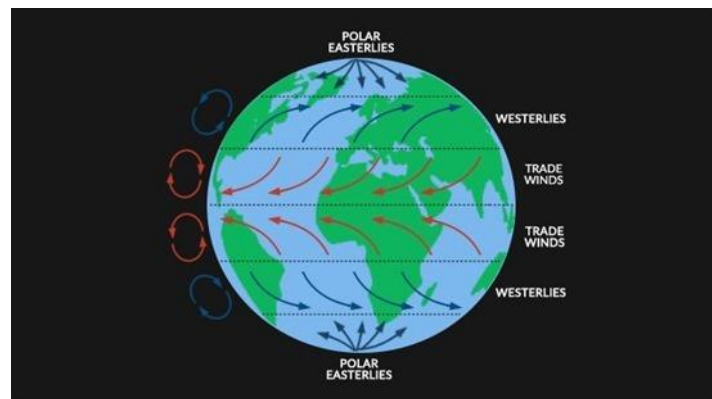
Η Γη περιστρέφεται από τα δυτικά προς ανατολικά. Και με αρκετή ταχύτητα – στον Ισημερινό, η ταχύτητα περιστροφής είναι περίπου 1.000 χιλιόμετρα την ώρα. Αυτή η ταχύτητα θα πρέπει να επηρεάζει μια πτήση προς τα δυτικά και να την κάνει να διαρκεί λιγότερο χρόνο, καθώς η Γη κινείται αντίθετα προς το αεροσκάφος. Αυτό όμως δεν συμβαίνει. Στην πραγματικότητα, το αεροσκάφος απομακρύνεται επίσης από τον προορισμό του καθώς συνεχίζει να περιστρέφεται μαζί με τη γη (μαζί με τη Γη περιστρέφονται και όλα τα υπόλοιπα όχι μόνο η επιφάνεια της, αλλά και οτιδήποτε

αιωρείται πάνω απ' αυτήν όπως ο αέρας και τα αεροπλάνα). Αυτό που έχει σημασία τότε είναι η ταχύτητα του αεροσκάφους σε σχέση με τη Γη.

Είναι η περιστροφή της Γης που προκαλεί τους μεγαλύτερους χρόνους πτήσης, αλλά όχι επειδή κινείται προς ή μακριά από τα αεροσκάφη που πετάνε. Αλλά αυτό οφείλεται μάλλον στην επίδραση των κινήσεων του ανέμου – στους λεγόμενους αεροχείμαρρους (jet streams).

Ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο έχει μια δύναμη κάθετη στον άξονα περιστροφής – αυτή είναι η γνωστή δύναμη Κοριόλις. Αυτή η δύναμη ωθεί τους ανέμους προς τα ανατολικά στο βόρειο ημισφαίριο και προς τα δυτικά στο νότιο ημισφαίριο. Η ισχύς του σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής. Τα σημεία πιο κοντά στον ισημερινό περιστρέφονται γρηγορότερα από τα σημεία κοντά στους πόλους – καθώς πρέπει να ταξιδεύουν περισσότερο σε κάθε περιστροφή στον ίδιο χρόνο.

Επιπλέον, οι άνεμοι επηρεάζονται από την ηλιακή θέρμανση και θα ρέουν από περιοχές υψηλής πίεσης σε χαμηλή πίεση. Σε συνδυασμό, αυτές οι επιδράσεις παράγουν αεροχείμαρρους που κινούνται από τα δυτικά προς τα ανατολικά, αλλά με κυματιστό μοτίβο. Η ροή μπορεί να ποικίλει σε ισχύ, ανάλογα με το υψόμετρο και με την πάροδο του χρόνου και συνήθως θα είναι πιο ισχυρή πιο κοντά στους πόλους.



Σχήμα 13. Coriolis Effect : Air circulation in the atmosphere.

Θαλάσσια ρεύματα και δύναμη Coriolis

Τα θαλάσσια ρεύματα διακρίνονται σε 4 κυρίως κατηγορίες ανάλογα με το αίτιο που έχουν προκληθεί. Οι τύποι των θαλάσσιων ρευμάτων είναι οι εξής:

1. Ρεύματα προκαλούμενα από τους ανέμους (Wind-induced currents)
2. Παλιρροιακά ρεύματα (Tidal currents)
3. Ρεύματα προκαλούμενα από τα κύματα (Wave-induced currents)
4. Ρεύματα πυκνότητας (Density currents)

Τα θαλάσσια ρεύματα που αφορούν τη δύναμη Coriolis είναι αυτά της πρώτης κατηγορίας.

