



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΗΧΑΝΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΝΗΣ
ATMOSPHERIC VORTEX ENGINE MICHAUD

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΡΟΓΔΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΤΙΤΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΑΘΗΝΑ, ΑΠΡΙΛΗΣ 2014

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	- 4 -
2. ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	- 5 -
3. ΛΕΞΙΛΟΠΟ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ	- 8 -
4. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΝΗΣ.....	- 18 -
Εισαγωγή.....	- 18 -
Σύσταση.....	- 18 -
Κατακόρυφη Δομή της Ατμόσφαιρας.....	- 20 -
Καιρικά Φαινόμενα.....	- 22 -
Ενέργεια.....	- 22 -
Άνεμος και Κυκλοφορία	- 23 -
Ο Κύκλος του Νερού	- 24 -
Σύννεφα.....	- 25 -
Κατακρημνίσματα.....	- 26 -
Καταιγίδες.....	- 26 -
Ανεμοστρόβιλοι και Σίφωνες.....	- 29 -
Τροπικές Καταιγίδες	- 34 -
5. ΜΗΧΑΝΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΝΗΣ – ATMOSPHERIC VORTEX ENGINE ΚΑΙ ΠΥΡΓΟΙ ΨΥΞΗΣ ΔΙΝΗΣ	- 40 -
Μηχανή Ατμοσφαιρικής Δίνης – Atmospheric Vortex Engine (AVE).....	- 40 -
Περιγραφή Λειτουργίας.....	- 41 -
Πύργος Ψύξης Δίνης.....	- 50 -
Περιγραφή λειτουργίας.....	- 50 -
Μηχανή Ατμοσφαιρικής Δίνης και Συμβατικές Εγκαταστάσεις	- 53 -
Μηχανές Δίνης και Περιβάλλον	- 54 -
6. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ.....	- 56 -
Ενέργεια.....	- 56 -

Μηχανή Carnot.....	- 57 -
Εντροπία.....	- 58 -
Διαθέσιμη Δυναμική Ενέργεια Συναγωγής (CAPE)	- 61 -
Υπολογισμός του Έργου της Άνωσης.....	- 62 -
7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ MATHCAD.....	- 64 -
Εισαγωγή.....	- 64 -
Βασικές Συναρτήσεις.....	- 64 -
Θερμοδυναμικές σταθερές.....	- 64 -
Θερμοδυναμικές συναρτήσεις.....	- 65 -
Λύτες – Solver Blocks.....	- 68 -
Θερμοκρασία πήξης και η ζώνη στερεοποίησης.....	- 69 -
Παραγωγή Έργου από Δίνη κατά την Ανοδική Ατμοσφαιρική Συναγωγή.....	- 76 -
Εισαγωγή.....	- 76 -
Παρουσίαση.....	- 76 -
Υπολογισμός Μέγιστης Δυνατής Έντασης Τροπικού Κυκλώνα με τη Μέθοδο Συνολικής Ενέργειας.....	- 83 -
Εισαγωγή.....	- 83 -
Παρουσίαση.....	- 84 -
Συμπεράσματα.....	- 126 -
Εισροή και Παράσυρση στο Ανοδικό Ρεύμα Αέρα και στη Διάχυση του Έργου.....	- 127 -
Εισαγωγή.....	- 127 -
Παρουσίαση.....	- 128 -
Συμπεράσματα.....	- 162 -
8. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 163 -
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 165 -

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναδείξει το γεγονός πως, η ατμόσφαιρα συμπεριφέρεται σαν θερμική μηχανή καθώς επίσης και να περιγράψει την λειτουργία των μηχανών δίνης. Η βιβλιογραφία σχετικά με τη λειτουργία της ατμόσφαιρας είναι αχανής αφού το συγκεκριμένο θέμα έχει απασχολήσει πολλούς επιστήμονες στο πέρασμα του χρόνου. Παρόλα αυτά όμως, ακόμα και σήμερα, οι μηχανισμοί πολλών φαινομένων της ατμόσφαιρας παραμένουν ανεξήγητοι. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία εστιάζουμε στα φαινόμενα δίνης (ανεμοστρόβιλοι, τυφώνες) και στην προσπάθεια εκμετάλλευσής τους προκειμένου να παράγουμε ενέργεια. Η ατμοσφαιρική μηχανή δίνης (Atmospheric Vortex Engine) αποτελεί μια τέτοια προσπάθεια εκμετάλλευσης των φαινομένων αυτών. Πρόκειται για μια εφαρμογή πράσινης ενέργειας που εμπνεύστηκε ο Louis Michaud και έχει την ίδια θερμοδυναμική βάση με την ηλιακή καμινάδα. Η μηχανή ατμοσφαιρικής δίνης βασίζεται στην δημιουργία μιας τεχνητής και ελεγχόμενης δίνης με μέγεθος αντίστοιχο με ένα μικρό τυφώνα. Μπορεί να βρει εφαρμογή κυρίως σε θερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής όπου έχουμε μεγάλα ποσά απορριπτόμενης στο περιβάλλον ενέργειας. Η μηχανή ατμοσφαιρικής δίνης μπορεί να εκμεταλλευτεί ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας αυτής για να παράξει ηλεκτρικό ρεύμα και να ανεβάσει το συνολικό βαθμό απόδοσης του θερμοηλεκτρικού σταθμού μέχρι και 40%. Η θεωρητική βάση της μηχανής ατμοσφαιρικής δίνης ενισχύεται από αριθμητικές προσομοιώσεις και πρωτότυπα μοντέλα μικρής κλίμακας που επιβεβαιώνουν την σταθερότητα της δίνης και τη δυνατότητα της εγκατάστασης να λειτουργήσει αποτελεσματικά. Παρόλο που πρόκειται όμως για μια πολλά υποσχόμενη εφαρμογή στον τομέα της πράσινης ενέργειας, δεν έχει ακόμα επιχειρηθεί η εφαρμογή της μηχανής ατμοσφαιρικής δίνης σε μια εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας. Εκτός από την μηχανή ατμοσφαιρικής δίνης ο Michaud προτείνει την κατασκευή πύργων ψύξης δίνης. Οι πύργοι αυτοί είναι όμοιοι με τους συμβατικούς πύργους ψύξης φυσικής κυκλοφορίας με τη διαφορά ότι η δίνη καταργεί την καμινάδα καθιστώντας το κόστος κατασκευής της ψυκτικής μονάδας εξαιρετικά μικρότερο. Υπογραμμίζεται ότι η κατασκευή και η λειτουργία αυτών των εγκαταστάσεων δίνης έχει πολλαπλά οφέλη για το περιβάλλον τόσο σε τοπική όσο και σε παγκόσμια κλίμακα.

Κλείνοντας την εισαγωγική αυτή παράγραφο θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον καθηγητή μου Εμμανουήλ Ρογδάκη για την ανάθεση της εργασίας αυτής και την καθοδήγησή του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την πνευματική και οικονομική στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου αλλά και για την υπομονή που έδειξαν.

2. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ατμόσφαιρα, που περιβάλλει τη Γή και εξασφαλίζει την ύπαρξη ζωής σε αυτή, λειτουργεί σαν μια θερμική μηχανή. Ο αέρας, που είναι και το εργαζόμενο μέσο της, θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγει έργο με βάση τη θεωρία της μέγιστης παραγωγής εντροπίας. Η ανοδική μεταφορά θερμότητας αποτελεί τον αποτελεσματικότερο μηχανισμό παραγωγής και διάχυσης του μηχανικού έργου στην ατμόσφαιρα και συναντάται, στην πιο ισχυρή μορφή της, σε ακραία καιρικά φαινόμενα όπως οι ανεμοστρόβιλοι και οι τροπικοί κυκλώνες. Η μηχανή ατμοσφαιρικής δίνης αποτελεί μια εφαρμογή εκμετάλλευσης της ανοδικής μεταφοράς θερμότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην αρχή της εργασίας παραθέτουμε γενικές πληροφορίες για την σύσταση, τη δομή και τη λειτουργία της ατμόσφαιρας καθώς επίσης και για τα ακραία καιρικά φαινόμενα δίνης που εκδηλώνονται σε αυτή. Επίσης αναλύουμε τα αίτια παραγωγής των φαινομένων αυτών και τους βασικούς μηχανισμούς τους. Στη συνέχεια προχωράμε στην παρουσίαση δύο εγκαταστάσεων οι οποίες λειτουργούν με την τεχνολογία δίνης και αποτελούν ευρεσιτεχνίες του ηλεκτρολόγου μηχανικού Louis Michaud. Πρόκειται για τη μηχανή ατμοσφαιρικής δίνης (AVE) και τον πύργο ψύξης δίνης. Περιγράφουμε τη λειτουργία και την κατασκευή των εγκαταστάσεων αυτών, όπως σχεδιάστηκαν από το Michaud. Επίσης τονίζουμε τα πολλαπλά οφέλη που συνεπάγεται η εφαρμογή των εγκαταστάσεων δίνης για το περιβάλλον και τον τρόπο με τον οποίο οι συγκεκριμένες εφαρμογές μπορούν να βελτιώσουν υπάρχουσες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Στη συνέχεια περιγράφουμε τους βασικούς θερμοδυναμικούς μηχανισμούς που διέπουν τη λειτουργία της ατμόσφαιρας σε ότι αφορά τη θέρμανση και την κίνηση αέριων μαζών, την παραγωγή έργου και τον υπολογισμό του έργου αυτού αλλά και τους τρόπους διάχυσής του. Τέλος παρουσιάζουμε τις σημαντικότερες εργασίες του Michaud στον τομέα παραγωγής και διάχυσης του έργου της ατμόσφαιρας και τις τεκμηριώνουμε με την αριθμητική εφαρμογή των υπολογιστικών προγραμμάτων MATHCAD που δημιούργησε ο Michaud για τα συγκεκριμένα άρθρα.

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Διάγραμμα τυπικού σύγχρονου εγχυτήρα.....	- 10 -
Εικόνα 2: Εναλλάκτες α) ομορροής, b) αντιρροής, c) σταυρορροής χωρίς ανάμιξη, d) σταυρορροής με ανάμιξη.....	- 11 -
Εικόνα 3: Διάγραμμα της πορείας του ανερχόμενου αέρα, σημεία B-C-E, σε σχέση με τη θερμοκρασία (T) και την υγρασία (T_w) του αέρα περιβάλλοντος.	- 12 -
Εικόνα 4: Υδροδυναμικό οριακό στρώμα.	- 14 -
Εικόνα 5: Σχέδιο Splash Bar για πύργους ψύξης. [36].....	- 17 -
Εικόνα 6: Διαίρεση της ατμόσφαιρας με βάση το θερμοκρασιακό προφίλ. [1].....	- 21 -
Εικόνα 7: Η εισερχόμενη στην ατμόσφαιρα ηλιακή ακτινοβολία. [1].....	- 23 -
Εικόνα 8: Περιστροφή της Γής και σχετική στροβιλότητα του αέρα. [1].....	- 24 -
Εικόνα 9: Υδρολογικός Κύκλος. [1].....	- 25 -
Εικόνα 10: Χάρτης Σύννεφων. [1].....	- 25 -
Εικόνα 11: Τα τρία στάδια ανάπτυξης της καταιγίδας. [1].....	- 27 -
Εικόνα 12: Η εξέλιξη ενός σίφωνα σε ένα συναγωγικό σύνορο. [1].....	- 32 -
Εικόνα 13: Τομή τυπικού τυφώνα. [1].....	- 34 -
Εικόνα 14: Οι περιοχές της Γής που παρατηρείται η εκδήλωση τυφώνων και τροπικών καταιγίδων. [1].....	- 36 -
Εικόνα 15: Τομή τυπικού κυκλώνα φαίνονται α) τα σύννεφα και η κυκλοφορία του αέρα, b) η ένταση της βροχόπτωσης, c) η κατανομή της πίεσης και d) η ταχύτητα του αέρα. [1]..	- 38 -
Εικόνα 16: Θερμοκρασιακές διαφορές σε ένα τυφώνα σε σύγκριση με τον περιβάλλοντα αέρα. [1].....	- 39 -
Εικόνα 17: Πλάγια όψη της AVE. [31].....	- 42 -
Εικόνα 18: Άποψη από την αρένα, την εφαλτομενική είσοδο και τον εναλλάκτη θερμότητας. [31].....	- 44 -
Εικόνα 19: Κάτοψη Μηχανής Ατμοσφαιρικής Δίνης με αρίθμηση των σημαντικότερων στοιχείων της. [35]	- 48 -
Εικόνα 20: Πλάγια όψη Μηχανής Ατμοσφαιρικής Δίνης με αρίθμηση των σημαντικότερων στοιχείων της. [35]	- 49 -

Εικόνα 21: Κάτοψη Πύργου Ψύξης Δίνης με αρίθμηση των σημαντικότερων στοιχείων του. [35].....	- 51 -
Εικόνα 22: Πλάγια όψη Πύργου Ψύξης Δίνης με αρίθμηση των σημαντικότερων στοιχείων του. [35].....	- 52 -
Εικόνα 23: Ηλιακή καμινάδα. [31]	- 54 -
Εικόνα 24: Ισενθαλπική ανάμιξη αέρα με αέρα περιβάλλοντος στα 90kPa. α) Αέρας χωρίς συμπύκνωμα νερού b) Αέρας με 2g/kg συμπύκνωμα νερού. [34].....	- 134 -

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1: Πίνακας Σύστασης Μόνιμων Αερίων [1].....	- 18 -
Πίνακας 2: Πίνακας Σύστασης Μεταβλητών Αερίων [1]	- 19 -
Πίνακας 3: Βασικά Είδη Σύννεφων. [1].....	- 26 -
Πίνακας 4: Περιγραφή στοιχείων AVE όπως φαίνονται αριθμημένα στις παρακάτω Εικόνες 19 και 20. [35]	- 47 -
Πίνακας 5: Περιγραφή στοιχείων AVE όπως φαίνονται αριθμημένα στις παραπάνω Εικόνες 19 και 20. [35]	- 49 -
Πίνακας 6: : Περιγραφή στοιχείων Πύργου Ψύξης Δίνης όπως φαίνονται αριθμημένα στις παραπάνω Εικόνες 21 και 22. [35]	- 52 -
Πίνακας 7: Βασικές σταθερές όπως χρησιμοποιούνται στα προγράμματα Mathcad.....	- 65 -
Πίνακας 8: Συντελεστές ισορροπίας Clapeyron.....	- 65 -
Πίνακας 9: Υπολογισμός του MPI και της πτώσης πίεσης στη βάση, για ανύψωση στο επίπεδο των 20kPa για κάθε περίπτωση. [25]	- 86 -
Πίνακας 10: Υπολογισμός του MPI και της πτώσης πίεσης στη βάση για ανύψωση στο επίπεδο των 10kPa για την περίπτωση C. [25].....	- 88 -
Πίνακας 11: Πίνακας υπολογισμών εισροής. [22]	- 131 -

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1: Η ροή ενέργειας στη Γή. [2].....	- 56 -
Σχήμα 2: Μοντέλο ατμοσφαιρικής λειτουργίας.	- 58 -
Σχήμα 3: Ιδανικό θερμοδυναμικό σύστημα σταθερής κατάστασης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του έργου που διαχέεται στην ατμόσφαιρα. [27]	- 60 -
Σχήμα 4: Θερμοδυναμικό σύστημα στο οποίο μια στήλη αέρα περιβάλλεται από μονωμένο υλικό και στο πάνω μέρος της ασκείται σταθερή πίεση από ένα έμβολο. [26].....	- 62 -

Σχήμα 5: Κατακόρυφος σωλήνας με περιορισμό και στρόβιλο στη βάση του. [23]	- 77 -
Σχήμα 6: Φυσικός ανοδικός σωλήνας της AVE. [23]	- 80 -
Σχήμα 7: Ιδανική ανοδική ροή σε κατακόρυφο αγωγό. α) Αναστρέψιμη περίπτωση, β) Μη αναστρέψιμη περίπτωση, γ) Περίπτωση αλληλεπίδρασης αέρα – θάλασσας. [25]	- 84 -
Σχήμα 8: Διάγραμμα πίεσης προς την ανύψωση για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάζουμε...-	89 -
Σχήμα 9: Μοντέλα εισροής και εκροής Α) Μοντέλο σωλήνα, Β) Μοντέλο μπαλονιού. [22]-	128 -
Σχήμα 10: Επίδραση διαφορετικών τιμών του συντελεστή (α) και του εκθέτη εισροής (β) στη διαφορά εικονικής θερμοκρασίας.	- 130 -
Σχήμα 11: Εισροή και Παράσυρση στη μορφή ποσοστού της μάζας του ανοδικού ρεύματος για κάθε επίπεδο.....	- 135 -
Σχήμα 12: Εισροή και Παράσυρση στη μορφή λόγου προς την αρχική μάζα του ανοδικού ρεύματος.....	- 135 -

3. ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ

Αδιαβατική Μεταβολή

Αδιαβατική μεταβολή ιδανικού αερίου είναι η μεταβολή η οποία συμβαίνει χωρίς το αέριο να ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον ($Q=0$), δηλαδή, όλο το παραγόμενο έργο προέρχεται απ' τη μείωση της εσωτερικής ενέργειας του αερίου. Σε μία αντιστρεπτή αδιαβατική μεταβολή η εντροπία του συστήματος παραμένει σταθερή. Ο νόμος που εκφράζει τη μεταβολή αυτή ονομάζεται νόμος του Poisson και είναι: $p \cdot V^\gamma$ σταθερό, όπου γ ένας καθαρός αριθμός μεγαλύτερος από το ένα.

Στην αδιαβατική μεταβολή το έργο μπορεί να υπολογιστεί από την εξής σχέση:

$$W = \frac{p_t \cdot V_t - p_a \cdot V_a}{1 - \gamma}$$

όπου t αναφέρεται στην τελική κατάσταση, και a αναφέρεται στην αρχική κατάσταση του αερίου σώματος που υπόκειται στην αδιαβατική μεταβολή.

Οι αδιαβατικές μεταβολές χωρίζονται σε:

- 1) Αδιαβατικές εκτονώσεις/ψύξεις, όπου αυξάνεται ο όγκος και μειώνεται η θερμοκρασία του αερίου.
- 2) Αδιαβατικές συμπίεσεις/θερμάνσεις, όπου ο όγκος μειώνεται και η θερμοκρασία του αερίου αυξάνεται.

Με τον όρο αδιαβατική ψύξη χαρακτηρίζεται η απώλεια θερμότητας μιας μάζας αέρος, που οφείλεται στη διαστολή της στην ελεύθερη ατμόσφαιρα. Ο αέρας στην ατμόσφαιρα, εκτός από την καθ' ύψος ελάττωση της θερμοκρασίας του, ψύχεται και αδιαβατικά. Δηλαδή η μάζα αέρα που βρίσκεται κοντά στο έδαφος θερμαίνεται, στη συνέχεια διαστέλλεται και γενόμενη ελαφρότερη αρχίζει να ανεβαίνει υψηλότερα. Η διαστολή της ανερχόμενης αυτής αέριας μάζας έχει ως συνέπεια την πτώση της θερμοκρασίας της αφού τα μόριά της αρχίζουν να απομακρύνονται μεταξύ τους. Αυτή η μετακίνηση όμως των μορίων σημαίνει ακόμη παραγωγή έργου. Για να παραχθεί λοιπόν αυτό το έργο απαιτείται κάποια ενέργεια και σαν τέτοια ενέργεια ξοδεύεται η θερμότητα που έχει αυτή η αέρια μάζα. Η αδιαβατική ψύξη, εν προκειμένω ψύξη με διαστολή ή εκτόνωση, παίζει σημαντικό ρόλο στην ισορροπία των αέριων μαζών στην ατμόσφαιρα.

Αισθητή Θερμότητα

Αισθητή θερμότητα είναι η θερμότητα που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός κιλού μιας ουσίας κατά ένα βαθμό Κελσίου. Η αισθητή θερμότητα του αέρα είναι $1\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$. Η αισθητή θερμότητα του νερού είναι $4,2\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$.

Αναστρέψιμη Διεργασία

Μια αναστρέψιμη διεργασία είναι μια διεργασία όπου η παραγωγή έργου είναι η μέγιστη που επιτρέπεται από την αρχή του Carnot σε αντίθεση με μια μη αναστρέψιμη διεργασία όπου το έργο είναι λιγότερο. Γενικά το έργο επανέρχεται εύκολα στην μορφή θερμικής ενέργειας. Προκειμένου να συλληφθεί το έργο, πρέπει να έχουμε ελεγχόμενη εκτόνωση ένα στρόβιλο.

Αποτόνωση

Η αποτόνωση είναι συνώνυμο της εκτόνωσης. Πρόκειται για την απότομη ελάττωση της πίεσης αέριου όταν αυτό καταλάβει μεγαλύτερο χώρο.

Γεωδυναμικό ύψος

Το γεωδυναμικό σε συγκεκριμένο ύψος στην ατμόσφαιρα ορίζεται ως η ενέργεια που θα πρέπει να καταναλωθεί για την ανύψωση της μοναδιαίας μάζας αέρα από την μέση στάθμη θάλασσας μέχρι το ύψος αυτό. Δηλαδή το γεωδυναμικό είναι η δυναμική ενέργεια αέριας μάζας 1Kg στο συγκεκριμένο ύψος. Οι μονάδες γεωδυναμικού είναι J/kg ή m/s^2 .

Δύναμη Coriolis

Η δύναμη Coriolis 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) ως:

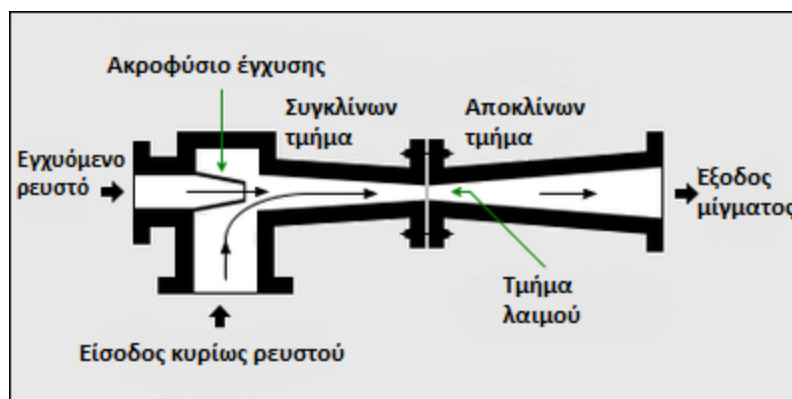
$$m \left(\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_R = m \left(\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_I - 2m\vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} - m\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$$

Ο δείκτης I υποδηλώνει το αδρανειακό σύστημα αναφοράς (άρα η $m \left(\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_I$ είναι η πραγματική δύναμη η οποία δέχεται το σώμα) και ο δείκτης R υποδηλώνει το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Ως εκ τούτου, 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.