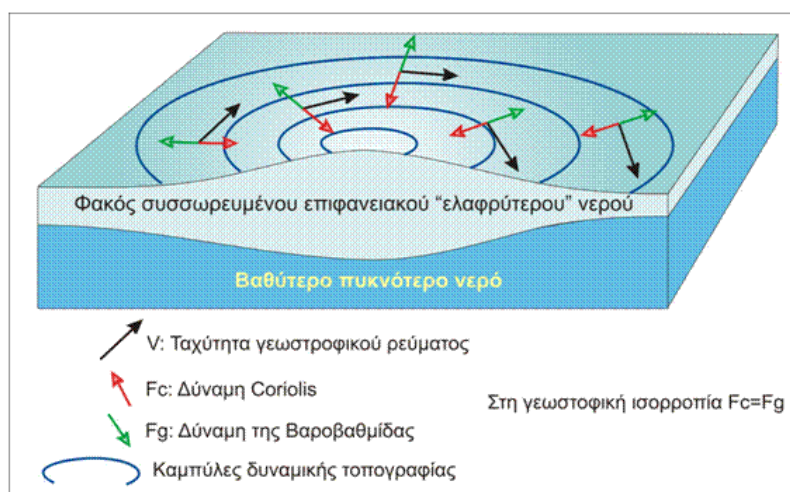
Τα ρεύματα που προκαλούνται από τους ανέμους είναι αποτέλεσμα της διατμητικής τάσεως που ασκείται από τον άνεμο που πνέει στην επιφάνεια της θάλασσας.

Όπως είναι αναμενόμενο, τα ρεύματα αυτά θα έπρεπε να έχουν την ίδια διεύθυνση με τους ανέμους που τα προκαλούν. Όμως η διεύθυνση ροής των ρευμάτων στο βόρειο ημισφαίριο αποκλίνει προς τα δεξιά της διεύθυνσεως από την οποία φυσά ο άνεμος, ενώ στο νότιο ημισφαίριο προς τα αριστερά. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο ότι τα ρεύματα αυτά ρέουν πάνω σε μια σφαίρα που περιστρέφεται, επομένως στα μόρια του νερού που κινούνται επιδρά η δύναμη Coriolis.

Λόγω του φαινομένου Coriolis η στάθμη της θάλασσας είναι υψηλότερη στο κέντρο και δυτικό τμήμα κάθε κυκλωτερού σχηματισμού. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται και στον νόμο του Ekman.

Η ύπαρξη εξάρσεων και κοίλων στην επιφάνεια των θαλασσών έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία δευτερευόντων ρευμάτων των γεωστροφικών ρευμάτων (geostrophic currents). Τα γεωστροφικά ρεύματα είναι αποτέλεσμα της κίνησης μαζών από τις εξάρσεις προς τα κοίλα κάτω από την επίδραση της βαρύτητας. Από τη στιγμή που η μάζα του νερού τίθεται σε κίνηση αρχίζει η επίδραση της δύναμης Coriolis, με αποτέλεσμα η μάζα να εκτραπεί δεξιά από τη πορεία της. Η μάζα του νερού κάτω από την επίδραση της δύναμης Coriolis εκτρέπεται συνεχώς από τη πορεία της μέχρι η δύναμη Coriolis να αντισταθμιστεί από τη δύναμη της βαρύτητας, οπότε η μάζα του νερού αρχίζει να κινείται παράλληλα προς τις ισοϋψείς.

Κοντά στις ακτές δημιουργούνται τα ρεύματα μικρής κλίμακας που δημιουργούνται από τους ανέμους. Τα ρεύματα αυτά δημιουργούνται όταν ο άνεμος πνέει παράλληλα προς τις ακτές οπότε δημιουργούνται ανοδικές και καθοδικές μετακινήσεις υδάτινων μαζών (upwelling and downwelling).



Σχήμα 14. Δυνάμεις που συμμετέχουν στην δημιουργία γεωστροφικών ρευμάτων.