Σε ότι αφορά την επίδραση της δύναμης Coriolis στη μετεωρολογία, οι άνεμοι πλησιάζοντας μια περιοχή χαμηλής πίεσης έχουν την τάση να εκτρέπεται γύρω από την περιοχή αντί να ρέουν άμεσα από την περιοχή αυτή. Στο βόρειο ημισφαίριο, οι άνεμοι τείνουν να εκτρέπεται σε μία αριστερόστροφη κατεύθυνση γύρω από ένα πυρήνα χαμηλής πίεσης. Στο νότιο ημισφαίριο, οι άνεμοι τείνουν να εκτρέπονται σε μια δεξιόστροφη κατεύθυνση γύρω από ένα πυρήνα χαμηλής πίεσης. Αυτή η εκτροπή είναι γνωστή και ως “κυκλωνική ροή”.

Εγχυτήρας Ατμού - Steam Injector

Ένας εγχυτήρας, εγχυτήρα ατμού, ή θερμοσυμπιεστής είναι ένας τύπος αντλίας που χρησιμοποιεί το φαινόμενο Venturi, ενός συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου, για να μετατρέπει την πίεση που έχει ένα κινούμενο ρευστό σε ταχύτητα δημιουργώντας έτσι μια ζώνη χαμηλής πίεσης που αναρροφά ένα δεύτερο ρευστό. Μετά τη διέλευση μέσα από το λαιμό του εγχυτήρα, το ανάμικτο πλέον ρευστό διαστέλλεται και η ταχύτητα μειώνεται οδηγώντας έτσι στην επανασυμπύεση του μίγματος με τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ενέργεια πίεσης. Το κινητήριο ρευστό μπορεί να είναι ένα υγρό, ατμός ή οποιοδήποτε άλλο αέριο. Το παρασυρόμενο ρευστό αναρρόφησης μπορεί να είναι αέριο, υγρό ή πολτός.

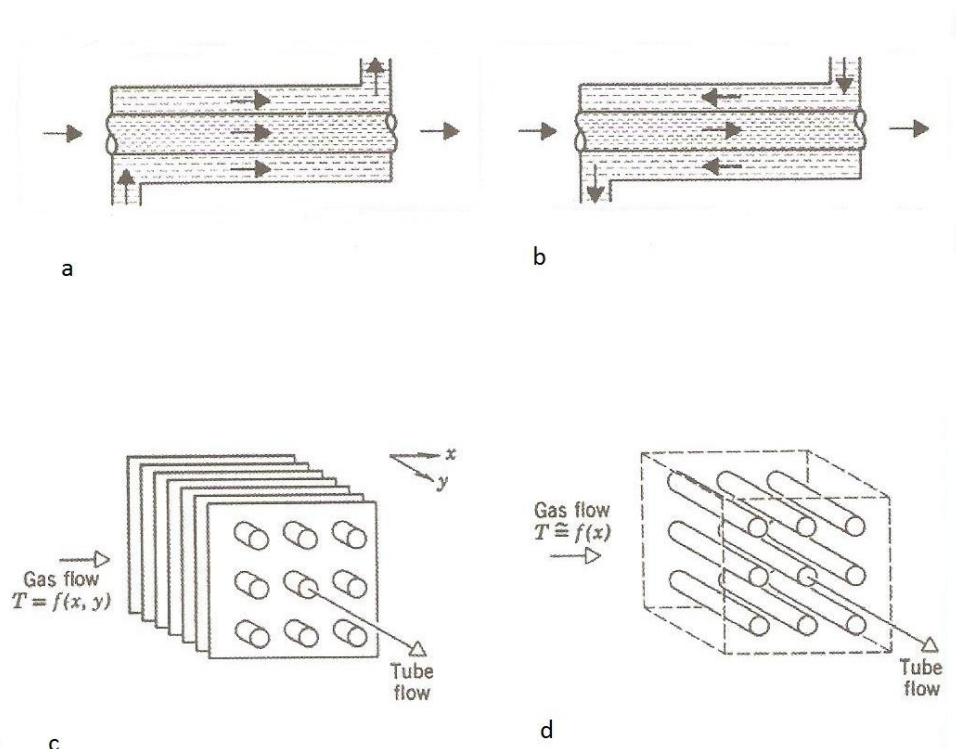


Εικόνα 1: Διάγραμμα τυπικού σύγχρονου εγχυτήρα.

Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει ένα τυπικό σύγχρονο σύστημα έγχυσης. Αποτελείται από ένα ακροφύσιο εισόδου και ένα συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο εξόδου. Νερό, αέρας, ατμός, ή οποιοδήποτε άλλο υγρό σε υψηλή πίεση παρέχει την κινητήρια δύναμη στην είσοδο.

Εναλλάκτης Θερμότητας

Εναλλάκτης θερμότητας είναι μια συσκευή η οποία διαρρέεται από δύο ρευστά διαφορετικής θερμοκρασίας και διευκολύνει τη μεταφορά θερμότητας από το θερμότερο στο ψυχρότερο. Η μεταφορά θερμότητας είναι δυνατό να γίνει είτε με είτε χωρίς ανάμιξη των δυο ρευστών. Συνήθως δεν έχουμε ανάμιξη και ανάλογα με τη ροή των ρευστών οι εναλλάκτες χωρίζονται σε ομορροής, αντιρροής και σταυρορροής.

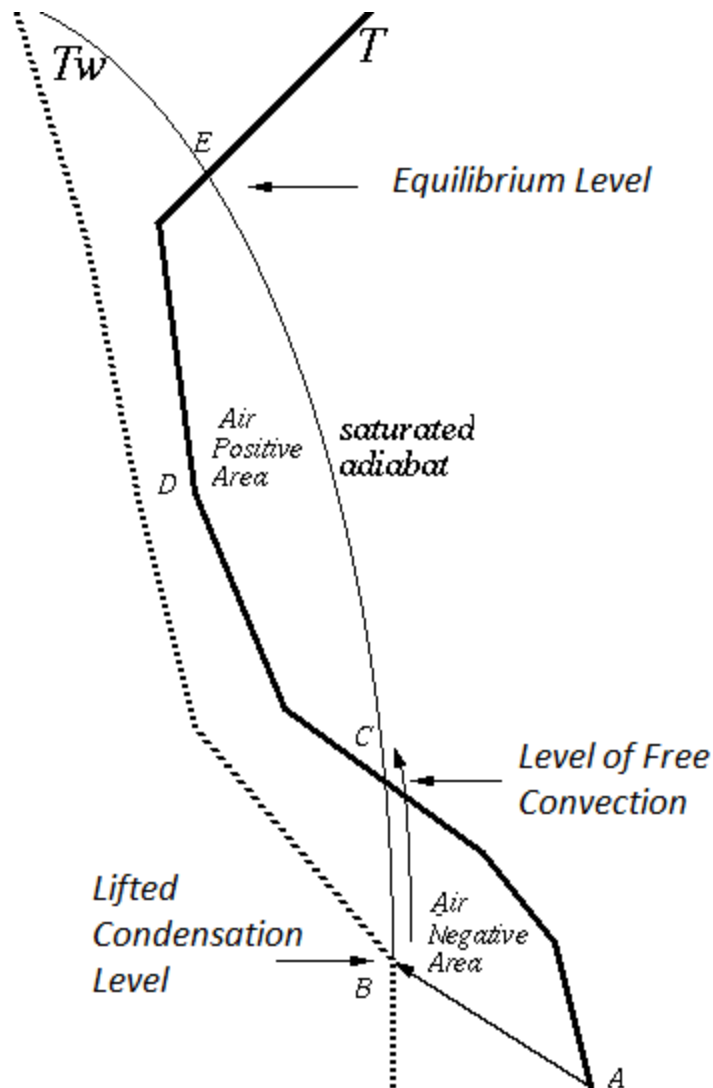


Εικόνα 2: Εναλλάκτες a) ομορροής, b) αντιρροής, c) σταυρορροής χωρίς ανάμιξη, d) σταυρορροής με ανάμιξη.

Ο σχεδιασμός ενός εναλλάκτη περιλαμβάνει τρία στάδια: το θερμικό, το μηχανολογικό και το κατασκευαστικό. Στο θερμικό σχεδιασμό επιλέγεται ο τύπος του εναλλάκτη και εκτιμάται το μέγεθος της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας, στο μηχανολογικό σχεδιασμό υπολογίζονται η πτώση πίεσης, οι διαβρωτικές ιδιότητες των δύο ρευστών και οι θερμικές τάσεις ενώ στον κατασκευαστικό επιδιώκεται η ικανοποίηση των ανωτέρω προϋποθέσεων με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. [28]

Επίπεδο Ουδέτερης Άνωσης-Level of Neutral Buoyancy (LNB)

Το επίπεδο ισορροπίας ή επίπεδο ουδέτερης άνωσης, στη μετεωρολογία, είναι το επίπεδο στο οποίο μια μάζα αέρα αποκτά την ίδια πυκνότητα με το περιβάλλον της. Αυτό σημαίνει ότι ο ασταθής αέρας γίνεται πλέον σταθερός και η συναγωγή σταματά. Αυτό το επίπεδο είναι συχνά κοντά στην τροπόπαυση.



Εικόνα 3: Διάγραμμα της πορείας του ανερχόμενου αέρα, σημεία B-C-E, σε σχέση με τη θερμοκρασία (T) και την υγρασία (T_w) του αέρα περιβάλλοντος.

Εργαζόμενο Μέσο

Στις μηχανές εσωτερικής καύσης για να επιτευχθεί παραγωγή έργου χρησιμοποιείται πάντοτε ένα υλικό, που υποβάλλεται σε προκαθορισμένες μεταβολές και χρησιμεύει για να

μεταφέρει την θερμότητα σε διάφορα μέρη της μηχανής, κατά προκαθορισμένο επίσης τρόπο. Το υλικό αυτό ονομάζεται εργαζόμενο μέσο.

Στις ατμομηχανές ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται το νερό που θερμαινόμενο μετατρέπεται σε ατμό. Αυτός χρησιμοποιείται ως φορέας της θερμότητας αλλά και της ενέργειας γενικότερα, μέρος της οποίας η μηχανή χρησιμοποιεί για να παράγει έργο. Στις αεριομηχανές ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται ένα μίγμα αποτελούμενο από αέρα και καύσιμο αέριο. Στις βενζινομηχανές και πετρελαιομηχανές ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται ο αέρας και τα καυσαέρια που παράγονται από την ανάφλεξη του μίγματος μέσα στους κυλίνδρους. Τα πλέον ενδιαφέροντα εργαζόμενα μέσα είναι τα αέρια και γενικά οι ατμοί των υγρών των οποίων οι μεταβολές βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στη λειτουργία των θερμικών μηχανών.

Εισροή – Entrainment

Εισροή ορίζεται η ανάμιξη του αέρα περιβάλλοντος σε μια ανερχόμενη μάζα αέρα. Η εισροή ψυχρότερου ατμοσφαιρικού αέρα σε ένα ζεστό ανοδικό ρεύμα αέρα μειώνει την άνωσή του.

Ιξώδες

Με τον όρο ιξώδες χαρακτηρίζεται μία από τις ιδιότητες της ύλης, ιδίως των υγρών αλλά και των αερίων, και συγκεκριμένα η αντίσταση που παρουσιάζουν κατά τη ροή τους. Η αντίσταση αυτή που παρουσιάζουν τα ρευστά οφείλεται στις εσωτερικές τριβές των μορίων τους από δυνάμεις συνοχής, σε βαθμό που το ίδιο το ιξώδες να αποτελεί μέτρο αντίστασης του υγρού στη ροή. Το μέτρο του ιξώδους είναι ο συντελεστής συνεκτικότητας ή συντελεστής εσωτερικής τριβής ή συντελεστής ιξώδους του υγρού. Όσο πιο παχύρρευστο είναι ένα υγρό, τόσο μεγαλύτερο ιξώδες λέμε ότι έχει.

Το ιξώδες μετριέται με ειδικό όργανο που λέγεται ιξωδόμετρο. Η μέτρηση γίνεται σε βαθμούς “Engler”, ή “Redwood”, ή “Saybolt”, κλπ, που παρέχονται από το εγχειρίδιο του οργάνου που χρησιμοποιούμε, κατά περίπτωση.

Κυκλοστροφικός Άνεμος

Κυκλοστροφικός χαρακτηρίζεται ο άνεμος που είναι αποτέλεσμα της τέλει ισορροπίας μεταξύ της δύναμης της πίεσης και της φυγόκεντρης δύναμης. Φαινόμενα στα οποία εμφανίζεται ο άνεμος αυτός είναι οι σίφωνες, οι ανεμοστρόβιλοι και η κυκλωνική/αντικυκλωνική ροή.

Λανθάνουσα Θερμότητα

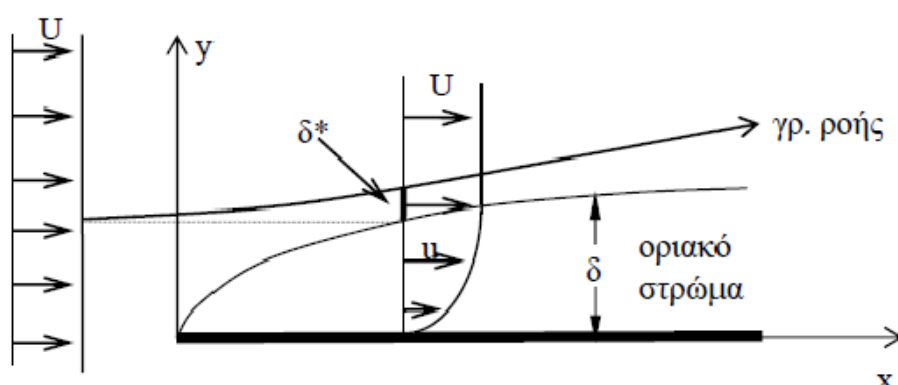
Λανθάνουσα θερμότητα είναι η θερμότητα που απαιτείται για την αλλαγή του νερού από την υγρή φάση στην αέρια φάση. Η εξάτμιση μπορεί να συμβεί χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας. Για μείγματα αέρα-νερού, η θερμοκρασία στην οποία έχουμε εξάτμιση εξαρτάται από την πίεση ατμών. Η εξάτμιση λαμβάνει χώρα στους 100°C σε πίεση 100kPa, και στους 18°C σε πίεση 2kPa.

Λανθάνουσα θερμότητα είναι πολύ μεγαλύτερη από την αισθητή θερμότητα. Η λανθάνουσα θερμότητα του νερού είναι 2500kJ/kg, ενώ όπως είπαμε και παραπάνω η

αισθητή θερμότητα του νερού είναι $4,2\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$. Δηλαδή, 600 φορές περισσότερη θερμότητα απαιτείται για να εξατμισθεί το νερό από ό, τι απαιτείται για να αυξήσει τη θερμοκρασία του κατά 1°C . Εναλλακτικά μπορούμε να πούμε ότι, 600 φορές περισσότερη θερμότητα απελευθερώνεται κατά τη συμπύκνωση ατμού σε υγρό σε σχέση με την ποσότητα της θερμότητας που απελευθερώνεται όταν η θερμοκρασία υγρού ύδατος μειώνεται κατά 1°C .

Οριακό Στρώμα

Λόγω της αλληλεπίδρασης του ρευστού και της επιφάνειας ενός σώματος δημιουργείται στο ρευστό μια περιοχή όπου η ταχύτητά του μεταβάλλεται από μηδέν, τιμή στην επιφάνεια, σε u , τιμή που έχει το ρευστό σε αρκετή απόσταση από την επιφάνεια. Η περιοχή αυτή είναι γνωστή ως υδροδυναμικό οριακό στρώμα. Αντίστοιχα η διαφορά θερμοκρασίας ρευστού και επιφάνειας δημιουργεί μια περιοχής το ρευστό όπου η θερμοκρασία μεταβάλλεται από T_s για $y=0$ έως την τιμή T^∞ στην αδιάστατη ροή. Η περιοχή αυτή αποτελεί το θερμοκρασιακό οριακό στρώμα. [28]



Εικόνα 4: Υδροδυναμικό οριακό στρώμα.

Περιοριστής Ροής, Περιορισμός – Flow Restrictor, Restriction

Ένας περιοριστής ροής είναι μια συσκευή σχεδιασμένη για να περιορίζει την ποσότητα του υγρού ή αερίου, που βγαίνει από μια οποιαδήποτε παροχή. Επίσης περιορισμός μπορεί να θεωρηθεί μια βαλβίδα ή μια στένωση σε μια σωλήνα, όπως για παράδειγμα ο λαϊμός ενός συγκλίνοντος αποκλίνοντος ακροφύσιου.

Πύργοι Ψύξης

Πύργοι ψύξης είναι συσκευές απομάκρυνσης θερμότητας που χρησιμοποιούνται για την απόρριψη θερμότητας στην ατμόσφαιρα. Οι πύργοι ψύξης μπορεί είτε να χρησιμοποιούν την εξάτμιση του νερού για την απομάκρυνση της θερμότητας και την ψύξη του εργαζόμενου μέσου κοντά στη θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα ή, στην περίπτωση των ξηρών πύργων ψύξης κλειστού κυκλώματος, βασίζονται αποκλειστικά σε αέρα για την ψύξη του εργαζόμενου μέσου σχεδόν στη θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα. Οι εφαρμογές των πύργων ψύξης περιλαμβάνουν την ψύξη του νερού που χρησιμοποιείται στα διυλιστήρια πετρελαίου, πετροχημικών και άλλα χημικά εργοστάσια, σταθμούς παραγωγής θερμικής ενέργειας και τα συστήματα κλιματισμού για ψύξη κτιρίων. Οι κύριοι τύποι των πύργων ψύξης είναι φυσικής και εξαναγκασμένης ροής. Η ταξινόμηση γίνεται με βάση στον τύπο της επαγωγής του αέρα μέσα στον πύργο. Οι φυσικής ροής χρησιμοποιούν την άνωση που προκαλεί η ψηλή καπνοδόχος. Θερμός, υγρός αέρας ανεβαίνει φυσικά λόγω της διαφοράς πυκνότητας σε σύγκριση με τον ξηρό και ψυχρό εξωτερικό αέρα. Οι πύργοι εξαναγκασμένης ροής χρησιμοποιούν ανεμιστήρες με μηχανοκίνητο μοτέρ για να σπρώξουν ή να τραβήξουν τον αέρα μέσα στον πύργο.

Σε ότι αφορά τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας οι τύποι πύργων είναι: Πρώτων οι πύργοι ξηράς ψύξης που λειτουργούν με μεταφορά θερμότητας μέσω μιας επιφάνειας που χωρίζει το εργαζόμενο ρευστό από τον ατμοσφαιρικό αέρα, όπως σε ένα εναλλάκτη θερμότητας αέρα, αξιοποιώντας τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και δεν χρησιμοποιούν την εξάτμιση. Δεύτερων οι υγροί πύργοι ψύξης ή πύργοι ψύξης ανοικτού κυκλώματος που λειτουργούν με βάση την αρχή της ψύξης μέσω εξάτμισης. Σε αυτούς το εργαζόμενο ρευστό και το εξατμιζόμενο ρευστό (συνήθως νερό) είναι το ίδιο. Και τέλος οι πύργοι ψύξης κλειστού κυκλώματος που είναι υβριδικές κατασκευές και περνούν το εργαζόμενο μέσο από μια δέσμη σωλήνων, στην οποία ψεκάζεται καθαρό νερό και εφαρμόζεται η εξαναγκασμένη ροή αέρα μέσω ανεμιστήρα. Η μεταφορά θερμότητας με αυτό τον τρόπο είναι πολύ πιο κοντά σε εκείνη του υγρού πύργου ψύξης με το πλεονέκτημα της προστασίας του εργαζόμενου ρευστού από την περιβαλλοντική έκθεση, που παρέχει ένας ξηρός πύργος ψύξης.

Πλούμιο

Το πλούμιο, από την αγγλική λέξη plume, είναι μια στήλη από ένα ρευστό που κινείται μέσα σε ένα άλλο. Πολλοί παράγοντες ελέγχουν την κίνηση του ρευστού, όπως η ορμή, η διάχυση και η άνωση.

Συναγωγή

Η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί μέσω ακτινοβολίας, αγωγής ή συναγωγής. Σώματα χαμηλής θερμοκρασίας, όπως η επιφάνεια της γης και η ατμόσφαιρα εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία. Υπέρυθρη ακτινοβολία είναι αναποτελεσματική στη μετάδοση της θερμότητας προς τα πάνω στην ατμόσφαιρα, επειδή απορροφάται από την ατμόσφαιρα, κυρίως από υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα. Η αγωγιμότητα είναι η κύρια διαδικασία μεταφοράς θερμότητας στα στερεά. Όταν ένα αέριο θερμαίνεται από τον πυθμένα η συμβολή της αγωγής είναι αμελητέα σε σχέση με τη συμβολή της συναγωγής. Η συναγωγή θερμότητας είναι η μεταφορά θερμότητας που προκύπτει από την αλλαγή της θέσης

θερμών και ψυχρών μαζών ρευστού. Στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, εκτός της διάχυσης δηλαδή από τυχαίες κινήσεις των μορίων, μεταφέρεται θερμική ενέργεια και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού. Η συναγωγή θερμότητας εμφανίζεται μεταξύ της επιφάνειας ενός σώματος και του ρευστού όταν έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Όταν $T_s > T_\infty$ υπάρχει μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια στο ρευστό με συναγωγή. Η συναγωγή θερμότητας κυρίως ενισχύεται τόσο από τη διάχυση των μορίων όσο και από την κίνηση του ρευστού στο οριακό στρώμα. Η συνεισφορά της διάχυσης στη συνολικά μεταφερόμενη θερμότητα υπερισχύει κοντά στην επιφάνεια, όπου η ταχύτητα του ρευστού είναι χαμηλή, ενώ στα σημεία επαφής η μεταφορά γίνεται μόνο με αγωγή. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή διακρίνεται στην εξαναγκασμένη και την ελεύθερη. Η εξαναγκασμένη εμφανίζεται όταν η κίνηση του ρευστού επιβάλλεται από εξωτερικά αίτια (ανεμιστήρας, αντλία κτλ.) ενώ η ελεύθερη προκαλείται από δυνάμεις οι οποίες δημιουργούνται από τη μεταβολή της πυκνότητας. Στην τροπόσφαιρα η θερμότητα μεταφέρεται προς τα άνω από την συναγωγή από την ανοδική ροή του θερμού αέρα και την καθοδική ροή του ψυχρού αέρα.

Υδρόσφαιρα

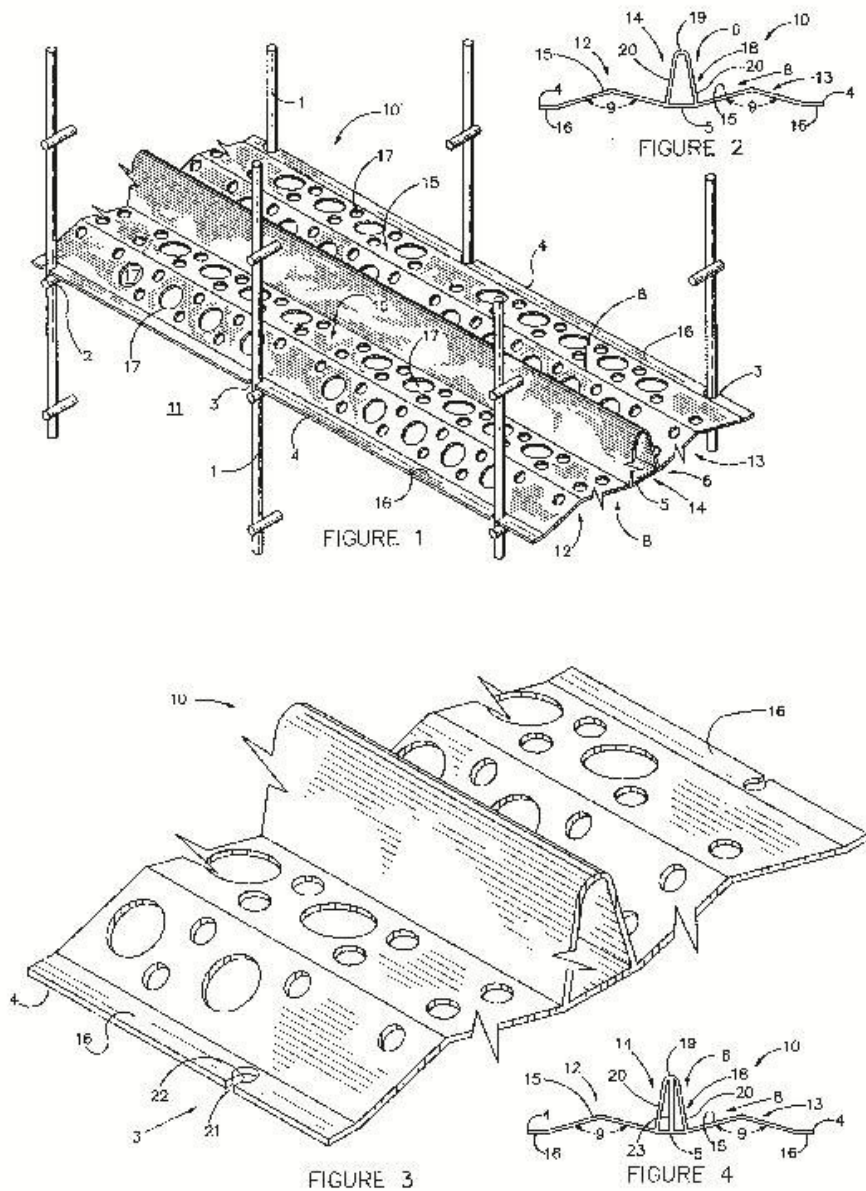
Με τον όρο υδρόσφαιρα χαρακτηρίζεται το υδάτινο περίβλημα της Γής, που αποτελούν οι ωκεανοί, θάλασσες, λίμνες και ποταμοί και στο οποίο συμπεριλαμβάνεται το σύνολο των υπογείων υδάτων καθώς και εκείνο των υδρατμών της ατμόσφαιρας. Περιλαμβάνεται, δηλαδή, το νερό σε οποιαδήποτε κατάσταση κι αν αυτό βρίσκεται (π.χ. νέφος, πάγος κλπ) και σε οποιαδήποτε μορφή κατακρημνισμάτων.

Ύφεση

Ύφεση ονομάζεται ένα χαμηλό βαρομετρικό. Πρόκειται για μια περιοχή όπου επικρατούν χαμηλότερες τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης από τις γειτονικές περιοχές. Λόγω της διαφοράς πίεσης με τις γειτονικές περιοχές (βαροβαθμίδα), ο αέρας κινείται από την περιφέρεια προς το κέντρο της ύφεσης. Όμως, η διεύθυνση των ανέμων γύρω από ένα βαρομετρικό χαμηλό δεν είναι κάθετη προς τις ισοβαρείς καμπύλες. Ο άνεμος κινείται αντίθετα με τους δείκτες του ρολογιού σταδιακά προς το κέντρο της ύφεσης. Έτσι, στα ανατολικά της περιοχής του χαμηλού βαρομετρικού επικρατούν νότιοι άνεμοι, στα δυτικά επικρατούν βόρειοι άνεμοι, στα νότια του επικρατούν δυτικοί άνεμοι και, στα βόρεια του, επικρατούν ανατολικοί άνεμοι.

Splash Bar

Μία splash bar προορίζεται για χρήση σε έναν πύργο ψύξεως νερού, η splash bar περιλαμβάνει ένα επίμηκες τμήμα που έχει μία σωληνοειδή κεντρική νεύρωση και ένα πλήθος από πτερύγια, κάθε πτερύγιο εκτείνεται πλευρικά από την κεντρική νεύρωση και το καθένα έχει μία πληθώρα ανοιγμάτων. Προτιμάμε η επιφάνεια που σχηματίζεται από τα στελέχη πτερυγίων να έχει κλίση, και η σωληνοειδής κεντρική νεύρωση να έχει τριγωνική διατομή.



Εικόνα 5: Σχέδιο Splash Bar για πύργους ψύξης. [36]

Θερμό νερό εισάγεται στην κορυφή του πύργου ψύξης και διανέμεται στις splash bars. Καθώς τα σταγονίδια νερού πέφτουν προς τα κάτω στον πύργο, οι επιφάνειες των σταγονιδίων υπόκεινται σε εξάτμιση επομένως τα σταγονίδια ψύχονται. Με τον κατακερματισμό μεγάλων σταγόνων και παρέχοντας μια επιφάνεια στην οποία το νερό μπορεί να σχηματιστεί ένα λεπτό φιλμ, οι splash bars αυξάνουν την επιφάνεια του νερού που εκτίθεται στον αέρα, και επομένως το ρυθμός εξάτμισης.

4. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΝΗΣ

Εισαγωγή

Η ατμόσφαιρα που περιβάλλει τη γη είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες διατήρησης της ζωής στον πλανήτη μας. Χωρίς αυτή, η ύπαρξη ζωής θα ήταν αδύνατη. Το κατώτερο άκρο της ατμόσφαιρας είναι η επιφάνεια της γης. Σε ό,τι αφορά το άνω άκρο της, δεν μπορούμε να απαντήσουμε με σιγουριά πού τελειώνει. Σύμφωνα με μετρήσεις, το 99,99997% της ατμόσφαιρας περικλείεται σε ύψος 100km από την επιφάνεια της γης. Όλα τα φαινόμενα που παρατηρούμε στον ουρανό και επηρεάζουν τόσο άμεσα τη ζωή μας συμβαίνουν εντός ενός λεπτού, σε σχέση με την ακτίνα της γης, στρώματος αέρα που το ύψος του δεν ξεπερνά τα 100km. Κατά συνέπεια, η κίνηση των αέριων μαζών της ατμόσφαιρας είναι κατά κύριο λόγο παράλληλη προς την επιφάνεια της Γης. Όπως θα δούμε και παρακάτω πιο αναλυτικά, η οριζόντια ταχύτητα του αέρα είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την κατακόρυφη, παρόλα αυτά όμως οι κατακόρυφες μετατοπίσεις αέριων μαζών παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο για τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα και σε καμιά περίπτωση δεν μπορούμε να τις αγνοήσουμε.

Σύσταση

Η ατμόσφαιρα αποτελείται από ένα μίγμα αέριων, νερού καθώς επίσης και μικροσκοπικών σωματιδίων. Τα αέρια αυτά κατηγοριοποιούνται σε μόνιμα, που αποτελούν ένα μόνιμο ποσοστό της ατμοσφαιρικής μάζας και σε μεταβλητά, των οποίων η σύσταση και η συγκέντρωση ποικίλει ανάλογα με το χώρο και το χρόνο.

Συστατικό Στοιχείο	Μοριακός Τύπος	Ποσοστό % του Ατμοσφαιρικού Όγκου	Μοριακό Βάρος
Άζωτο	N ₂	78.08	28.01
Οξυγόνο	O ₂	20.95	32.00
Αργό	Ar	0.93	39.95
Νέο	Ne	0.002	20.18
Ήλιο	He	0.0005	4.00
Κρυπτό	Kr	0.0001	83.8
Ξένον	Xe	0.00009	131.3
Υδρογόνο	H ₂	0.00005	2.02

Πίνακας 1: Πίνακας Σύστασης Μόνιμων Αερίων [1]

Το άζωτο αποτελεί το 78% του όγκου της ατμόσφαιρας και είναι ένα σταθερό αέριο. Η διαδικασία με την οποία το άζωτο αναγεννάται στην ατμόσφαιρα είναι πολύ αργή και έχει περίοδο 42 εκατομμύρια χρόνια. Παρόλο που αποτελεί τόσο μεγάλο ποσοστό του αέρα, το καθαρό άζωτο παίζει μικρό ρόλο στα μετεωρολογικά και κλιματικά φαινόμενα. Το δεύτερο σε ποσότητα αέριο είναι το οξυγόνο που είναι πολύ σημαντικό για την ύπαρξη σχεδόν κάθε μορφής ζωής στον πλανήτη. Η περίοδος αναγέννησής του είναι περίπου 5000 χρόνια.

Συστατικό Στοιχείο	Μοριακός Τύπος	Ποσοστό % του Ατμοσφαιρικού Όγκου	Μοριακό Βάρος
Υδρατμός	H ₂ O	0.25	18.01
Διοξείδιο του Άνθρακα	CO ₂	0.037	44.01
Όζον	O ₃	0.01	48.00

Πίνακας 2: Πίνακας Σύστασης Μεταβλητών Αερίων [1]

Το σημαντικότερο από τα μεταβλητά αέρια είναι οι υδρατμοί. Σύμφωνα με τον υδρολογικό κύκλο, οι υδρατμοί παράγονται με την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια της γης και επιστρέφουν σε αυτή μέσω των κατακρημνισμάτων. Οι υδρατμοί συναντούνται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις κοντά στον ισημερινό (0,25% της μάζας του αέρα) ενώ μειώνονται καθώς απομακρυνόμαστε προς τους πόλους ή καθώς ανεβαίνουμε σε μεγαλύτερα ύψη. Το μέγιστο μέρος των υδρατμών βρίσκονται στα πρώτα 5km της ατμόσφαιρας. Παρόλο που φαίνεται ασήμαντο ποσοστιαία (0,25%) το νερό παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για το κλίμα. Θεωρείται ένα από τα αέρια του θερμοκηπίου καθώς έχει τη δυνατότητα να απορροφά μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας εκπεμπόμενα από την επιφάνεια της γης και να τα αποδίδει με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης στην ατμόσφαιρα προκαλώντας έτσι διάφορα καιρικά φαινόμενα.

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι επίσης ένα πολύ σημαντικό αέριο και η μεταβολή της σύστασής του στην ατμόσφαιρα μπορεί να επηρεάσει σε πολύ μεγάλο βαθμό το κλίμα. Το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται από την αναπνοή των φυτών και των ζώων, την αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων, τις ηφαιστειακές εκρήξεις και κυρίως από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα μέσω της φωτοσύνθεσης των φυτών. Όπως είναι γνωστό τις τελευταίες δεκαετίες η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα είναι πολύ μεγαλύτερη από την απομάκρυνση του και αυτό είναι συνέπεια τόσο της καύσης άνθρακα, υπό τη μορφή στερεών, υγρών και αερίων καυσίμων από τον άνθρωπο, όσο και της αποψίλωσης τεράστιων δασικών εκτάσεων. Όπως και οι υδρατμοί έτσι και το διοξείδιο του άνθρακα έχει την ιδιότητα να απορροφά την ενέργεια που εκπέμπει η γη. Έχει λοιπόν σημαντικό μερίδιο ευθύνης για την άνοδο της θερμοκρασίας του πλανήτη.

Ένα επίσης σημαντικό ατμοσφαιρικό αέριο είναι το όζον του οποίου η ατομική μορφή αποτελείται από τρία άτομα οξυγόνου. Η ύπαρξη του όζοντος στα υψηλά τμήματα της

ατμόσφαιρας είναι πολύ σημαντική για την ύπαρξη και τη διατήρηση της ζωής, κοντά στην επιφάνεια της γης όμως είναι σοβαρός ρυπαντής καθώς προκαλεί ερεθισμό στους πνεύμονες και τα μάτια ενώ είναι καταστροφικό για τη βλάστηση. Ευτυχώς το όζον συναντάται χαμηλά στην ατμόσφαιρα σε πολύ μικρές ποσότητες, κυρίως σε αστικές ζώνες υψηλής ρύπανσης. Ψηλά στην ατμόσφαιρα, το όζον λειτουργεί σα φίλτρο για τις θανατηφόρες υπεριώδεις ακτίνες από τον ήλιο. Δημιουργείται όταν ένα άτομο οξυγόνου συγκρουστεί με ένα μόριο του και διαλύεται ξανά απορροφώντας την υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτός είναι και ο συνεχής κύκλος του όζοντος στη στρατόσφαιρα.

Το τελευταίο από τα σημαντικά μεταβλητά αέρια είναι το μεθάνιο που υπάρχει στην ατμόσφαιρα εδώ και εκατοντάδες χιλιάδες χρονιά, αλλά η συγκέντρωσή του έχει σημαντικά αυξηθεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Είναι και αυτό ένα αέριο υψηλής απορρόφησης της θερμικής ακτινοβολίας από τη γη και συμβάλλει αντίστοιχα στην άνοδο της θερμοκρασίας της.

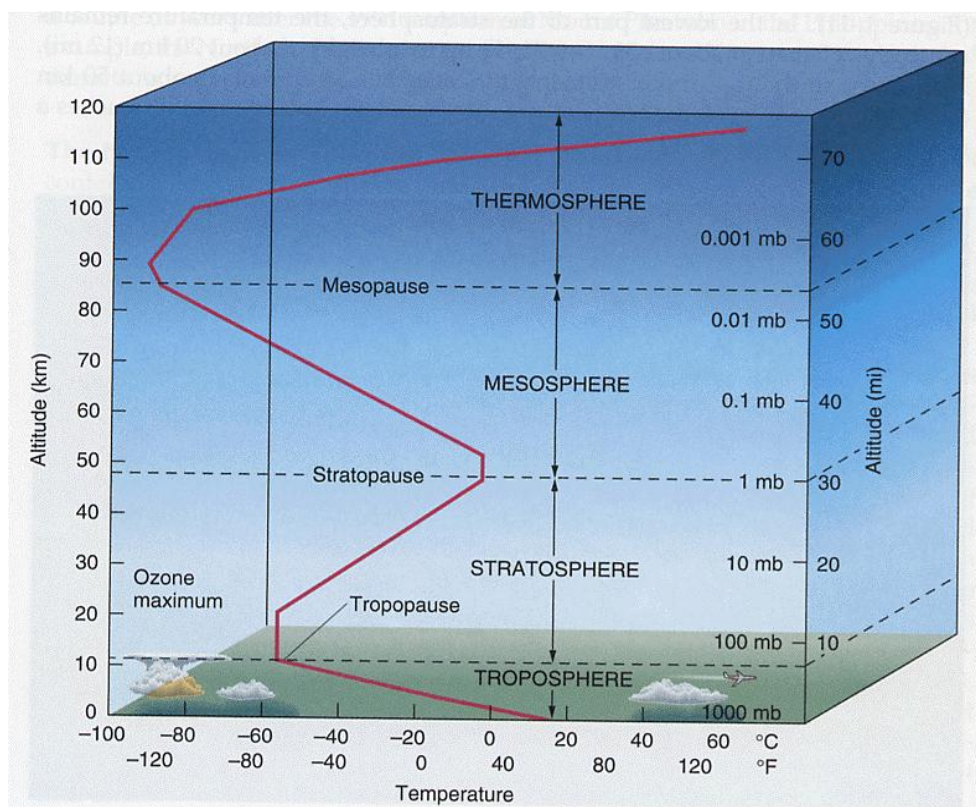
Τέλος μια κατηγορία αέριων της ατμόσφαιρας είναι τα κάθε είδους “αεροζόλ” που είναι μικρά στερεά σωματίδια και υγρά σταγονίδια και η προέλευσή τους είναι τόσο φυσική όσο και ανθρωπογενής. Τα μεγέθη τους είναι της τάξης του μικρομέτρου, γεγονός που σε συνδυασμό με την ηλεκτρική τους φόρτιση εξηγεί τη διατήρησή τους σε αιώρηση στην ατμόσφαιρα. Απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα μέσω των κατακρημνίσεων και είναι ορατά στην ατμόσφαιρα με τη μορφή σκόνης και αστικού νέφους. [1]

Κατακόρυφη Δομή της Ατμόσφαιρας

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η ατμόσφαιρα δεν έχει ένα ξεκάθαρο ανώτατο όριο και η πυκνότητά της μειώνεται όσο ανεβαίνουμε ψηλότερα ενώ ταυτόχρονα η σύσταση της παραμένει σχεδόν σταθερή. Παρόλα αυτά όμως έχουμε καταλήξει σε ένα κατακόρυφο διαχωρισμό της σε διακριτά στρώματα βασισμένοι σε χαρακτηριστικά, όπως είναι η θερμοκρασία ή τα ηλεκτρικά φορτία. Με βάση τη θερμοκρασία ο διαχωρισμός γίνεται σε τέσσερα στρώματα: τροπόσφαιρα, στρατόσφαιρα, μεσόσφαιρα και θερμόσφαιρα.

Η τροπόσφαιρα είναι το κατώτερο ατμοσφαιρικό στρώμα και παρόλο το μικρό συγκριτικά ύψος της (8-16km), περιέχει το 80% του συνολικού ατμοσφαιρικού αέρα. Μέσα στην τροπόσφαιρα λαμβάνουν χώρα η πλειονότητα των καιρικών φαινομένων. Η θερμοκρασία εντός της τροπόσφαιρας διαφέρει πολύ, καθώς η μέση θερμοκρασία κοντά στο έδαφος είναι 15°C ενώ στην κορυφή της τροπόσφαιρας -57°C περίπου. Έχουμε δηλαδή μια μέση πτώση 6,5°C /km. Στη κορυφή της τροπόσφαιρας έχουμε μια ζώνη, την τροπόπαυση, στην οποία η θερμοκρασία σταματά να πέφτει και η οποία σηματοδοτεί την έναρξη της στρατόσφαιρας. Σε αντίθεση με το γενικό κανόνα που μόλις περιγράψαμε, που υπαγορεύει την πτώση της θερμοκρασίας όσο ανεβαίνουμε, δεν είναι ασυνήθιστο και το αντίστροφο. Η στρατόσφαιρα ακολουθεί την τροπόσφαιρα και περιέχει το 19,9% της συνολικής αέριας μάζας της ατμόσφαιρας. Με εξαίρεση κάποιες πολύ δυνατές καταιγίδες που ξεφεύγουν από την τροπόσφαιρα, στη στρατόσφαιρα δεν εμφανίζονται καιρικά φαινόμενα. Στο χαμηλότερο κομμάτι της στρατόσφαιρας η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στους -57°C αλλά καθώς ανεβαίνουμε παρατηρούμε αύξησή της στους -2°C. Αυτή η αύξηση στη

θερμοκρασία είναι προϊόν, πρώτον, της ζώνης του όζοντος, που βρίσκεται στην στρατόσφαιρα και απορροφά την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, και, δεύτερον της θερμικής ακτινοβολίας που εκλύεται από τη γη. Το θεωρητικό πάνω όριο της στρατόσφαιρας είναι η στρατόπαυση και σε αυτή τη ζώνη η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Εύκολα μπορούμε να συμπεράνουμε από τα παραπάνω ότι η μεσόσφαιρα και η θερμόσφαιρα περιέχουν μαζί μόλις το 0,1% της μάζας του ατμοσφαιρικού αέρα. Σχεδόν όλη αυτή η μάζα βρίσκεται στη μεσόσφαιρα η οποία εκτείνεται μέχρι τα 80km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Όπως και στην τροπόσφαιρα έτσι και στη μεσόσφαιρα έχουμε πτώση της θερμοκρασίας με την αύξηση του υψόμετρου. Αυτό συμβαίνει γιατί έχουμε απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας σχεδόν μονό στη βάση της μεσόσφαιρας και από εκεί η θερμότητα διασκορπίζεται με την κατακόρυφη κίνηση του αέρα. Πάνω από την μεσόσφαιρα έχουμε τη θερμόσφαιρα στην οποία οι θερμοκρασίες μπορεί και να ξεπερνούν τους 1500°C. Σε αυτή τη ζώνη η θερμοκρασία χάνει την έννοιά της καθώς η πυκνότητα του αέρα είναι ελάχιστη και οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων του αέρα πολύ μεγάλες ενώ η κινητική τους ενέργεια πολύ υψηλή.