Ο καιρός και η δύναμη Coriolis (Weather patterns)

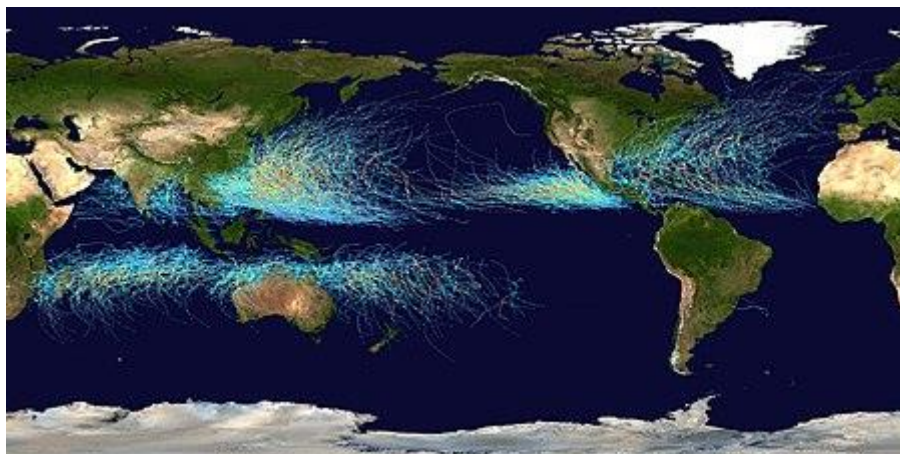
Η ανάπτυξη των καιρικών προτύπων, όπως οι κυκλώνες και οι άνεμοι του εμπορίου, είναι παραδείγματα της επίδρασης του φαινομένου Coriolis.

Οι κυκλώνες είναι συστήματα χαμηλής πίεσης που απορροφούν αέρα στο κέντρο τους ή αλλιώς στο «μάτι του κυκλώνα». Στο Βόρειο Ημισφαίριο, τα υγρά από συστήματα υψηλής πίεσης περνούν τα συστήματα χαμηλής πίεσης στα δεξιά τους. Καθώς οι μάζες αέρα τραβιούνται σε κυκλώνες από όλες τις κατευθύνσεις, εκτρέπονται και το σύστημα καταιγίδας - ένας τυφώνας - φαίνεται να περιστρέφεται αριστερόστροφα.

Στο Νότιο Ημισφαίριο, τα ρεύματα εκτρέπονται προς τα αριστερά. Ως αποτέλεσμα, τα συστήματα καταιγίδας φαίνεται να περιστρέφονται δεξιόστροφα.

Εκτός συστημάτων καταιγίδας, η επίδραση του φαινομένου Coriolis βοηθά στον καθορισμό τακτικών μοτίβων ανέμου σε όλο τον κόσμο.

Καθώς ο θερμός αέρας ανεβαίνει κοντά στον Ισημερινό, ρέει προς τους πόλους. Στο Βόρειο Ημισφαίριο, αυτά τα ρεύματα θερμού αέρα εκτρέπονται προς τα δεξιά (ανατολικά) καθώς κινούνται προς τα βόρεια. Τα ρεύματα κατεβαίνουν πίσω στο έδαφος σε περίπου 30° βόρειο γεωγραφικό πλάτος. Καθώς το ρεύμα κατεβαίνει, σταδιακά κινείται από τα βορειοανατολικά προς τα νοτιοδυτικά, πίσω προς τον Ισημερινό. Τα σταθερά κυκλοφορούντα σχήματα αυτών των μαζών αέρα είναι γνωστά ως εμπορικοί άνεμοι.



Σχήμα 15. Χάρτης του συνόλου των τροχιών όλων των τροπικών κυκλώνων την περίοδο 1985 - 2006.

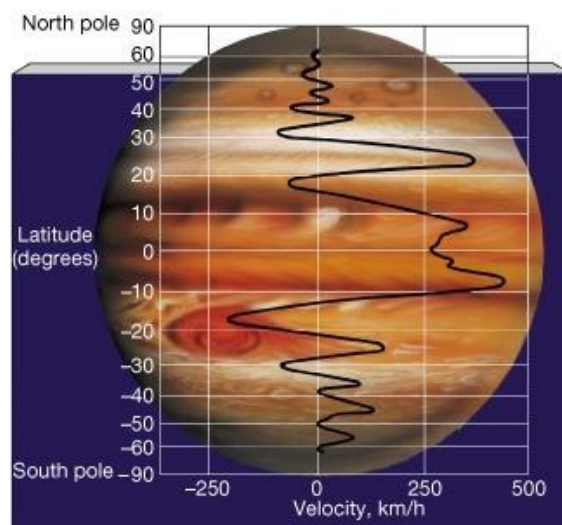
Το φαινόμενο Coriolis σε άλλους πλανήτες

Η Γη περιστρέφεται αρκετά αργά σε σύγκριση με άλλους γνωστούς πλανήτες. Η αργή περιστροφή της Γης σημαίνει ότι το φαινόμενο Coriolis δεν είναι αρκετά ισχυρό ώστε να

φαίνεται σε χαμηλές ταχύτητες σε μικρές αποστάσεις, όπως η αποστράγγιση νερού σε μια μπανιέρα.