Εικόνα 6: Διαίρεση της ατμόσφαιρας με βάση το θερμοκρασιακό προφίλ. [1]

Εκτός από τα τέσσερα στρώματα της ατμόσφαιρας που διακρίνονται με βάση τη θερμοκρασία, έχουμε και την ιονόσφαιρα, ένα στρώμα με ξεχωριστές ηλεκτρικές ιδιότητες, όσον αφορά τα ατμοσφαιρικά σωματίδια που εκεί συναντώνται. Η ιονόσφαιρα εκτείνεται από τη μεσόσφαιρα μέχρι τη θερμόσφαιρα και περιέχει ιόντα, άτομα ή μόρια δηλαδή φορτισμένα θετικά ή αρνητικά. Η ηλεκτρική φόρτιση των σωματιδίων αυτών οφείλεται

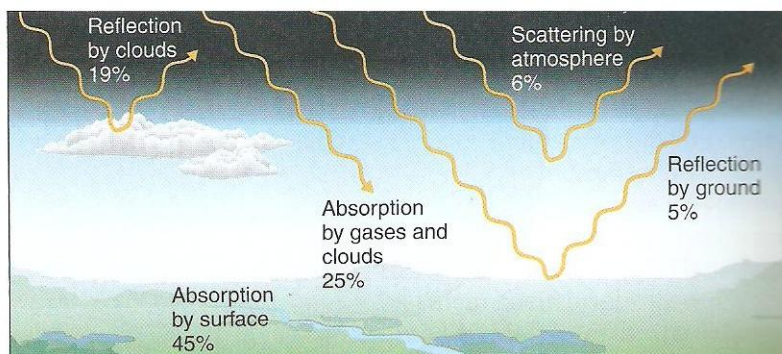
στην ηλιακή ενέργεια. Ένα σημαντικό φαινόμενο που παρατηρείται στην ιονόσφαιρα είναι το βόρειο και νότιο σέλας. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε υποατομικά σωματίδια που παγιδεύονται από το μαγνητικό πεδίο της γης και διεγείρουν τα άτομα των στοιχείων του ατμοσφαιρικού αέρα.[1]

Καιρικά Φαινόμενα

Με τον γενικό όρο καιρός εννοείται η κατάσταση της ατμόσφαιρας σε συγκεκριμένο τόπο και χρόνο από την άποψη της θερμοκρασίας, της πίεσης της υγρασίας και του υφισταμένου ανέμου (ένταση και διεύθυνση), με ό,τι άλλο φαινόμενο συνοδεύει αυτά, τόσο στην ξηρά, όσο και στη θάλασσα ή στον υπερκείμενο αέρα του ίδιου πάντα τύπου. Η επιστήμη που εξετάζει τον καιρό είναι η Μετεωρολογία. Συνεπώς, θα μπορούσε να ορισθεί ότι καιρός είναι το σύνολο των μετεωρολογικών παραμέτρων σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία και κατά μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Ενέργεια

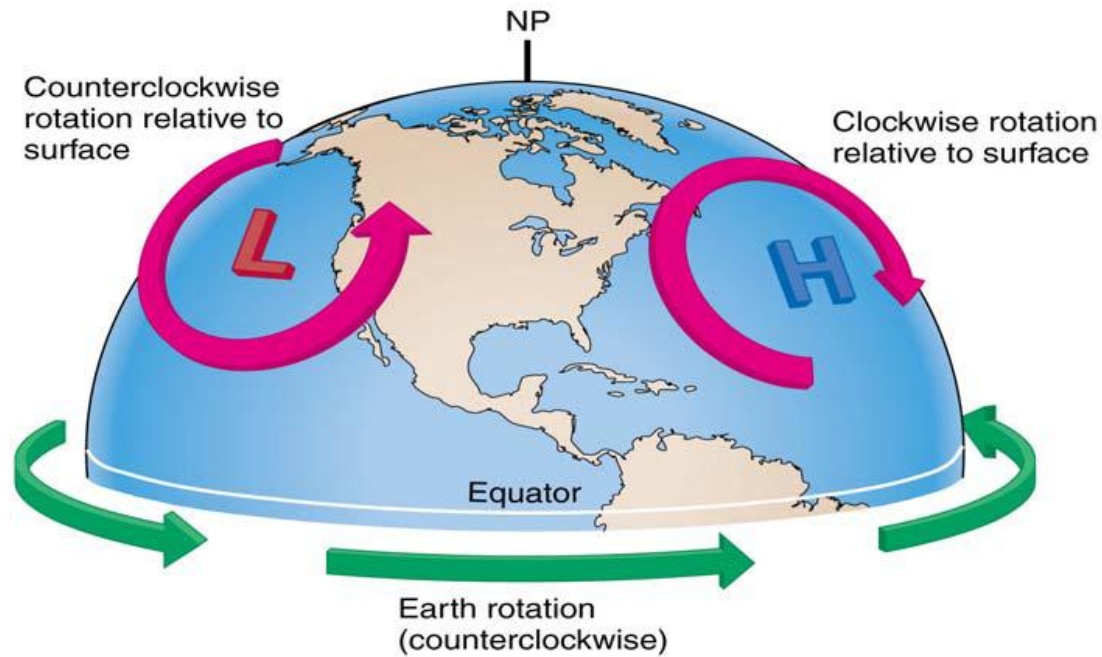
Η ενέργεια που απαιτείται για όλες τις διεργασίες που συμβαίνουν εντός της ατμόσφαιρας είναι αυτή που προσφέρει ο ήλιος. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα το μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας απορροφάται από το όζον. Επιπλέον, ένα μεγάλο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας απορροφάται στην τροπόσφαιρα από τους υδρατμούς κυρίως αλλά και από άλλα συστατικά της αέριας μάζας. Έτσι, αν συνυπολογίσουμε την ανάκλαση, τη σκέδαση και την απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα μόρια του ατμοσφαιρικού αέρα, το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γής είναι λίγο μεγαλύτερο από το 50% της ακτινοβολίας που αρχικά εισέρχεται στην ατμόσφαιρα. Από αυτή την ακτινοβολία ένα ποσοστό, ανάλογα με το είδος της επιφάνειας, θα ανακλαστεί και πάλι προς την ατμόσφαιρα ενώ το υπόλοιπο θα απορροφηθεί από το έδαφος και το νερό. Η ποσότητα της ενέργειας που τελικά προσδίδεται στην ατμόσφαιρα και τη γη δεν είναι σταθερή για όλα τα γεωγραφικά πλάτη όπως φαίνεται και από τις θερμοκρασίες που επικρατούν στα διάφορα σημεία της υδρογείου. Οι περιοχές γύρω από τον ισημερινό δέχονται περισσότερη ενέργεια από ό,τι οι περιοχές κοντά στους πόλους. Αυτή η ανισοκατανομή της ενέργειας είναι που προκαλεί τα θαλάσσια και αέρια ρεύματα της Γής. [1]



Εικόνα 7: Η εισερχόμενη στην ατμόσφαιρα ηλιακή ακτινοβολία. [1]

Άνεμος και Κυκλοφορία

Η κίνηση και η ταχύτητα του αέρα είναι ευθεία συνέπεια της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η διαφορά ατμοσφαιρικής πίεσης από ένα μέρος της γης σε ένα άλλο προκαλεί την οριζόντια μετατόπιση του αέρα από το σημείο με την υψηλότερη πίεση σε αυτό με τη χαμηλότερη. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά πίεσης τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ταχύτητα με την οποία θα κινηθεί ο αέρας από το ένα σημείο στο άλλο. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι ο αέρας κινείται ανοδικά σε σημεία με χαμηλή επιφανειακή πίεση και βυθίζεται σε ζώνες με υψηλή πίεση. Η διαφοροποίηση αυτή είναι σημαντική, καθώς η ανοδική κίνηση του αέρα ευνοεί το σχηματισμό σύννεφων σε αντίθεση με την καθοδική του. Διαφορές πίεσης έχουμε τόσο στον οριζόντιο όσο και στον κατακόρυφο άξονα. Στον οριζόντιο άξονα οι αλλαγές της πίεσης, αν και μικρότερες συγκριτικά με τον κατακόρυφο, προκαλούν πολύ ισχυρούς άνεμους. Η κατακόρυφη αλλαγή της ατμοσφαιρικής πίεσης, αν και πολύ μεγάλη αντισταθμίζεται από την βαρυτική δύναμη της Γής προκαλώντας έτσι υδροστατική ισορροπία. Εκτός από την ατμοσφαιρική πίεση και τις διαφορές της, οι άνεμοι επηρεάζονται και από τη δύναμη Coriolis και την τριβή. Η περιστροφική κίνηση της Γής προκαλεί την στροφή του ανέμου. Αυτό ονομάζεται φαινόμενο Coriolis. Ο άνεμος στο βόρειο ημισφαίριο στρίβει προς τα δεξιά ενώ στο νότιο στρίβει προς τα αριστερά.

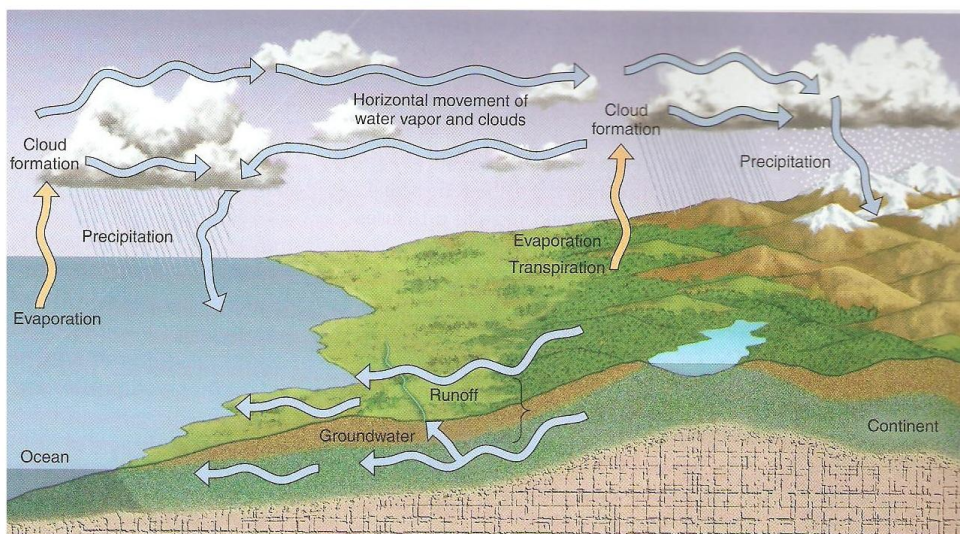


Εικόνα 8: Περιστροφή της Γής και σχετική στροβιλότητα του αέρα. [1]

Όταν ο άνεμος στρέφεται αντιωρολογιακά στο βόρειο ή ωρολογιακά στο νότιο ημισφαίριο, η ροή ονομάζεται κυκλωνική. Στην αντίθετη περίπτωση λέμε ότι έχουμε αντικυκλωνική κυκλοφορία. Επίσης πρέπει να σταθούμε στην αλληλεπίδραση του αέρα με τους ωκεανούς. Το φαινόμενο El Niño είναι χαρακτηριστικό αφού παρατηρούμε ανέμους μεγάλης κλίμακας να ξεκινούν την κίνηση των θαλάσσιων ρευμάτων και αυτά με τη σειρά τους να επηρεάζουν το φορτίο του αέρα σε ενέργεια και υγρασία. Η ένταση του αέρα μετριέται στην εμπειρική κλίμακα Μποφόρ (Beaufort Wind Force Scale), που βασίζεται στην παρατήρηση των αποτελεσμάτων του ανέμου στη στεριά ή τη θάλασσα. [1]

Ο Κύκλος του Νερού

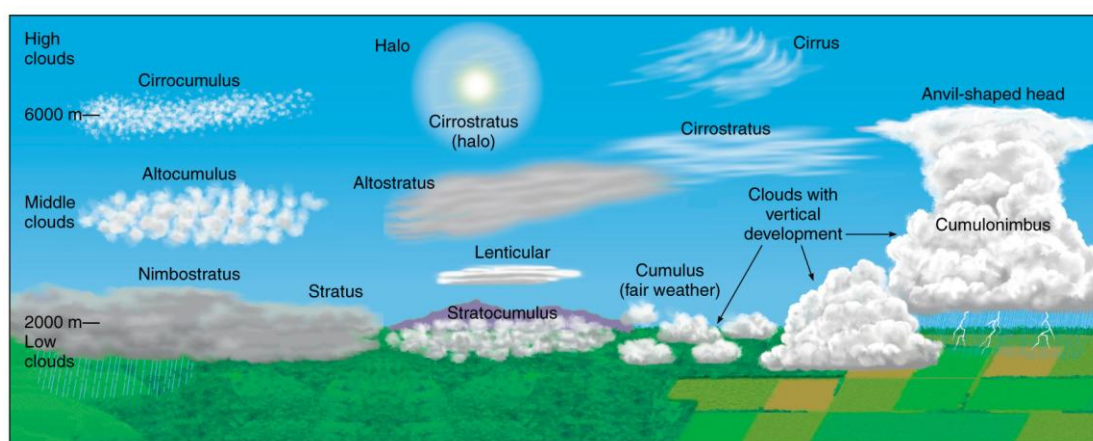
Το νερό είναι πολύ σημαντικό για διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας παρόλο που αποτελεί μικρό ποσοστό των συστατικών της ατμόσφαιρας. Με βάση τον υδρολογικό κύκλο, το νερό ανακυκλώνεται στην ατμόσφαιρα και την υδρόσφαιρα της Γής και συναντάται και στις τρεις καταστάσεις (στερεά, υγρά και αέρια). Θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία, εξατμίζεται από την επιφάνεια της γης και στη συνέχεια ανεβαίνει στα υψηλότερα τμήματα της ατμόσφαιρας στη μορφή ατμού όπου, είτε θα παραμείνει σχηματίζοντας σύννεφα είτε θα συμπυκνωθεί για να επιστρέψει σαν βροχή, χιόνι, χαλάζι κτλ. [1]



Εικόνα 9: Υδρολογικός Κύκλος. [1]

Σύννεφα

Τα σύννεφα δημιουργούνται είτε με ανάμιξη ζεστού και υγρού αέρα με κρύο και ξηρό είτε κυρίως όταν κατεβαίνει η θερμοκρασία του αέρα στο σημείο δρόσου. Η ψύξη αυτή του αέρα είναι συνήθως αδιαβατική και παρατηρείται όταν ο αέρας κινείται ανοδικά στην ατμόσφαιρα καταλαμβάνοντας μεγαλύτερο όγκο. Αυτός είναι και ο κύριος μηχανισμός σχηματισμού των σύννεφων. Οι λόγοι για τους οποίους ο αέρας ανυψώνεται στην ατμόσφαιρα έχουν να κάνουν με τη στατική ευστάθεια της ατμόσφαιρας. Η στατική ευστάθεια καθορίζεται από την κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα. Τα σύννεφα χωρίζονται σε δέκα διαφορετικές κατηγορίες με βάση το ύψος στο οποίο βρίσκονται και την μορφή τους. [1]



Εικόνα 10: Χάρτης Σύννεφων. [1]

Ψηλά Σύννεφα (>6 km)	Σύννεφα Μέσου Ύψους (μεταξύ 2 και 6 km)	Σύννεφα Μικρού Ύψους (<2 km)	Σύννεφα Κατακόρυφης Εξέλιξης
Cirrus (Ci)	Altostratus (As)	Stratus (St)	Cumulus (Cu)
Cirrostratus (Cs)	Alto cumulus (Ac)	Nimbostratus (Ns)	Cumulonimbus (Cb)
Cirrocumulus (Cc)		Stratocumulus (Sc)	

Πίνακας 3: Βασικά Είδη Σύννεφων. [1]

Κατακρημνίσματα

Δεν παράγουν όλα τα σύννεφα κατακρημνίσματα. Αυτό συμβαίνει γιατί τα σταγονίδια του νερού ή οι παγοκρύσταλλοι που βρίσκονται σε ένα σύννεφο πρέπει να μεγαλώσουν αρκετά ώστε να βαρύνουν και να πέσουν στην επιφάνεια της Γής. Ένα μέρος της “ωρίμανσης” των σταγονιδίων είναι η υγροποίηση του ατμού. Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί όμως με τους οποίους τα σταγονίδια του νερού μεγαλώνουν είναι η σύγκρουση και η συνένωση καθώς επίσης και η διαδικασία Bergeron. Βάσει αυτής έχουμε εξάτμιση του υγρού νερού και στη συνέχεια επικάλυψη του ατμού στους παγοκρυστάλλους με αποτέλεσμα την ταχύτατη αύξηση του μεγέθους τους. Τα κατακρημνίσματα εμφανίζονται με πολλές μορφές. Οι βροχές δημιουργούνται είτε από τη συνένωση πολλών σταγονιδίων νερού είτε από το λιώσιμο των παγοκρυστάλλων και των χιονονιφάδων. Στην περίπτωση που οι θερμοκρασίες είναι αρκετά χαμηλές, ο πάγος δε λιώνει πριν να φτάσει στην επιφάνεια της γης οπότε και χιονίζει. Ειδικότερα στην περίπτωση του χαλαζιού, το νερό παγώνει επανειλημμένα σχηματίζοντας σφαιρίδια πάγου καθώς τα ανωρέματα κατεβάζουν τη θερμοκρασία χαμηλότερα από το σημείο πήξης [1]

Καταιγίδες

Καταιγίδα ονομάζεται κάθε βίαιη ατμοσφαιρική διαταραχή που συνοδεύεται από ηλεκτρικές εκκενώσεις. Σχεδόν πάντα εμφανίζεται έντονη βροχόπτωση, ισχυροί άνεμοι μεταβλητής έντασης και διεύθυνσης και μερικές φορές χαλάζι. Ανάλογα με την περιοχή που εκδηλώνεται η καταιγίδα, μπορεί να εμφανίζονται και σίφωνες. Μία μέση καταιγίδα έχει διάμετρο της τάξης των 40 χιλιομέτρων. Γενικά, για να δημιουργηθεί μια καταιγίδα πρέπει να εμφανιστεί μια ασταθής μάζα αέρα πλούσια σε υγρασία. Αστάθεια έχουμε όταν παρουσιάζεται μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο (θερμό) έδαφος και την (ψυχρή) ανώτερη ατμόσφαιρα. Όταν η καθ' ύψος θερμοκρασία του αέρα μειώνεται έντονα σταδιακά (με ρυθμό τουλάχιστον 0,6 βαθμούς Κέλβιν ανά 100 μέτρα), οι χαμηλότερες και θερμότερες αέριες μάζες αρχίζουν να κινούνται ανοδικά, αφού είναι ελαφρύτερες από τα υπερκείμενα στρώματα. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να συντρέχει και η ύπαρξη αυξημένης υγρασίας στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, κοντά στο έδαφος.

Οι καταιγίδες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους και αυτές είναι οι:

1) **Καταιγίδες αέριας μάζας (τοπικές ή θερμικές)**

Οι καταιγίδες αυτές είναι αποτέλεσμα είτε της έντονης θέρμανσης της επιφάνειας του εδάφους, που έχει ως συνέπεια ισχυρές ανοδικές κινήσεις αερίων μαζών και σύγκλισή τους στην επιφάνεια του εδάφους, είτε της κίνησης ψυχρών αερίων μαζών πάνω από θερμές επιφάνειες με συνέπεια να δημιουργείται αστάθεια.

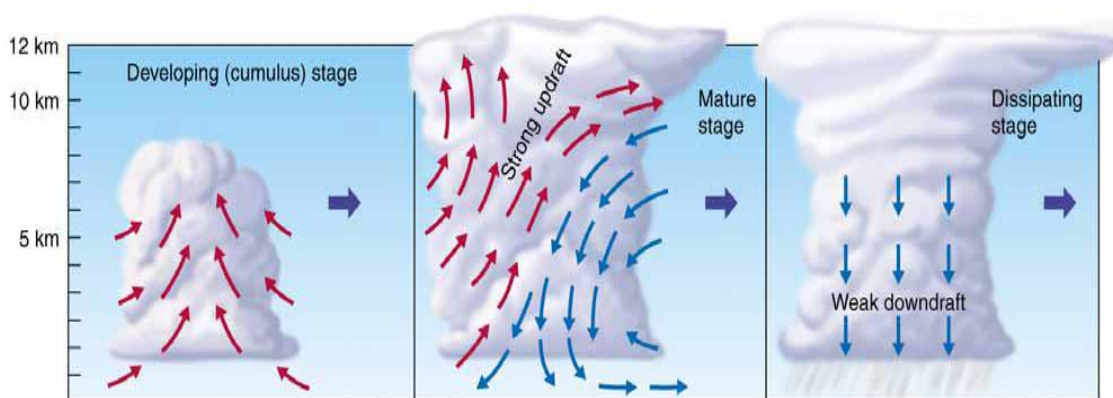
2) **Καταιγίδες ορογραφικές**

Οι καταιγίδες, στην περίπτωση αυτή, δημιουργούνται όταν υγρή και ασταθής αέρια μάζα αναγκάζεται να υπερπηδήσει μία οροσειρά, οπότε ψύχονται με αποτέλεσμα το σχηματισμό καταιγιδοφόρων νεφών.

3) **Καταιγίδες μετωπικές**

Οι μετωπικές καταιγίδες δημιουργούνται στα σύνορα θερμών και ψυχρών μετώπων αέρα. Το αίτιό τους είναι δυναμικό, καθώς η θερμή αέρια μάζα αναγκάζεται σε άνοδο όταν ο ψυχρός αέρας σφηνώνεται κάτω από το θερμό. Οι καταιγίδες των ψυχρών μετώπων είναι πιο έντονες από τις καταιγίδες των θερμών μετώπων καθώς η ανοδική κίνηση του θερμού αέρα κατά μήκος της μετωπικής επιφάνειας είναι πολύ πιο έντονη.

Όλες οι καταιγίδες ανεξάρτητα από την κατηγορία στην οποία ανήκουν, περνούν έναν κύκλο ζωής αποτελούμενο από 3 στάδια: **φάση ανάπτυξης, φάση ωριμότητας και φάση διάλυσης.**



Εικόνα 11: Τα τρία στάδια ανάπτυξης της καταιγίδας. [1]

Στη φάση της ανάπτυξης η αέρια μάζα με τους υφιστάμενους σε αυτήν υδρατμούς αρχίζει να κινείται ανοδικά, εκτονούμενη αδιαβατικά και, ως εκ τούτου ψυχόμενη. Όταν φτάσει σε

ένα ορισμένο ύψος και θερμοκρασία, στο σημείο δρόσου, τότε οι περιεχόμενοι υδρατμοί υγροποιούνται. Το υψόμετρο στο οποίο θα φτάσει το σημείο δρόσου και επομένως γίνει η συμπύκνωση, εξαρτάται από τη σχετική υγρασία, δηλαδή, το φορτίο των υδρατμών. Έτσι δημιουργούνται τα σύννεφα κατακόρυφης ανάπτυξης που λέγονται σωρείτες (Cumulus). Για τον λόγο αυτό, η φάση ανάπτυξης ονομάζεται και **φάση σωρείτη**. Αν το ανοδικό ρεύμα συνεχίσει να υπάρχει, τα σύννεφα συνεχίζουν να μεγαλώνουν περαιτέρω και να διογκώνονται κατακόρυφα. Όταν το ανώτερο μέρος του νέφους έχει φτάσει σε τέτοιο υψόμετρο ώστε να αρχίζει να παγώνει, τότε μιλάμε για σωρειτομελανίες (Cumulonimbus). Συνήθως το επίπεδο παγοποίησης αυτών των σύννεφων είναι γύρω στα 10 χιλιόμετρα από την επιφάνεια του εδάφους, ενίοτε και 12 χιλιόμετρα. Στις τροπικές περιοχές το ύψος αυτό μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 18-20 χιλιόμετρα.

Όταν η ανύψωση σταματήσει, η καταιγίδα είναι σε φάση ωριμότητας πλέον. Κατά κανόνα, η ανύψωση σταματάει στην τροπόπαυση, καθώς στο ύψος αυτό η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας αρχίζει πάλι να ανεβαίνει, με αποτέλεσμα η αέρια μάζα να συναντάει θερμότερα στρώματα και να μην μπορεί να ανυψωθεί άλλο. Οι σφοδροί άνεμοι που επικρατούν στα μεγάλα υψόμετρα, δίνουν στην κορυφή του σωρειτομελανία ένα ιδιαίτερα αναγνωρίσιμο σχήμα σαν αμόνι.

Οι υδροσταγόνες στο εσωτερικό των νεφών κυριολεκτικά αναρπάζονται στροβιλιζόμενες προς τα πάνω από τα πολύ ισχυρά ανοδικά ρεύματα που επικρατούν σε αυτά τα νέφη. Οι σταγόνες αυξάνουν μέχρι ένα ορισμένο μέγεθος (διάμετρο 5-6 mm) και έπειτα διασπώνται σε μικρότερες, λόγω της αντίστασης του αέρα. Κατά την διάσπασή τους απελευθερώνονται θετικά και αρνητικά ηλεκτρικά φορτία, που κατανέμονται χωριστά στα διάφορα μέρη του νέφους μεταξύ της βάσης του και της κορυφής του. Όταν το δυναμικό μεταξύ των θετικών και αρνητικών φορτίων αυξηθεί αρκετά, επέρχεται εκκένωση υπό μορφή ηλεκτρικού σπινθήρα. Η εκκένωση αυτή μπορεί να γίνει μεταξύ του νέφους και του εδάφους ή μεταξύ δύο νεφών ή ακόμα και μεταξύ επιμέρους τμημάτων του ίδιου του νέφους. Γενικότερα, κατά το στάδιο της ωριμότητας της καταιγίδας παρατηρούνται όλα αυτά τα έντονα ηλεκτρικά φαινόμενα, καθώς και η συνύπαρξη των ισχυρών ανοδικών και καθοδικών ρευμάτων. Λόγω της ταυτόχρονης ύπαρξης ανέμων με τα ισχυρά ανοδικά και καθοδικά ρεύματα, μπορεί να προκληθούν μεγάλες αναταράξεις του αέρα μέσα στο σύστημα της καταιγίδας, ικανές να προκαλέσουν σφοδρούς ανέμους, χαλαζόπτωση και ενίοτε ακόμα και σίφωνες.

Κατά την τελική φάση της διάλυσης της καταιγίδας, τα ανοδικά ρεύματα έχουν πια σταματήσει και πλέον κυριαρχούν καθοδικά ρεύματα. Ως αποτέλεσμα, η συνολική μάζα της καταιγίδας κυριολεκτικά “ξεσπάει” προς τα κάτω, συνήθως με έντονη βροχόπτωση. Αν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν ευνοήσουν τη δημιουργία ενός είδους σοβαρών καταιγίδων

που ονομάζονται **υπερκύτταρα (supercells)**, τότε το στάδιο αυτό επέρχεται σε 30 λεπτά και ολοκληρώνεται γρήγορα, συνήθως σε 20-30 λεπτά. Τα υπερκύτταρα είναι βαριές καταιγίδες, με διάρκεια ζωής άνω των 6 ωρών, που χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη διατμητικών ανέμων, δηλαδή ανέμων με μεγάλες αλλαγές ταχύτητας και κατεύθυνσης σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα.

Ανεμοστρόβιλοι και Σίφωνες

Ανεμοστρόβιλος ή αεροδίνη, είναι ένα μικρής έκτασης και χρονικής διάρκειας μετεωρολογικό φαινόμενο. Όπως εξηγεί και το όνομά του πρόκειται για κατακόρυφο ή κεκλιμένο στροβιλισμό του αέρα και διαρκεί από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι λίγα λεπτά της ώρας. Οι περισσότεροι ανεμοστρόβιλοι είναι ασθενείς και μικροί σε διαστάσεις, με διάμετρο από μισό μέχρι λίγα μέτρα και ύψος που φτάνει ως μερικά μέτρα, ενώ η μέγιστη ταχύτητα των ανέμων φτάνει κατά μέσο όρο τα 70km/h. Στο βόρειο ημισφαίριο συνήθως η φορά του ανεμοστρόβιλου είναι δεξιόστροφη, σε αντίθεση με το νότιο ημισφαίριο όπου η φορά είναι αριστερόστροφη.

Το φαινόμενο αυτό προκαλείται λόγω του ιξώδους του αέρα, ιδιαίτερα όταν θερμές μάζες του υψώνονται με ταχύτητα που υπερβαίνει κάποιο σχετικό “κρίσιμο” όριο, ή όταν συναντιούνται αντίθετα ρεύματα αέρος. Μπορεί επίσης να δημιουργηθεί σε κάποιο αιφνίδιο εμπόδιο κινούμενης μάζας αέρος, όπως συμβαίνει για παράδειγμα σε κορυφές βουνών. Τυχόν συνδυασμός δύο παραπάνω παραγόντων αυξάνει την ένταση του φαινομένου. Στην αγγλική ορολογία οι ανεμοστρόβιλοι ονομάζονται **whirlwinds**. Άλλες ονομασίες είναι dust devils ή sand pillars.

Ο ανεμοστρόβιλος κάνει εμφανή τη παρουσία του από τη σκόνη που παρασύρεται κατά την ανοδική φορά του. Η σκόνη που αναρπάζεται από το έδαφος φθάνει σε μεγάλο ύψος, με συνέπεια την ελάττωση της ορατότητας τοπικά. Πολλές φορές μπορεί να προκληθούν περιορισμένες καταστροφές, κυρίως από αρπαγή και πτώση επικαθήμενων αντικειμένων. Στα μεγαλύτερα ύψη, η παρουσία ανεμοστρόβιλου γίνεται αντιληπτή από τις απότομες παρενοχλήσεις που προκαλούνται στις πτήσεις των αεροσκαφών που μπορεί να γίνουν επικίνδυνες για μικρά αεροσκάφη, όσο η έντασή του είναι μεγαλύτερη, ιδιαίτερα στις απογειώσεις και τις προσγειώσεις. Όταν ένας ανεμοστρόβιλος δημιουργηθεί ή περάσει πάνω από μία επιφάνεια νερού (θάλασσα, λίμνη), αντί για σκόνη παρασύρει ελεύθερα σταγονίδια, οπότε και λαμβάνει λευκό ή γκριζο χρώμα.

Πολύ σπάνια έχει συμβεί κάποιοι ανεμοστρόβιλοι να ενισχυθούν και να μεγαλώσουν, φτάνοντας σε διάμετρο ακόμα και τα 90 μέτρα και σε ύψος πάνω από 1.000 μέτρα, με συνολική διάρκεια ζωής έως και τα 20 λεπτά. Σε τέτοιες ακραίες περιπτώσεις, έχουν παρατηρηθεί άνεμοι με ταχύτητες που έφτασαν τα 100-120km/h, προκαλώντας σημαντικές ζημιές ή σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις ακόμα και θύματα.

Πολλές φορές, ο ανεμοστρόβιλος συγχέεται με τον σίφωνα, αλλά υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές ανάμεσα στα δύο αυτά φαινόμενα. Στην Μετεωρολογία, **σίφωνας (tornado, twister)** λέγεται μία εξαιρετικά βίαιη και επικίνδυνη στροβιλιζόμενη στήλη αέρα, με μεγάλη ταχύτητα περιστροφής, η οποία οφείλεται σε πολύ χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση στο κέντρο της στήλης. Αποφύεται από τη βάση μεγάλων καταιγιδοφόρων νεφών (σωρειτομελανίες, πολύ σπάνια από τη βάση ενός σωρείτη) φτάνοντας έως το έδαφος, σε αντίθεση με τον ανεμοστρόβιλο που δημιουργείται όταν έχουμε αίθριο ή ελαφρά συννεφιασμένο ουρανό. Πρόκειται για το πλέον έντονο και βίαιο μετεωρολογικό φαινόμενο και από τα πιο περίεργα της φύσης και είναι συνήθως μεγαλύτερης έντασης από τον ανεμοστρόβιλο. Είναι μικρής διαμέτρου και διάρκειας ζωής και ως εκ τούτου οι τεράστιες καταστροφές που θα μπορούσε να προκαλέσει είναι συνήθως περιορισμένες σε έκταση.

Οι σίφωνες αποτελούν μία παγκόσμια απειλή, καθώς εμφανίζονται τακτικά σε πολλά κράτη και σε όλες τις ηπείρους, εκτός από την Ανταρκτική. Το ετήσιο ανθρώπινο κόστος του φαινομένου είναι 300-400 θύματα παγκοσμίως, σύμφωνα με εκτίμηση του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού. Η πλειονότητα των σιφώνων συμβαίνουν στις Ηνωμένες Πολιτείες, 1.200 σίφωνες το χρόνο κατά μέσο όρο, σχεδόν τέσσερις φορές περισσότερους από το σύνολο ολόκληρης της Ευρώπης (με εξαίρεση τους θαλάσσιους σίφωνες) και ετήσιο απολογισμό 60-100 θύματα. Αν και δεν υπάρχει πολιτεία στις ΗΠΑ που να μην έχει κατά καιρούς σημειωθεί το φαινόμενο αυτό, ένα ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό των σιφώνων ξηράς της χώρας αυτής, παρατηρείται σε μία περιοχή των κεντρικών Ηνωμένων Πολιτειών (Τέξας, Κάνσας, Οκλαχόμα) μεταξύ των Βραχωδών και των Απαλαχίων Ορέων, η οποία είναι γνωστή ως **Μονοπάτι των Σιφώνων (Tornado Alley)**. Γενικότερα όμως, υπό τις κατάλληλες συνθήκες, μπορεί να συμβεί σίφωνας σε οποιοδήποτε μέρος, ώρα και εποχή κατά τη διάρκεια του έτους.

Οι σίφωνες ποικίλλουν σε σχήματα και διαστάσεις, ωστόσο η τυπική τους εμφάνιση είναι ένα περιστρεφόμενο σύννεφο σε σχήμα χωνιού, που ενώνει τα σύννεφα με το έδαφος και το κάτω μέρος τους περιβάλλεται από ένα στροβιλιζόμενο σύννεφο σκόνης, που προκαλείται από τους σφοδρούς ανέμους του σίφωνα κοντά στο έδαφος. Επίσης ποικίλλουν σε ένταση και διάρκεια. Οι περισσότεροι έχουν ταχύτητες περιστροφικών ανέμων μικρότερες από 180km/h, μέσο πλάτος γύρω στα 75 μέτρα και διάρκεια λίγων λεπτών, ενώ σπανιότερα ξεπερνούν τη μισή ώρα. Η μέγιστη δυνατή απόσταση μετακίνησής τους είναι 20-30 χιλιόμετρα. Οι πιο ακραίοι και καταστροφικοί στην ιστορία, έχουν επιτύχει ταχύτητες ανέμων 400-480km/h, διάμετρο περίπου 1,5 χιλιόμετρο και διάρκεια άνω της 1 ώρας, συχνά διανύοντας αποστάσεις πάνω από 100 χιλιόμετρα.

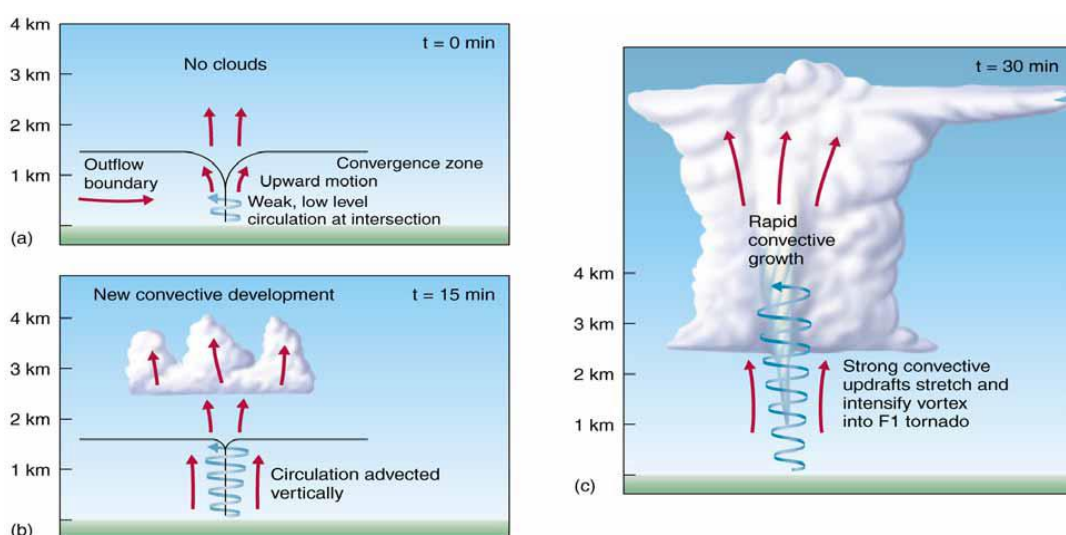
Οι σίφωνες παρουσιάζονται τόσο πάνω από την ξηρά και ονομάζονται **σίφωνες ξηράς**, οι οποίοι θεωρούνται και οι ταχύτεροι άνεμοι στον πλανήτη, όσο και πάνω από το νερό (θάλασσες, λίμνες) οπότε ονομάζονται **σίφωνες θαλάσσης** ή **υδροσίφωνες (waterspout)**.

Οι υδροσίφωνες είναι πολύ πιο ασθενείς από τους σίφωνες ξηράς και η ταχύτητα μετακίνησής τους από το ένα σημείο στο άλλο είναι πολύ πιο μικρή. Η διάμετρός τους κυμαίνεται από 3 έως 50 μέτρα και πολύ σπάνια μπορεί να φτάσει τα 100-150 μέτρα. Η διάρκεια ζωής τους σχεδόν πάντα είναι μερικά λεπτά.

Πολλοί σίφωνες ξηράς δημιουργούνται αρχικά στη θάλασσα και το αντίστροφο. Ακόμα και σήμερα δεν ξέρουμε πλήρως πως σχηματίζονται και λειτουργούν. Η δημιουργία τους είναι πολύ σύνθετη και φαίνεται ότι συμμετέχουν πολλοί μηχανισμοί. Ενώ οι παρακάτω παράγοντες φαίνεται να είναι γενικά αναγκαίοι, σίφωνες μπορεί περιστασιακά να αναπτυχθούν χωρίς να πληρούνται όλες τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- I. Η βασικότερη προϋπόθεση για την εκδήλωση τέτοιων φαινομένων είναι πάντα η ύπαρξη ασταθών αερίων μαζών πλούσιων σε υγρασία.
- II. Γενικά οι σίφωνες είναι συνηθέστεροι στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, καθώς σε αυτά συναντώνται οι θερμές και υγρές τροπικές αέριες μάζες με ψυχρά πολικά μέτωπα.
- III. Η πλέον ευνοϊκή αστάθεια για το σχηματισμό τους, είναι μία απότομη, κατακόρυφη πτώση της θερμοκρασίας καθ' ύψος, με ταυτόχρονο εγκλωβισμό λανθάνουσας θερμότητας στα χαμηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας (μέχρι και 1-2 χιλιόμετρα υψόμετρο) και αύξηση της μάζας του αέρα που ανυψώνεται βίαια
- IV. Οι μηχανισμοί ανύψωσης αερίων μαζών μπορεί να είναι θερμικοί (ηλιακή ακτινοβολία, καταιγίδες) ή δυναμικοί (ψυχρά μέτωπα) και ειδικότερα:
 - Λόγω της εντονότερης ηλιακής ακτινοβολίας το μεσημέρι, προκαλείται υπερθέρμανση κοντά στο έδαφος, επαυξάνοντας την ανοδική τάση και γι' αυτό οι σίφωνες συνήθως εμφανίζονται αργά το απομειήμερο, λίγη ώρα μετά την μεγαλύτερη θερμοκρασία του 24-ώρου.
 - Μία σημαντική πηγή ενέργειας, είναι των καταιγίδων. Κατά τη διάρκειά τους, αποθηκεύεται στην ατμόσφαιρα λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης των υδρατμών. Αυτό το πρόσθετο ποσό της θερμότητας ενισχύει τα βίαια ανοδικά ρεύματα.
 - Για τους σίφωνες, τα ευνοϊκότερα ψυχρά μέτωπα είναι εκείνα που σχηματίζονται μεταξύ θαλάσσιας πολικής και θαλάσσιας τροπικής μετακινούμενης αέριας μάζας, οπότε ο ψυχρός αέρας εισχωρεί, υπό την μορφή πλήρους πλοίου, μέσα στον θερμό αέρα, σε μικρό ύψος από την επιφάνεια. Τότε ο ψυχρός αυτός αέρας

υπερκαλύπτει και εγκλωβίζει τον θερμό αέρα (αντί να σφηνωθεί από κάτω του), προκαλώντας τρομακτική ανισορροπία και αστάθεια στην ατμόσφαιρα. Ο θερμός αέρας ανεβαίνει προς τα πάνω με μεγάλη ταχύτητα και τελικά, σε ένα ή περισσότερα σημεία ανύψωσης, κατορθώνει να διαφύγει προς τα πάνω, υπό την μορφή τεράστιας φουσαλίδας, με συνέπεια τη δημιουργία σφοδρού ανοδικού ρεύματος και την πτώση της ατμοσφαιρικής πίεσης στο σημείο ανύψωσης. Ταυτόχρονα, η συνάντηση ισχυρών ρευμάτων αέρα από αντίθετες κατευθύνσεις δίνει στην ανοδική στήλη μία περιστροφική κίνηση. Η ανοδική κίνηση στο κάτω μέρος της ροής αέρα λειτουργεί σαν τουρμπίνα και προκαλεί τεράστια αύξηση της ταχύτητας του ανέμου μέσα στην στροβιλιζόμενη στήλη. Παράλληλα με την πτώση της πίεσης λόγω της ανοδικής διαφυγής του θερμού αέρα, η φυγόκεντρος δύναμη απομακρύνει περαιτέρω τις αέριες μάζες από το κέντρο του σίφωνα. Ως αποτέλεσμα, η διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού των σιφώνων και του ατμοσφαιρικού αέρα γύρω από αυτούς είναι πολύ μεγάλη.



Εικόνα 12: Η εξέλιξη ενός σίφωνα σε ένα συναγωγικό σύνορο. [1]

Να σημειωθεί ότι οι σίφωνες εκδηλώνονται κυρίως στο ψυχρό μέτωπο που σχηματίζεται στην λεγόμενη σφήνα ύφεσης καθώς και σε άλλα (ψυχρά κυρίως) μέτωπα όταν αυτά παρουσιάζουν μεγάλη δραστηριότητα.

Οι πιο καταστροφικοί και θανατηφόροι σίφωνες πάντως, προκαλούνται από καταιγίδες που ονομάζονται **υπερκύτταρα (supercells)** λόγω της ύπαρξης διατμητικών ανέμων. Έχει διαπιστωθεί ότι οι διατμητικοί άνεμοι συχνά προκαλούν στροβιλισμό του αέρα, ενώ τα ισχυρά ανοδικά ρεύματα “αρπάζουν” το στροβιλισμό προς τα πάνω. Καθώς ο στροβιλισμός δημιουργεί μία σταθερή στήλη, αρχίζει να κερδίζει δύναμη και να απορροφά το ανοδικό ρεύμα μέσα σε αυτόν, αναγκάζοντάς το να στροβιλίζεται και ενισχύοντας έτσι τη δίνη. Με

τον μηχανισμό αυτό, δημιουργείται ένας **μεσοκυκλώνας (mesocyclone)**, που είναι ένας μεγάλος κατακόρυφος στρόβιλος αέρα με διάμετρο 2 έως 10 χιλιόμετρα, εντός της καταιγίδας. Πρακτικώς, είναι ένα είδος τροπικού κυκλώνα με τοπικό χαρακτήρα: μία στήλη ανοδικού αέρα, που συνδέεται με μια εντοπισμένη περιοχή χαμηλής πίεσης μέσα σε μία καταιγίδα και περιστρέφεται γύρω από έναν κάθετο άξονα, συνήθως κυκλωνικά.

Υπό κάποιες συνθήκες που ακόμα και σήμερα δεν έχουν εξηγηθεί, μερικές φορές η περιστροφή βαθαίνει και τελικά επεκτείνεται μέχρι το έδαφος, οπότε το κάτω μέρος του μεσοκυκλώνα καταγράφεται ως σίφωνα. Επίσης, υπάρχει και ένα πολύ σπάνιο και ακραίο ενδεχόμενο, στο οποίο ολόκληρη η καταιγίδα αρχίζει να περιστρέφεται γύρω από την ανοδική στροβιλιζόμενη στήλη του μεσοκυκλώνα, δημιουργώντας έτσι έναν «μίνικυκλώνα». Ειδικά αυτός ο τρόπος σχηματισμού σίφωνα θεωρείται ως εξαιρετικά επικίνδυνος, καθώς αν συμβεί, αυξάνει την πιθανότητα δημιουργίας ενός βίαιου και σφοδρού σίφωνα τεράστιων διαστάσεων.