Ο Δίας, από την άλλη πλευρά, έχει την ταχύτερη περιστροφή στο ηλιακό σύστημα. Στον Δία, το φαινόμενο Coriolis μετατρέπει πραγματικά τους ανέμους Βορρά-Νότου σε ανέμους Ανατολής-Δύσης, μερικοί ταξιδεύουν πάνω από 610 χιλιόμετρα (380 μίλια) ανά ώρα.

Οι διαιρέσεις μεταξύ ανέμων που φυσούν ως επί το πλείστον προς την ανατολή και εκείνων που φυσούν κυρίως προς τα δυτικά δημιουργούν σαφείς οριζόντιες διαιρέσεις, που ονομάζονται ζώνες, ανάμεσα στα σύννεφα του πλανήτη. Τα όρια μεταξύ αυτών των ταχέων ζωνών είναι απίστευτα ενεργές περιοχές καταιγίδας. Το 180χρονο Great Red Spot είναι ίσως το πιο διάσημο από αυτές τις καταιγίδες.



Σχήμα 16. The coriolis Effect in Jupiter.

(https://www.youtube.com/watch?v=qOzfQ2fDuDg&feature=emb_logo)

Ενδεικτική άσκηση στη δύναμη Coriolis:

Ένας βαλλιστικός πύραυλος εκτοξεύεται προς τα ανατολικά από ένα σημείο γεωγραφικού πλάτους $\phi=43^\circ$ N. Αν υποθέσουμε ότι ο πύραυλος ταξιδεύει 1000 km με οριζόντια ταχύτητα $u_0=1000$ m/s, βρείτε την απόκλιση του πυραύλου από την αρχική του κατεύθυνση λόγω της δύναμης Coriolis.

Βίντεο

Για την καλύτερη κατανόηση του θέματος παρακολουθήθηκαν διάφορα βίντεο. Τα πιο χρήσιμα εκ των οποίων είναι τα ακόλουθα:

The Coriolis Effect : <https://www.youtube.com/watch?v=6L5UD240mCQ>

Understanding Global Atmospheric Circulation : [Understanding Global Atmospheric Circulation](#)

Does Water Swirl the Other Way in the Southern Hemisphere : [Does Water Swirl the Other Way in the Southern Hemisphere?](#)

Why Isn't It Faster To Fly West? : [Why Isn't It Faster To Fly West?](#)

Formation Of A Tropical Cyclone : <https://www.youtube.com/watch?v=UKL9NlxLIIE>

How do ocean currents work? : [Jennifer Verduin: How do ocean currents work?](#)

Βιβλιογραφία

Οι ιστοσελίδες που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγγραφή της εργασίας είναι οι ακόλουθες:

[What Is the Coriolis Effect? \(thoughtco.com\)](#)

[Δυνάμεις αδρανείας, φυγόκεντρη δύναμη και δύναμη Coriolis | physicsgg](#)

http://library.tee.gr/digital/kma/kma_m273/kma_m273_feredinos.pdf

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CF%8D%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B7_%CE%9A%CE%BF%CF%81%CE%B9%CF%8C%CE%BB%CE%B9%CF%82

<http://ph334.edu.physics.uoc.gr/pdf-files/chapter-6.pdf>

<https://www.britannica.com/science/atmospheric-circulation>

<https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-weather-works/global-air-atmospheric-circulation>

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%BA%CE%B1%CF%83%CF%80%CE%AC%CF%81-%CE%93%CE%BA%CF%85%CF%83%CF%84%CE%AC%CE%B2_%CE%BD%CF%84%CE%B5_%CE%9A%CE%BF%CF%81%CE%B9%CF%8C%CE%BB%CE%B9%CF%82

<https://physicsgg.me/2011/01/15/%CE%B7->

<https://physicsgg.me/2011/01/15/%CE%B7->

<https://physicsgg.me/2011/01/15/%CE%B7-%CE%B4%CF%8D%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B7-coriolis->

%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CE%BA%CE%BB%CF%8D%CF%86%CE%B8%CE%B7%CE%BA%CE
%B5-184-%CF%87%CF%81%CF%8C%CE%BD%CE%B9%CE%B1-
%CF%80%CF%81%CE%B9%CE%BD-%CF%84%CE%BF/

<https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/coriolis-effect/>

General Circulation of the Atmosphere | North Carolina Climate Office (ncsu.edu)