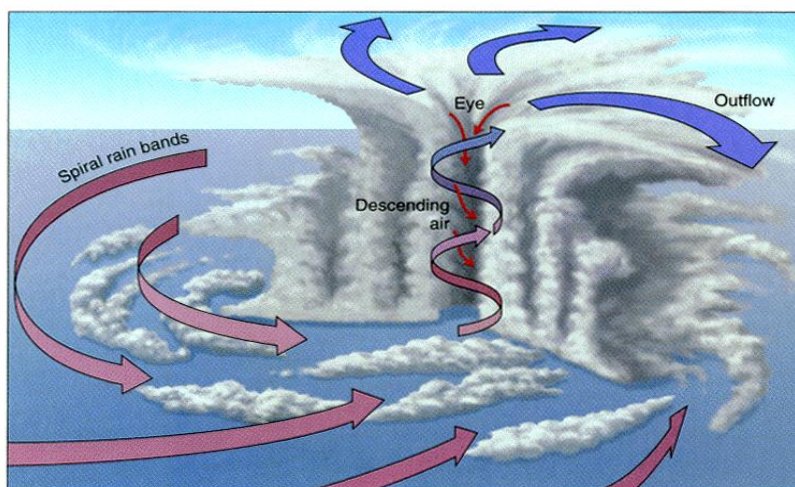
Μερικοί σίφωνες μέτριας έντασης και ιδιαίτερα όσοι σχηματίζονται σε πολύ ξηρή ατμόσφαιρα, μπορεί να μην είναι πλήρως ορατοί. Κατά κανόνα πάντως, η πολύ χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση ωθεί τους ήδη ισχυρούς ανέμους να επιταχύνουν ακόμα περισσότερο και η βίαιη περιστροφή συνήθως αναγκάζει τους υδρατμούς των νεφών να αρχίσουν να χαμηλώνουν. Δημιουργείται έτσι μία περιστρεφόμενη βάση νεφών, γνωστή ως **σύννεφο-χοάνη (funnel cloud)**, η οποία οδηγεί στη δημιουργία στήλης που συνεχίζει να χαμηλώνει καθώς αυξάνει η ένταση του ανέμου κοντά στο έδαφος. Τελικά η ορατή στήλη ακουμπά στο έδαφος και τότε θεωρείται επισήμως σίφωνα. Μερικές φορές, δύο ή περισσότερες δίνες μπορεί να σχηματιστούν στο εσωτερικό ενός μεγαλύτερου σίφωνα και τότε το φαινόμενο αναφέρεται ως **«σίφωνας πολλαπλών στροβιλισμών» (multiple vortex tornado)**. Οι στροβιλισμοί αυτοί είναι ικανοί να προσθέσουν ακόμα και πάνω από 160 χιλιόμετρα την ώρα επιπλέον ταχύτητα στους ανέμους του σίφωνα στο έδαφος. Άλλες φορές, εναλλακτικά, ένας ή περισσότεροι **«δορυφορικοί σίφωνες» (satellite tornadoes)**, συνήθως μικρών διαστάσεων, περιστρέφονται γύρω από έναν μεγαλύτερο σίφωνα.

Επίσης έχουν παρατηρηθεί ορισμένοι σίφωνες με πολύ μεγάλο πλάτος, τόσο που η διάμετρός τους να είναι μεγαλύτερη από την απόσταση μεταξύ εδάφους και νεφών. Οι σίφωνες αυτοί ονομάζονται **σφηνοειδείς σίφωνες (wedge tornadoes)**. Είναι εξαιρετικά επικίνδυνοι λόγω της δυσκολίας, που συνήθως υπάρχει, στην έγκαιρη αναγνώρισή τους αφού δεν μπορούμε πάντα να ξεχωρίσουν μία μάζα νεφών χαμηλά πάνω από το έδαφος από έναν σφηνοειδή σίφωνα, όταν είναι ακόμα μακριά. Στην άλλη άκρη του φάσματος υπάρχουν και εξαιρετικά στενοί σίφωνες που αναφέρονται ως **σίφωνες-σκοινιά (rope tornadoes)**, με διάμετρο λίγες δεκάδες μέτρα ή κατά περιπτώσεις ακόμα και μερικά μέτρα.

Οι περισσότεροι σίφωνες έχουν ένα καθαρό, ήρεμο κέντρο, με πολύ χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση, παρόμοιο με το μάτι των τροπικών κυκλώνων.

Τροπικές Καταιγίδες

Η πολύ ισχυρή τροπική καταιγίδα έχει πολλά ονόματα ανάλογα με τον τόπο στον οποίο εμφανίζεται. Στον ανατολικό Ειρηνικό ωκεανό ονομάζεται τυφώνας (typhoon), στον Ινδικό ωκεανό και την Αυστραλία λέγεται κυκλώνας (cyclone) ενώ στον Ατλαντικό και τον δυτικό Ειρηνικό ωκεανό ονομάζεται hurricane. Για την επιστήμη της Μετεωρολογίας ονομάζεται σύστημα θύελλας σε κλειστή περιστροφική (κυκλωνική) κυκλοφορία γύρω από ένα ήρεμο κέντρο χαμηλής βαρομετρικής πίεσης. Και τα τρία είδη παρουσιάζουν κατ' ουσία την ίδια δομή με την διαφορά ότι συνήθως οι τυφώνες είναι μεγαλύτεροι. Κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας καταιγίδας μπορεί να απελευθερωθεί ενέργεια, περισσότερη από την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν οι ΗΠΑ και ο Καναδάς ετησίως. Τα συστήματα αυτά δημιουργούνται πάνω από θερμούς ωκεανούς ή μεγάλες θάλασσες υπό ορισμένες προϋποθέσεις, αλλά ποτέ πάνω από στεριές. Όταν φτάνουν σε ψυχρότερα νερά ή στεριά, διαλύονται. Παράγουν ισχυρές καταιγίδες και εξαιρετικά σφοδρούς ανέμους. Γενικά οι τροπικοί κυκλώνες θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως τεράστιοι σίφωνες ή ανεμοστρόβιλοι με ανοδική συνιστώσα.



Εικόνα 13: Τομή τυπικού τυφώνα. [1]

Η διάμετρος των τροπικών κυκλώνων είναι συνήθως μικρότερη των 800 χιλιομέτρα σε αντίθεση με τις υφέσεις που φθάνουν συνήθως τα 1.800 χιλιομέτρα. Οι άνεμοι των τροπικών κυκλώνων πνέουν από τη περιφέρεια προς το κέντρο, στο βόρειο ημισφαίριο αντίθετα της φοράς των δεικτών του ωρολογίου, ενώ στο νότιο ημισφαίριο σύμφωνα με αυτή. Το σύστημα των καταιγίδων περιστρέφεται γύρω από ένα κέντρο χαμηλής βαρομετρικής πίεσης, γνωστό ως **μάτι του τυφώνα (eye of the hurricane)**. Η διάμετρος του ματιού συνήθως κυμαίνεται από 30 ως 65 χιλιομέτρα. Στο μάτι επικρατεί άπνοια ή πνέουν ασθενείς άνεμοι, ενώ επικρατεί ηλιοφάνεια ή αστροφεγγιά αφού δεν υπάρχουν σύννεφα

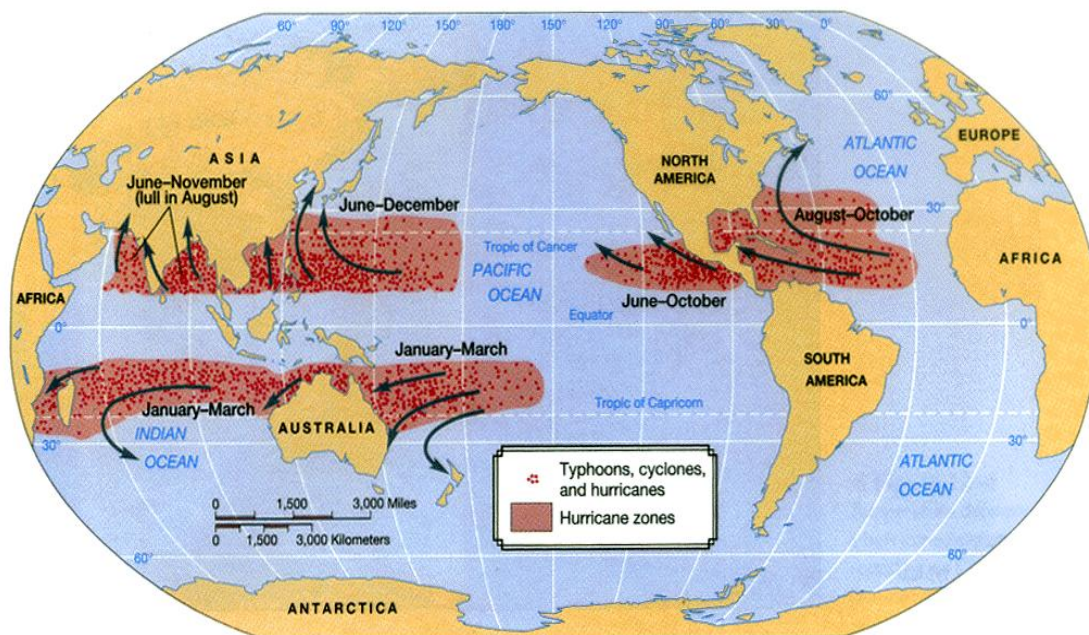
και το φώς μπορεί να περάσει. Η ατμοσφαιρική πίεση που παρατηρείται στο μάτι του τυφώνα πέφτει στα 950mbars περίπου, αν και στους πιο ακραίους, της Κατηγορίας 5, πέφτει μέχρι και τα 870mbars. Οι πιο αδύναμοι έχουν κεντρική πίεση 990 mbars περίπου. Οι ισχυρότεροι άνεμοι του κυκλώνα πνέουν πάντα στον δακτύλιο γύρω από το μάτι, το λεγόμενο **τοιχώμα του ματιού (eyewall)**. Σε αυτό το μέρος του κυκλώνα συναντάμε επίσης τα πυκνότερα σύννεφα και τα ισχυρότερα κατακρημνίσματα. Για να καταγραφεί επισήμως ως **τυφώνας**, θα πρέπει η σταθερή ταχύτητα των ανέμων να υπερβαίνει τα 118km/h, δηλαδή να φτάσει τα 12 Μποφόρ. Αν είναι από 8 ως 11 Μποφόρ (63-117km/h), τότε καταγράφεται ως **τροπική καταιγίδα (tropical storm)**, ενώ αν είναι ως 62km/h, τότε καταγράφεται ως **τροπική ύφεση (tropical depression)** ή απλώς βαρομετρικό χαμηλό. Ο μέσος τροπικός κυκλώνας έχει μέγιστες ταχύτητες ανέμων περίπου 150km/h αλλά στους πιο ισχυρούς μπορούν να φτάσουν μέχρι και τα 350km/h. Συνοδεύονται με πυκνή νέφωση, καταρακτώδεις βροχές και καταιγίδες. Οι κακοκαιρίες αυτές μπορεί να είναι μεν μεγάλης έντασης, αλλά όμως μικρότερης σχετικά έκτασης των υφέσεων (των εξωτροπικών).

Το πως ακριβώς δημιουργούνται οι τροπικοί κυκλώνες δεν είναι ακόμα πλήρως γνωστό. Θεωρείται πάντως βέβαιο ότι απαιτείται μεγάλη αστάθεια της ατμόσφαιρας και η ύπαρξη πολύ θερμού αλλά και υγρού αέρα. Ενώ οι παρακάτω παράγοντες φαίνεται να είναι γενικά αναγκαίοι, τροπικοί κυκλώνες μπορεί περιστασιακά να αναπτυχθούν χωρίς να πληρούν όλες τις ακόλουθες προϋποθέσεις.

- Θερμοκρασίες νερού τουλάχιστον 26,5°C που φτάνουν σε βάθος τουλάχιστον 50 μέτρων. Όταν τα νερά του ωκεανού φτάνουν τέτοιες θερμοκρασίες, προκαλούν επαρκή αστάθεια στην υπερκείμενη ατμόσφαιρα ώστε να τροφοδοτήσει μεταφορά θερμότητας και συστήματα καταιγίδων.
- Ταχεία ψύξη με το ύψος, η οποία επιτρέπει την απελευθέρωση της θερμότητας από συμπύκνωση, η οποία ενισχύει τον τροπικό κυκλώνα.
- Έντονη υγρασία, ιδιαίτερα στα χαμηλότερα προς μεσαία στρώματα της τροπόσφαιρας. Όταν υπάρχουν μεγάλες ποσότητες υγρασίας στην ατμόσφαιρα, οι συνθήκες είναι οι πλέον ευνοϊκές για την ανάπτυξη τέτοιων διαταραχών.
- Σχετική ήρεμη ατμόσφαιρα, χωρίς έντονες αλλαγές της διεύθυνσης και ταχύτητας των ανέμων που θα “έσπαζαν” τον τυφώνα, καθώς θα παρεμπόδιζαν την κυκλική (κυκλωνική) κυκλοφορία της θύελλας.
- Οι τροπικοί κυκλώνες γενικά σχηματίζονται πάνω από 555 χιλιόμετρα ή 5 βαθμούς γεωγραφικού πλάτους μακριά από τον ισημερινό, επιτρέποντας έτσι στη δύναμη Coriolis να κατευθύνει τους ανέμους προς το κέντρο χαμηλής πίεσης και να δημιουργήσει την κυκλική κυκλοφορία.
- Επίσης, ένας τροπικός κυκλώνας υπό διαμόρφωση, χρειάζεται και ένα προϋπάρχον σύστημα διαταραγμένων καιρικών συνθηκών, αν και όπως προαναφέρθηκε χωρίς έντονες αλλαγές της διεύθυνσης και ταχύτητας των ανέμων, ώστε να μην παρεμποδιστεί η περιστροφική κίνηση. Πρακτικώς, αν δεν υπάρχει περιστροφή, δεν πρόκειται να αναπτυχθεί κυκλώνας.

Γενικότερα οι τροπικοί κυκλώνες αρχίζουν να εκδηλώνονται, κατά κανόνα, εκατέρωθεν της ζώνης των τροπικών νηνεμιών, αποκαλούμενης διεθνώς **doldrums**. Πρόκειται για τη

ζώνη μεταξύ των γεωγραφικών παραλλήλων 7° και 15° τόσο σε βόρειο όσο και σε νότιο γεωγραφικό πλάτος. Κυρίως δημιουργούνται στα μέσα πλάτη από 20° και 35°, ενώ αντιθέτως στη ζώνη του Ισημερινού (+/- 5° γύρω από τον Ισημερινό) δεν δημιουργούνται, επειδή η δύναμη Coriolis που δημιουργεί την κυκλική κυκλοφορία και κατευθύνει τους ανέμους προς το κέντρο χαμηλής πίεσης, τείνει προς το μηδέν. Οι κυκλώνες που επηρεάζουν τις περιοχές του Ειρηνικού, Βορείου Ατλαντικού και Νοτίου Ινδικού εντοπίζονται στην αρχή στο δυτικό τμήμα τους. Πάντως έχουν σημειωθεί και εξαφέςεις, όπως στον Βόρειο Ατλαντικό κατά τη διάρκεια Αυγούστου και Σεπτεμβρίου να έχουμε εκδήλωση τροπικού κυκλώνα κοντά στο Πράσινο Ακρωτήριο.



Εικόνα 14: Οι περιοχές της Γής που παρατηρείται η εκδήλωση τυφώνων και τροπικών καταιγίδων.

[1]

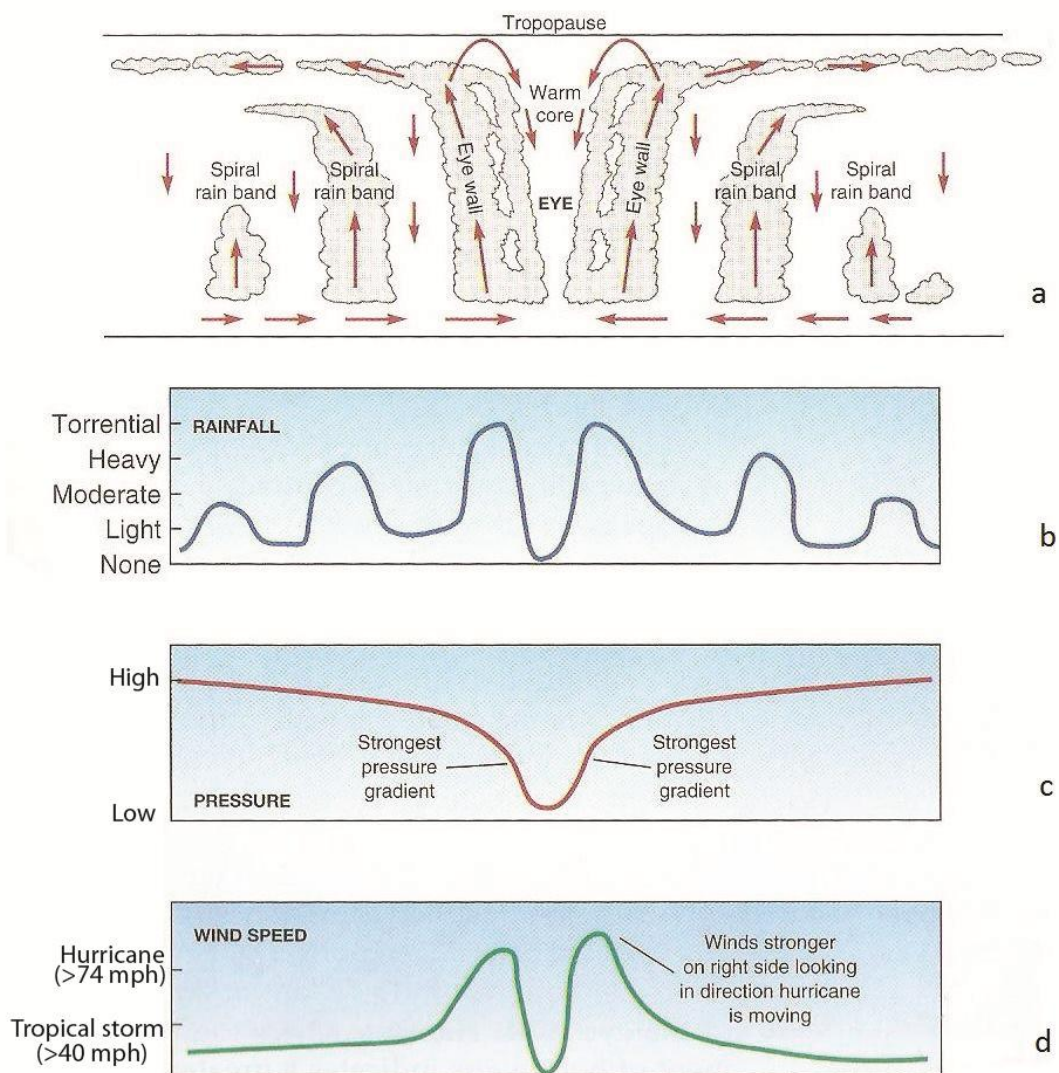
Οι τροπικοί κυκλώνες κατά βάση είναι φαινόμενα των θερινών και φθινοπωρινών μηνών για κάθε ημισφαίριο. Στο Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό, ως **εποχή των τυφώνων (hurricane season)** θεωρείται επισήμως η περίοδος από την 1 Ιουνίου έως τις 30 Νοεμβρίου, με την πλέον επικίνδυνη περίοδο έξαρσης από τα τέλη Αυγούστου μέχρι τον Σεπτέμβριο. Στατιστικώς η χρονική στιγμή αιχμής της περιόδου των τυφώνων του Ατλαντικού είναι στις 10 Σεπτεμβρίου. Στο βορειοανατολικό Ειρηνικό Ωκεανό, έχουν μεγαλύτερη περίοδο έξαρσης, αλλά παρόμοια εποχική βάση με τον Ατλαντικό. Στον βορειοδυτικό Ειρηνικό Ωκεανό μάλιστα, διαρκούν σχεδόν όλο το έτος, με την πλέον επικίνδυνη περίοδο έξαρσης στις αρχές Σεπτεμβρίου και το ελάχιστο της δραστηριότητας τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο. Στον βόρειο Ινδικό Ωκεανό, συμβαίνουν από τον Απρίλιο μέχρι τον Δεκέμβριο, με δύο επικίνδυνες περιόδους έξαρσης κατά την εναλλαγή των Μουσώνων, δηλαδή τους μήνες Μάιο και Νοέμβριο. Στο νότιο ημισφαίριο, το λεγόμενο έτος των τροπικών κυκλώνων αρχίζει να μετράει στη 1 Ιουλίου και η λεγόμενη **εποχή των τυφώνων** ξεκινάει στη 1

Νοεμβρίου και φτάνει έως τα τέλη Απριλίου, με την πλέον επικίνδυνη περίοδο έξαρσης από τα μέσα Φεβρουαρίου έως τις αρχές Μαρτίου. Γενικώς είναι πολύ σπάνιο να εμφανιστούν στο βόρειο ημισφαίριο από Νοέμβριο μέχρι Ιούνιο και στο νότιο ημισφαίριο από μέσα Μαΐου μέχρι Νοέμβριο, επειδή οι θάλασσες έχουν χαμηλές θερμοκρασίες.

Οι τροπικοί κυκλώνες στο μεν βόρειο ημισφαίριο κινούνται κατ' αρχήν Δ-ΒΔ και στη συνέχεια στρέφουν κατά την ανάδρομο φορά (δηλαδή από Δ, ΒΔ, Β, ΒΑ) ενώ στο νότιο αρχικά κινούνται Δ-ΝΔ και στη συνέχεια στρέφουν κατά την ορθή φορά (δηλαδή Δ, ΝΔ, Ν, ΝΑ) ακολουθώντας τροχιές μάλλον παραβολικές. Σε ορισμένους πάλι συμβαίνει «διπλή ανακαμπύλωση» της τροχιάς, δηλαδή ένας κυκλώνας του νοτίου ημισφαιρίου ενώ κινείται προς Δ - ΝΔ και στρέφεται φυσιολογικά προς Ν και ΝΑ αυτός συνεχίζει να στρέφεται Α, ΒΑ, Β με τελική κατεύθυνση Δ-ΒΔ. Αυτή η τροχιά λέγεται «τροχιά μετά κόμβου». Κάποιες φορές όμως, οι τροπικοί κυκλώνες κινούνται εντελώς ακανόνιστα, δημιουργώντας περίεργες ανακαμπυλώσεις.

Η μέση ταχύτητα μετατόπισης των κυκλώνων είναι συνήθως 10 κόμβοι (18,5km/h) και σπάνια 15. Ειδικότερα μετά τη καμπή τους η ταχύτητά τους αυξάνει στους 20 με 25 κόμβους. Πολύ σπάνια είναι η ταχύτητα των 40 κόμβων, που έχει όμως παρατηρηθεί ως μέγιστη. Η ταχύτητα μετατόπισης δεν πρέπει να συγχέεται με την ταχύτητα περιστροφής.

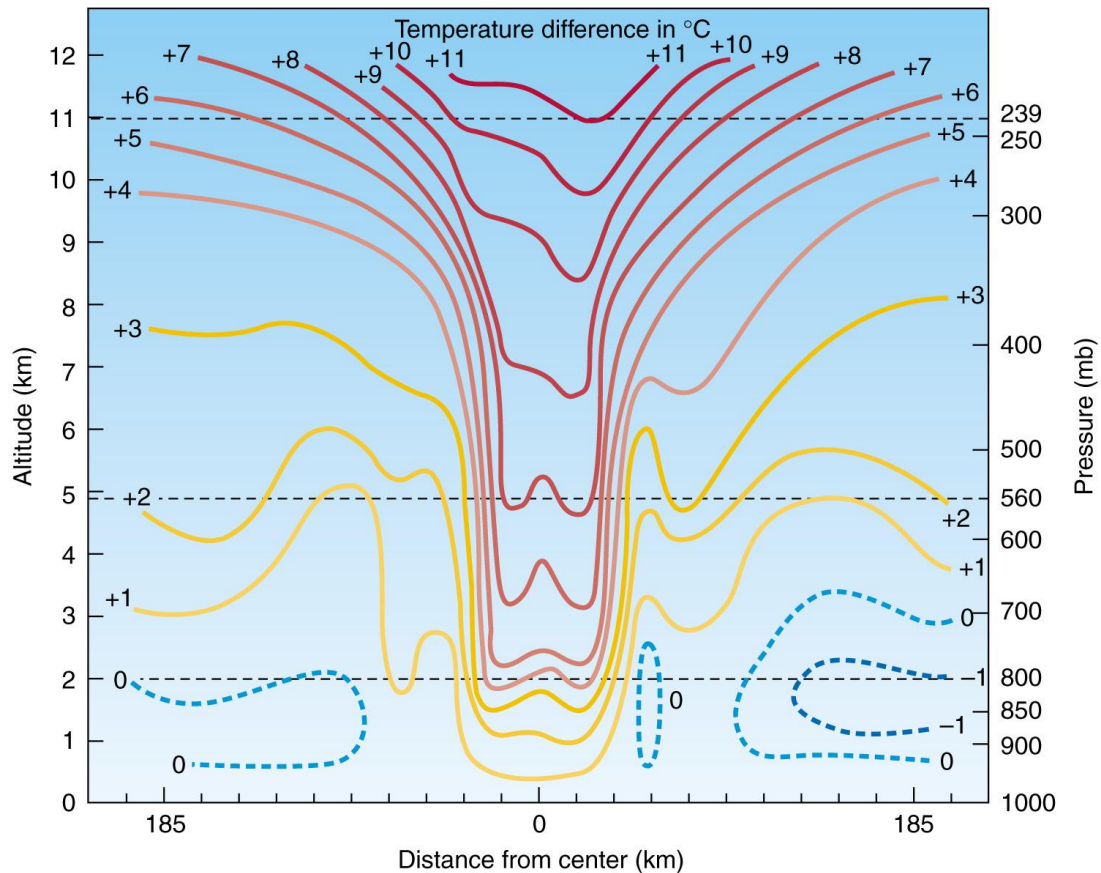
Οι κυκλώνες δεν αποτελούνται από ένα μοναδικό πυρήνα μετάδοσης θερμότητας, αλλά από ένα μεγάλο αριθμό καταιγίδων σε σχηματισμό μύλου, με ζώνες πυκνών σύννεφων και ισχυρών καταιγίδων που περιστρέφονται κυκλωνικά γύρω από το κέντρο του κυκλώνα όπως φαίνεται στην Εικόνα 15α.



Εικόνα 15: Τομή τυπικού κυκλώνα φαίνονται α) τα σύννεφα και η κυκλοφορία του αέρα, β) η ένταση της βροχόπτωσης, γ) η κατανομή της πίεσης και δ) η ταχύτητα του αέρα. [1]

Οι ζώνες ισχυρής μετάδοσης θερμότητας διαχωρίζονται από περιοχές με αδύναμα ανοδικά ή καθοδικά ρεύματα αέρα και αδύναμα κατακρημνίσματα. Πλησιάζοντας προς το κέντρο του κυκλώνα η ταχύτητα των ανέμων και η ισχύς των κατακρημνισμάτων αυξάνεται. Το ίδιο συμβαίνει και με την κλίση της πίεσης. Οι κυκλώνες είναι διαταραχές θερμού πυρήνα όπως φαίνεται και από την Εικόνα 16. Καθώς ο αέρας οδηγείται προς τα μέσα, λόγω της μειωμένης πίεσης στο κέντρο, η θερμή επιφάνεια του ωκεανού τον τροφοδοτεί με μεγάλα ποσά αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας. Η θερμοκρασία του αέρα δεν αυξάνεται δραματικά, λόγω της αδιαβατικής διαστολής, οπότε η θερμοκρασιακή διαφορά στη βάση του κυκλώνα παραμένει μικρή. Παρόλα αυτά όμως η θερμότητα που προστίθεται θερμαίνει

σημαντικά τον πυρήνα, ενώ σε αυτό συμβάλλουν και τα συμπυκνώματα στο πάνω μέρος του κυκλώνα.



Εικόνα 16: Θερμοκρασιακές διαφορές σε ένα τυφώνα σε σύγκριση με τον περιβάλλοντα αέρα. [1]

Η έκταση της περιοχής ενός τροπικού κυκλώνα διαφέρει από κυκλώνα σε κυκλώνα. Γενικά άνεμοι έντασης 7 μποφόρ ή λίγο ισχυρότεροι είναι αδύνατον να συναντηθούν σε ακτίνα 320 χιλιομέτρων από το κέντρο του κυκλώνα. Παρομοίως, άνεμοι έντασης 8 μποφόρ είναι επίσης αδύνατον να σημειωθούν σε απόσταση μεγαλύτερη των 160 χιλιομέτρων από το κέντρο του κυκλώνα και ειδικά σε πλάτη μικρότερα των 20° B. ή N. Αντίθετα άνεμοι έντασης 12 μποφόρ τυφώνας είναι πολύ πιθανοί σε απόσταση 120 χιλιομέτρων από το κέντρο του κυκλώνα. Πάντως έχουν σημειωθεί και ριπαίοι άνεμοι με ταχύτητα 250 χιλιομέτρων/ώρα σε ακτίνα 80 χιλιομέτρων από το κέντρο κυκλώνα. Γενικότερα η ακτίνα εξάπλωσης του κυκλώνα μεγαλώνει όσο μεγαλύτερο είναι το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο και κινείται. Έτσι οι παραπάνω αποστάσεις διπλασιάζονται στα πλάτη των 35° πλην όμως η ταχύτητα των ανέμων τους αρχίζει σταδιακά να μειώνεται. Όταν ο τροπικός κυκλώνας ξεπεράσει πλάτη των 40° B. ή N. χάνει γρήγορα ισχύ, υποβαθμίζεται σε τροπική καταιγίδα, αμέσως μετά σε βαρομετρικό χαμηλό και τελικώς διαλύεται. Αυτό συμβαίνει διότι οι θάλασσες είναι πολύ ψυχρότερες, άρα η εξάτμιση νερού μειώνεται ραγδαία, με αποτέλεσμα να μην τροφοδοτείται πια με αρκετούς υδρατμούς. Όταν φτάσει στην ξηρά, ο κυκλώνας αρχίζει να χάνει ισχύ σε μόλις λίγες ώρες και διαλύεται πολύ σύντομα. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους, πρώτων επειδή η εξάτμιση νερού είναι πολύ μικρότερη και δευτερευόντως επειδή χάνει ενέργεια λόγω τριβών με την ξηρά.

5. ΜΗΧΑΝΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΝΗΣ – ATMOSPHERIC VORTEX ENGINE ΚΑΙ ΠΥΡΓΟΙ ΨΥΞΗΣ ΔΙΝΗΣ

Μηχανή Ατμοσφαιρικής Δίνης – Atmospheric Vortex Engine (AVE)

Η ατμόσφαιρα και η λειτουργία της αποτελεί εδώ και πολλά χρόνια αντικείμενο συζήτησης και μελέτης για τους επιστήμονες. Αφετηρία του προβληματισμού για τη συμπεριφορά της ατμόσφαιρας υπήρξε ο Carnot (1824) ο οποίος έβλεπε τη Γή σαν μια θερμοδυναμική μηχανή. Σύμφωνα με τον Carnot, το εργαζόμενο μέσο αυτής της μηχανής, που δεν είναι άλλο από την ατμόσφαιρα, λειτουργεί μεταφέροντας θερμότητα από τα ζεστά μέρη του πλανήτη στα πιο κρύα, δηλαδή από τον ισημερινό στους πόλους, δημιουργώντας έτσι ένα κλειστό θερμοδυναμικό κύκλο και παράγοντας μεγάλα ποσά έργου. Οι θερμικές μηχανές, αντίστοιχα και η Γή, παρουσιάζουν περιορισμούς ως προς την ενέργεια που μπορούν να μεταφέρουν και συνεπώς στο έργο που μπορούν να παράξουν. Αργότερα ο Lorenz (1960) υποστήριξε ότι οι κανόνες που διέπουν το φυσικό σύστημα του πλανήτη μας συνοψίζονται στην υπόθεση της μέγιστης διαθέσιμης δυναμικής ενέργειας, η οποία διαχέεται στο σύστημα μέσω της τυρβώδους μεταφοράς θερμότητας. Επίσης, ο Paltridge (1975, 1978), με τις μελέτες που παρουσίασε, έδειξε ότι το κλίμα της Γης λειτουργεί με στόχο τη μέγιστη παραγωγή εντροπίας λόγω της κατακόρυφης μεταφοράς θερμότητας. Η υποθέσεις του Paltridge και του Lorenz για μέγιστη παραγωγή εντροπίας και μέγιστη διαθέσιμη δυναμική ενέργεια αποδεικνύεται ότι ταυτίζονται όταν το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση. Με τη σειρά τους, ο Malkus (1954, 1956) και ο Busse (1970) κατέληξαν στην ονομαζόμενη σήμερα “βέλτιστη θεωρία” (Howard 1972, Busse 1978). Σύμφωνα με αυτή η παραγωγή εντροπίας από την τυρβώδη διάχυση είναι μέγιστη (Ozawa 2001), συμπέρασμα στο οποίο οδηγείται και η θεωρία του Prigogine (1947) αφού η υπόθεση της ελάχιστης παραγωγής εντροπίας, την οποία διατύπωσε, επαληθεύεται μόνο για συστήματα στα οποία δεν εμφανίζεται τυρβώδης μεταφορά θερμότητας. Η παρουσία του νερού διαφοροποιεί την κατάσταση, καθώς η υγρή συναγωγή δεν συμπεριφέρεται μόνο σαν θερμική μηχανή αλλά και σαν ατμοσφαιρικός αφυγραντής (Paulius και Held 2002). Θεμελιώδης διαφορά μεταξύ ξηρής και υγρής συναγωγής είναι οι μη αναστρέψιμες μεταβολές στην κατάσταση του νερού, γιατί συμβάλουν στην παραγωγή εντροπίας. Επίσης η διάχυση των υδρατμών μειώνει το έργο που παράγει η ατμόσφαιρα. Φαίνεται λοιπόν ότι η μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας υπερσχύει σημαντικά της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή.

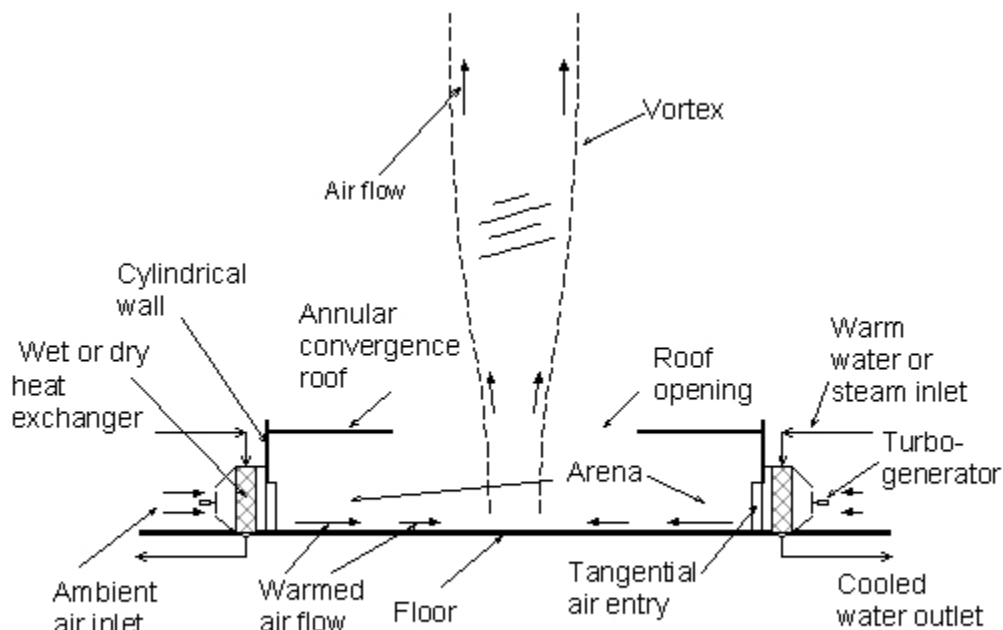
Όλα τα καιρικά φαινόμενα που εκδηλώνονται στην ατμόσφαιρα είναι φαινόμενα εκτόνωσης της ενέργειας που συσσωρεύεται. Τα φαινόμενα δίνης και κυριότερα οι τροπικές καταιγίδες είναι αυτά, κατά τη διάρκεια των οποίων, απελευθερώνονται τα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Αυτό συμβαίνει γιατί η ορμή και η θερμότητα μεταφέρονται πολύ αποτελεσματικά από τις στροβιλώδεις ροές. Η ισχύς μιας καταιγίδας δίνης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα στη βάση της (Malkus και Reihl 1960, Emanuel 1991, Holland 1997). Σύμφωνα με παρατηρήσεις και πειράματα, το 50 με 80% της ενέργειας ενός τυφώνα δημιουργείται από την αλληλεπίδραση αέρα και θάλασσας υπό συνθήκες χαμηλής πίεσης. Επίσης κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας καταιγίδας παράγεται και διαχέεται μηχανικό έργο (Renno και Ingersoll 1996). Το μηχανικό έργο που παράγεται αντιστοιχεί στο 20% περίπου της θερμότητας που παρέχει η θάλασσα (Michaud 2001).

Οι παρατηρήσεις και η κατανόηση του φυσικού μηχανισμού δημιουργίας δίνης και τροπικών καταιγίδων, οδήγησαν τον Michaud στην ανάπτυξη ιδεών για την πρακτική εκμετάλλευση του φαινομένου αυτού. Το 2001 ο Louis M. Michaud καταπιάστηκε με τη σχεδίαση της μηχανής ατμοσφαιρικής δίνης (Atmospheric Vortex Engine, AVE) για την οποία εκδίδει πατέντες έκτοτε. Η μηχανή ατμοσφαιρικής δίνης έρχεται σαν συνέχεια διαφόρων εργασιών και άρθρων του Michaud σχετικά με την ένταση των τυφώνων, τη διάχυση του έργου στην ατμόσφαιρα αλλά και τη γενικότερη θερμοδυναμική της συμπεριφορά. Ο Michaud καταλήγει σε αυτές του τις δημοσιεύσεις βασισμένος στις μελέτες πολλών επιστημόνων, όπως αυτές που αναφέραμε παραπάνω. Η μηχανή ατμοσφαιρικής δίνης είναι μια συσκευή που σκοπό της έχει την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω μιας ελεγχόμενης δίνης, η οποία έχει τη μορφή ανεμοστρόβιλου. Η διαδικασία θα μπορούσε να γίνει μια σημαντική πηγή παραγωγής καθαρής ενέργειας και θα μπορούσε να παρέχει πολλαπλά οφέλη για το φυσικό περιβάλλον, στην ευρύτερη περιοχή της εγκατάστασης, όπως κατακρημνίσματα και πτώση της θερμοκρασίας. Σε ευρύτερη κλίμακα η AVE μπορεί να συμβάλει στην άμβλυση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου ή επισπεύδοντας την ανοδική μεταφορά της θερμότητας.

Η AVE αξιοποιεί το φυσικό μηχανισμό που ευθύνεται για τους ανεμοστρόβιλους και τους τυφώνες και η λειτουργία της AVE βασίζεται, αφενός στο γεγονός ότι η ατμόσφαιρα θερμαίνεται από την επιφάνεια της Γης και ψύχεται στην κορυφή της, και αφετέρου, στο ότι περισσότερη μηχανική ενέργεια παράγεται κατά την εκτόνωση ενός αερίου που θερμαίνεται, από ό,τι απαιτείται για την επανασυμπίεση του ίδιου αερίου πίσω στην αρχική του πίεση μετά την ψύξη του. Η ενέργεια παράγεται ως αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής διαφοράς της δίνης θερμότητας από τη θερμοκρασία που επικρατεί στο κάτω μέρος της ατμόσφαιρας σε αυτή που επικρατεί στην τροπόπαυση. Η πηγή της ενέργειας είναι η θερμική συναγωγή, μια διαδικασία που είναι υπεύθυνη για την κυκλοφορία σε λέβητες και σε πολλές άλλες βιομηχανικές διεργασίες. Η τεχνολογία που απαιτείται είναι παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται στους πύργους ψύξης.

Περιγραφή Λειτουργίας

Η εισαγωγή αέρα εφαιπτομενικά στη βάση ενός κατακόρυφου κυλινδρικού τοιχώματος παράγει μια δίνη συναγωγής που λειτουργεί σαν δυναμική καμινάδα. Δηλαδή, σε αυτή τη δίνη η κεντρομόλος δύναμη αποτρέπει τον περιβάλλοντα ατμοσφαιρικό αέρα από το να εισέρθει στο ανερχόμενο ρεύμα αέρα και να αναμειχτεί με αυτό. Η διαδικασία ανάκτησης κινητικής ενέργειας είναι παρόμοια με την ανάκτηση της κινητικής ενέργειας σε ένα σωλήνα Venturi. Σύμφωνα με τους νόμους που διέπουν την δυναμική των ρευστών, η ταχύτητα ενός ρευστού αυξάνεται καθώς αυτό περνά μέσα από μια συστολή, ώστε να τηρείται η αρχή της συνέχειας, ενώ η πίεση του μειώνεται για να ικανοποιηθεί η αρχή διατήρησης της μηχανικής ενέργειας. Η κινητική ενέργεια του ανερχόμενου αέρα θα ανακτηθεί όταν ο αέρας επιβραδύνεται καθώς η διάμετρος της δίνης επεκτείνεται ανεβαίνοντας προς την κορυφή της. Στη διάρκεια του χρόνου κατά τον οποίο η κινητική ενέργεια παράγεται και ανακτάται, ασκείται η κεντρομόλος δύναμη που δημιουργεί τη δυναμική καμινάδα.



Atmospheric vortex engine side view

Εικόνα 17: Πλάγια όψη της AVE. [31]

Η είσοδος του αέρα στη δίνη περιορίζεται, κατά κύριο λόγο, μόνο σε ένα λεπτό στρώμα κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα, όπου η φυγόκεντρη δύναμη είναι χαμηλή, επειδή η εφαπτομενική ταχύτητα είναι μειωμένη λόγω της τριβής με την επιφάνεια του πυθμένα. Για να ενισχύσουμε την τριβή, μπορούμε να αυξήσουμε την τραχύτητα του πυθμένα με πτερύγια τριβής ή με μικρές προεξοχές. Ταυτόχρονα εμφανίζεται σύγκλιση της ροής και είσοδος του αέρα στη δίνη και στο επίπεδο του άνω μέρους της εφαπτομενικής εισόδου είναι όμως ανάλογη με την τραχύτητα της επιφάνειας οροφής και συνεπώς είναι, βάσει σχεδίασης, συγκριτικά πολύ μικρότερη της σύγκλισης που έχουμε στον πυθμένα.

Σκοπός του κυλινδρικού τοιχώματος είναι να αναγκάσει τον αέρα να περάσει μέσα από τους εφαπτομενικούς αγωγούς εισόδου και να αποτρέψει τον άνεμο του περιβάλλοντος να διαταράξει τη δίνη μέχρι να σταθεροποιηθεί. Ο όγκος εντός του κυλινδρικού τοιχώματος, όπου σχηματίζεται η δίνη ονομάζεται "αρένα". Το κυλινδρικό τοίχωμα έχει πολυγωνικό σχήμα και θα μπορούσε να έχει σταθερή διάμετρο ή διάμετρο που μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το ύψος. Το κυλινδρικό τοίχωμα θα είναι ανοικτό στην κορυφή και ενδεικτικά η διάμετρος του θα μπορούσε να είναι από 100 έως 200m ενώ το ύψος του 50m περίπου. Η διάμετρος του ανοίγματος οροφής θα πρέπει να είναι της τάξης του 30% της διαμέτρου του κυλινδρικού τοιχώματος και το ύψος της αρένας θα είναι περίπου το 30% της διαμέτρου της ενώ το ύψος των εφαπτομενικών εισόδων είναι περίπου το μισό του ύψους της αρένας.

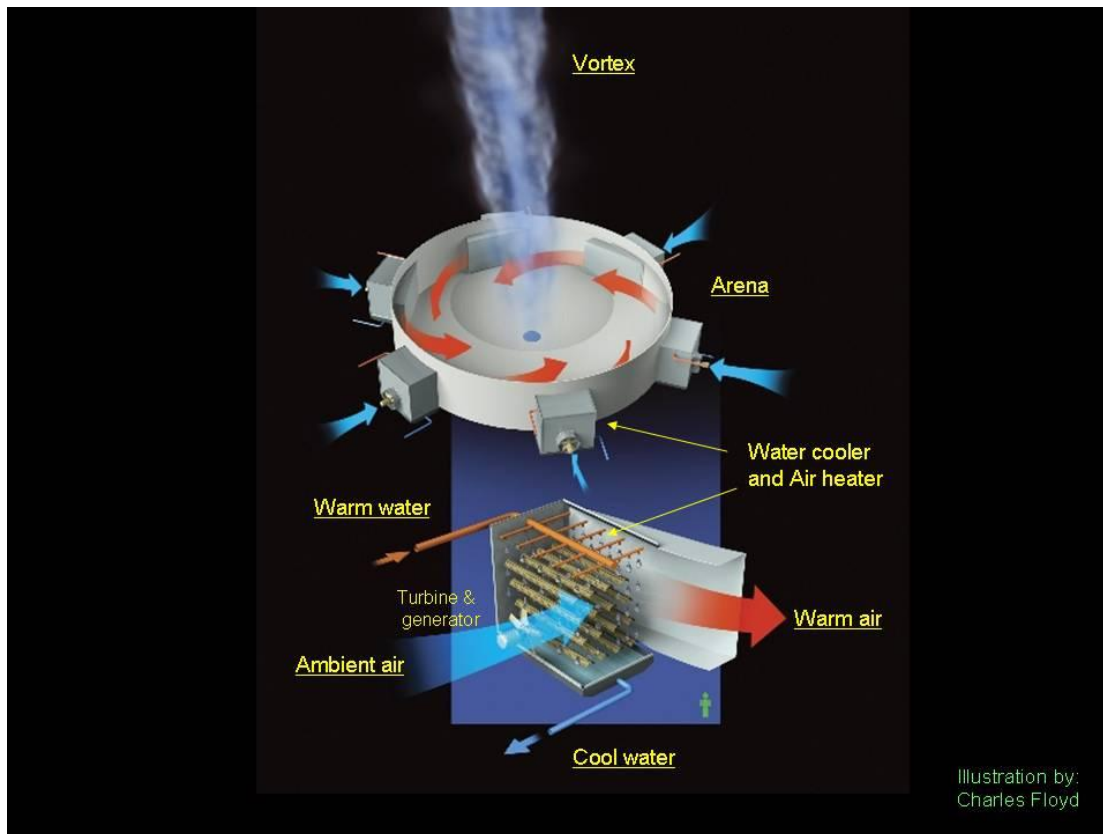
Η δίνη που σχηματίζεται είναι αυτορυθμιζόμενη και η διάμετρος της προσαρμόζεται μέχρις ότου η ακτινική διαφορά πίεσης εξισορροπηθεί από την κεντρομόλο δύναμη. Η διάμετρος δηλαδή της μέγιστης εφαπτομενικής ταχύτητας κοντά στο επίπεδο του εδάφους, θα μπορούσε να είναι από το ένα δέκατο έως το ένα τέταρτο της διαμέτρου του κυλινδρικού

τοιχίου. Η δίνη θα μπορούσε, για παράδειγμα, να είναι 50m σε διάμετρο στη βάση της και να αυξάνει καθώς ανεβαίνει προς την τροπόπαυση. Η δίνη δηλαδή θα μπορούσε να έχει το μέγεθος ενός μεσαίου ανεμοστρόβιλου ή ενός μεγάλου υδροστρόβιλου. Ένα σύστημα τέτοιου μεγέθους θα μπορούσε να δημιουργήσει ισχύ 50 έως 500MW.

Η δίνη ξεκινά με την προσωρινή θέρμανση του αέρα που εισέρχεται στην αρένα με καύσιμο ή ατμό. Ο ατμός που απαιτείται για την εκκίνηση μπορεί να εισαχθεί εφαπτομενικά από τις πλαϊνές εισόδους του τοιχώματος παρασύροντας μαζί του και ατμοσφαιρικό αέρα ενώ ταυτόχρονα τον θερμαίνει και αυξάνει την περιεκτικότητά του σε υγρασία. Ένας άλλος τρόπος εκκίνησης της δίνης είναι η παροχή ατμοσφαιρικού αέρα στην αρένα μέσω των εφαπτομενικών εισόδων με τη βοήθεια ανεμιστήρων. Μετά τη δημιουργία της δίνης ο μηχανισμός εκκίνησης σταματά τη λειτουργία του. Η θερμότητα που θα εξασφαλίσει τη διατήρηση της δίνης μετά την εκκίνηση της μπορεί να είναι το φυσικό θερμικό φορτίο του αέρα περιβάλλοντος ή μπορεί να προέρχεται από ηλιακούς συλλέκτες που βρίσκονται περιφερικά του σταθμού, παρόμοιους με αυτούς που χρησιμοποιούνται στις ηλιακές καμινάδες, ή τέλος μπορεί να παρέχεται από περιφερειακούς εναλλάκτες θερμότητας που βρίσκονται εξωτερικά του κυλινδρικού τοιχώματος και ανάντη των εφαπτομενικών εισόδων.

Ο ηλιακός συλλέκτης θερμότητας θα καλύπτεται με μια διάφανη οροφή και θα περιβάλλει το κυλινδρικό τοίχωμα. Ο ατμοσφαιρικός αέρας θα εισέρχεται στο ανοικτό εξωτερικό χείλος του ηλιακού συλλέκτη. Ο θερμός αέρας θα εγκαταλείπει το εσωτερικό χείλος του ηλιακού συλλέκτη και θα εισάγεται στο κυλινδρικό τοίχωμα μέσω των εφαπτομενικών εισόδων του. Το κυλινδρικό τοίχωμα της AVE θα προστατεύει τον ηλιακό συλλέκτη από τυχόν ζημιές που θα μπορούσε να προκαλέσει η μεγάλη ταχύτητα του αέρα της δίνης. Εναλλακτικά, ο ηλιακός συλλέκτης θα μπορούσε να αντικατασταθεί από “ηλιακές λίμνες” στις οποίες ηλιακά θερμαινόμενο νερό θα αντλείται σε εναλλάκτες για τη μεταφορά της θερμότητας του νερού στον αέρα που θα τροφοδοτεί τη δίνη.

Στην περίπτωση που έχουμε περιφερικούς εναλλάκτες, η πηγή θερμότητας που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι είτε ζεστό θαλασσινό νερό είτε απόβλητη βιομηχανική θερμότητα. Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να επιτευχθεί με οποιασδήποτε μορφής εναλλάκτη από αυτούς που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, ανάλογα με το θερμικό φορτίο που πρέπει να διαχειριστούμε σε κάθε εφαρμογή. Κάθε εναλλάκτης έχει δυο εισόδους και δυο εξόδους καθώς διασταυρώνονται δυο συνεργαζόμενα ρεύματα ρευστού, ένα αέρα και ένα νερού. Οι εναλλάκτες σταυροροής υγρής ψύξης θα ήταν το προτιμότερο είδος εναλλάκτη για την εφαρμογή μας. Οι εναλλάκτες αυτοί λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο λειτουργίας που έχουμε στους πύργους ψύξης ανοικτού κυκλώματος.



Εικόνα 18: Άποψη από την αρένα, την επαπτομενική είσοδο και τον εναλλάκτη θερμότητας. [31]

Γενικά ο βασικός σκοπός των πύργων ψύξης είναι να μειωθεί η θερμοκρασία του νερού ή άλλων υγρών. Οι πύργοι ψύξης είναι ουσιαστικά εναλλάκτες θερμότητας που αφαιρούν θερμότητα από το ψυχόμενο ρευστό και την μεταφέρουν στον αέρα. Η μείωση της ενθαλπίας του νερού είναι ίση με την αύξηση της ενθαλπίας του αέρα. Ένας πύργος ψύξης ψύχει το ρεύμα νερού και ταυτόχρονα θερμαίνει το ρεύμα αέρα αυξάνοντας και την υγρασία του. Οι υγροί πύργοι ψύξης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί γιατί σταγόνες νερού πέφτουν σε splash bars και διαχωρίζονται κατ'επανάληψη σε μικρότερα σταγονίδια, μεγαλώνοντας έτσι την επιφάνεια επαφής μεταξύ του αέρα και του νερού. Η θερμοκρασία του νερού που εισέρχεται σε έναν πύργο ψύξης, είναι συνήθως 10 έως 20°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα. Ο αέρας αφήνοντας έναν πύργο ψύξης είναι συνήθως κορεσμένος σε θερμοκρασία 3 έως 10°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία εισόδου του νερού και πλησιάζει την ισορροπία με το νερό που εισέρχεται σε αυτόν. Η προσέγγιση της ισορροπίας εξαρτάται από το μέγεθος του όγκου πλήρωσης του πύργου και από την αναλογία της ροής του νερού προς το ρεύμα του αέρα. Σε μια μηχανή ατμοσφαιρικής δίνης, χρησιμοποιώντας θαλασινό νερό ως πηγή θερμότητας, ο αέρας εξόδου θα μπορούσε να έχει θερμοκρασία 1 έως 3°C χαμηλότερη από ό, τι η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας και σχετική υγρασία πάνω από 95%. Στην AVE, ο πρωταρχικός σκοπός του πύργου ψύξης είναι η θέρμανση του αέρα και όχι η ψύξη του νερού. Ο όρος “πύργος ψύξης” διατηρείται, επειδή χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία. Ένα “ψυκτικό στοιχείο” είναι η μικρότερη υποδιαίρεση ενός πύργου ψύξης η οποία μπορεί να

λειτουργήσει ως ανεξάρτητη μονάδα σε σχέση με τη ροή αέρα και νερού. Το “ψυκτικό στοιχείο” περιλαμβάνει: πληρωτικό υλικό (packing), σταγονοσυλλέκτες, περσίδες, ζεστές και κρύες λεκάνες νερού και ανεμιστήρες.

Ένα πλήθος στροβίλων, τοποθετημένων περιφερειακά του κυλινδρικού τοιχώματος και ανάντη των εφαπτομενικών εισόδων, είναι υπεύθυνο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας, η οποία θα μετατραπεί στη συνέχεια σε ηλεκτρική με τη βοήθεια ηλεκτρογεννητριών. Η υποπίεση, που προκαλεί η δίνη στην βάση της, είναι η κινητήρια δύναμη των στροβίλων. Η πτώση πίεσης αυτή είναι επακόλουθο της εξαναγκασμένης ροής του αέρα λόγω της δίνης και ενισχύεται από τη λανθάνουσα θερμότητα που προσδίδεται στη δίνη μέσω των εναλλακτών. Η μείωση πίεσης στη βάση μιας ελεγχόμενης δίνης είναι μεγαλύτερη από την μείωση της πίεσης στη βάση ενός τυφώνα επειδή η επαφή αέρα-νερού είναι πιο αποτελεσματική και καλύτερα ελεγχόμενη σε ένα ψυκτικό στοιχείο από ότι στο φυσικό ψεκασμό.

Οι συσκευές εντός των οποίων ένα αέριο αποτονώνεται για να παράξει έργο είναι γενικά γνωστές ως στρόβιλοι. Εναλλακτικά του όρου στρόβιλος χρησιμοποιείται και ο όρος τουρμπίνα. Οι τουρμπίνες μπορούν να έχουν αξονική ή ακτινική ροή. Τουρμπίνες αξονικής ροής είναι πιο συνηθισμένες. Δεδομένης της παροχής του αέρα και της διαφορικής πίεσης η βιομηχανία παραγωγής στροβίλων είναι σε θέση να σχεδιάσει τον κατάλληλο στρόβιλο για την κάθε εφαρμογή. Ο ιδανικός στρόβιλος έχει βαθμό απόδοσης 100% και η εντροπία εξόδου του εργαζόμενου μέσου ισούται με εντροπία εισόδου του. Πραγματικοί στρόβιλοι έχουν απόδοση από 80% έως 90% και η εντροπία εξόδου είναι ελαφρώς υψηλότερη από την εντροπία εισόδου. Μείωση της αποτελεσματικότητας του στροβίλου συνδέεται άμεσα με την αύξηση της εντροπίας του εργαζόμενου μέσου.

Το προτιμώμενο είδος στροβίλου για την περίπτωση μας είναι ο αξονικός στρόβιλος. Υπάρχουν δύο τύποι αξονικών στροβίλων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν: τουρμπίνες με ακροφύσια εισόδου και τουρμπίνες περιστρεφόμενων πτερυγίων με σταθερό βήμα, που είναι παρόμοιες με τις τελευταίες βαθμίδες μιας τουρμπίνας καυσαερίων. Στην εφαρμογή της AVE δεν απαιτείται η χρήση συμπιεστή, όπως στον αεροστρόβιλο, αφού η ροή του αέρα εξασφαλίζεται από τη δίνη. Ο έλεγχος της ροής επιτυγχάνεται με το άνοιγμα και κλείσιμο των σταθερών ακροφυσίων εισόδου. Οι τουρμπίνες της AVE δεν χρειάζεται να έχουν προδιαγραφές αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως αυτές που συναντώνται σε στροβίλους καυσαερίων. Για διαφορά πίεσης πάνω από περίπου 1kPa οι τουρμπίνες με ακροφύσια εισόδου είναι το προτιμώμενο είδος στροβίλου. Ενώ για διαφορική πίεση πάνω από 5kPa απαιτούνται περισσότερες από μια βαθμίδες οπότε χρησιμοποιούμε τουρμπίνες χωρίς ακροφύσια εισόδου, με πτερύγια μεταβλητού βήματος. Στην περίπτωση που η τουρμπίνα δεν έχει ακροφύσια εισόδου, η παροχή του αέρα ελέγχεται με μεταβολή του βήματος των πτερυγίων καθώς επίσης και με αυξομείωση του ηλεκτρικού φορτίου. Στρόβιλοι χωρίς ακροφύσια εισόδου είναι η προτιμώμενη επιλογή και για διαφορά πίεσης μικρότερη από 1kPa. Και τα δύο είδη στροβίλων, με ή χωρίς ακροφύσια εισόδου, έχουν σημαντικές διαφορές από τις συμβατικές τουρμπίνες. Η μηχανική ενέργεια που παράγεται ανά μονάδα επιφανείας του πτερυγίου στροφείου αυξάνεται με τη διαφορική πίεση. Η διάμετρος ενός στροβίλου για την

εφαρμογή της AVE, με δεδομένο μηχανικό βαθμό απόδοσης, είναι πολύ μικρότερη από τη διάμετρο των συμβατικών στροβίλων για τον ίδιο βαθμό απόδοσης. Οι στρόβιλοι χωρίς ακροφύσια εισόδου μπορούν να λειτουργήσουν και ως ανεμιστήρες αν η γεννήτρια χρησιμοποιηθεί σαν κινητήρας. Κατά αυτό τον τρόπο έχουν διπλή χρήση, καθώς μπορούν να συμβάλουν στην εκκίνηση της δίνης, ενώ μετά τη σταθεροποίησή της παράγουν μηχανική ενέργεια. Αντίθετα οι στρόβιλοι που φέρουν ακροφύσια εισόδου δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα.

Για κάθε επαπτομενική είσοδο στο τοίχωμα έχουμε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Οι εναλλάκτες λειτουργούν σε πίεση χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής γιατί συνδέονται άμεσα με τη βάση της δίνης όπου η πίεση είναι υπό-ατμοσφαιρική. Επίσης, για να μπορεί να ελεγχθεί η ροή του αέρα που εισέρχεται χρησιμοποιούμε ρυθμιζόμενους περιοριστές ροής τοποθετημένους εντός των επαπτομενικών αγωγών εισόδου καθώς ροή μεγάλων ταχυτήτων θα ήταν καταστροφική για τους εναλλάκτες. Για κάθε εναλλάκτη υπάρχει ένας στρόβιλος συνδεδεμένος σε σειρά, ο οποίος λειτουργεί και σαν περιοριστής ροής, ενώ μπορεί να υπάρχει ταυτόχρονα και ένας ανεμιστήρας, που χρησιμεύει στην εκκίνηση της δίνης. Η ταχύτητα της ροής εντός των εναλλακτών δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 3m/s για να μην προκαλέσει ζημιές στο εσωτερικό τους. Επιπλέον στρόβιλοι τοποθετούνται στους επαπτομενικούς αγωγούς χωρίς να είναι συνδεδεμένοι σε σειρά με εναλλάκτες.

Η φορά περιστροφής της δίνης μπορεί να είναι ωρολογιακή ή αντί-ωρολογιακή ανάλογα με τη φορά που της προσδίδεται από τους επαπτομενικούς αγωγούς. Είναι προτιμότερο η δίνη να περιστρέφεται με κυκλωνική φορά.

Ένα κυκλικό δωμάτιο είναι τοποθετημένο στο κέντρο του σταθμού κάτω από την αρένα. Η οροφή του δωματίου είναι ανοιχτή και το άνοιγμά της μπορεί να είναι μεταβλητό. Υπάρχουν επίσης υπόγειοι αεραγωγοί κάτω από την αρένα. Οι αεραγωγοί αυτοί μπορούν να εισάγουν αέρα στην αρένα επαπτόμενα σε μικρότερες διαμέτρους. Είναι σχεδιασμένοι να έχουν καμπύλες άκρες που εισέρχονται στην αρένα βαθμιαία ή μπορούν να συνδέονται επαπτομενικά με το υπόγειο κυκλικό δωμάτιο. Οι αεραγωγοί που έχουν κοινή φορά περιστροφής με τη δίνη χρησιμοποιούνται για το ξεκίνημά της και μπορούν να έχουν steam injectors ενώ οι αντίθετης φοράς χρησιμεύουν στο σταμάτημα της δίνης. Έκτος από την εκκίνηση και το σταμάτημα της δίνης οι υπόγειοι αγωγοί τροφοδοτούν τη δίνη με αέρα έτσι ώστε η πίεση κατάντη των στροβίλων να προσεγγίζει αυτή που επικρατεί στο κέντρο της δίνης.

Η δίνη θα σταματήσει με τον περιορισμό της ροής του θερμαινόμενου αέρα με θετική περιστροφή και εάν είναι απαραίτητο με την εισαγωγή μη θερμαινόμενου αέρα με αρνητική περιστροφή.

Τα ενεργειακά οφέλη από μια εγκατάσταση AVE σε ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό θα είναι πολύ σημαντικά. Για παράδειγμα, ένας θερμοηλεκτρικός σταθμός 500MW απορρίπτει, τυπικά, 1000MW θερμότητας στην ατμόσφαιρα μέσω της ψυκτικής του διαδικασίας. Η AVE θα μπορούσε να αυξήσει την ηλεκτρική παραγωγή αυτού του εργοστασίου από 500MW σε 700MW, χρησιμοποιώντας το 20% των 1000MW απορριπτόμενης θερμότητας για να

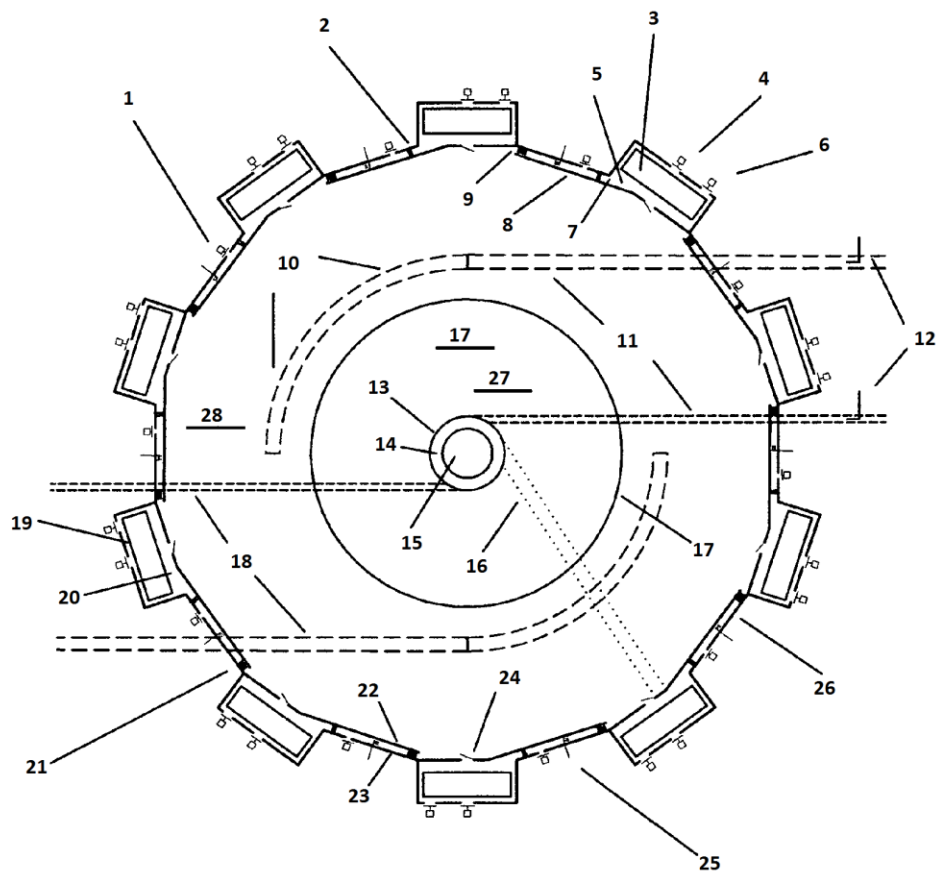
λειτουργήσει. Με αυτό τον τρόπο η τελική έξοδος της μονάδας παραγωγής ενέργειας θα αυξηθεί κατά 40%.

Ο έλεγχος του σταθμού θα γίνεται από ένα δωμάτιο ελέγχου σχετικά απομακρυσμένο από το σταθμό, για λόγους ασφαλείας. Στο δωμάτιο αυτό θα υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης όλων των παραμέτρων που διέπουν την λειτουργία του σταθμού (πίεση, ταχύτητα, θερμοκρασία αέρα) με τη βοήθεια αισθητήρων και μετρητικών οργάνων σε καθορισμένα σημεία της εγκατάστασης. Θα υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα επίδρασης σε αυτά τα μεγέθη με τον χειρισμό βανών και περιοριστών ροής, εξασφαλίζοντας έτσι τον απόλυτο έλεγχο της μονάδας. [35]

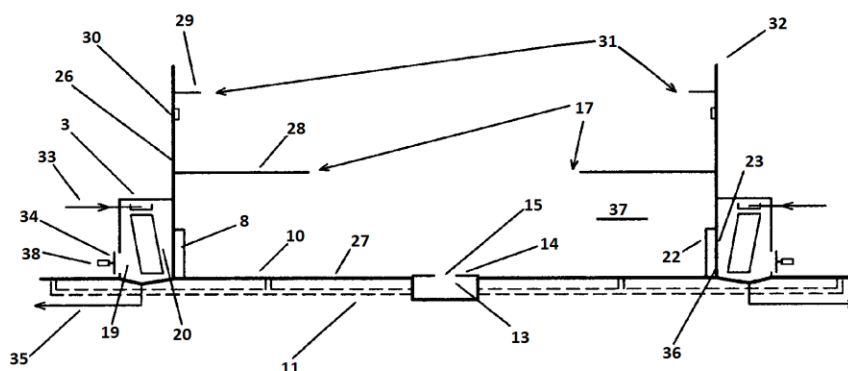
Παρακάτω βλέπουμε μια κάτοψη και μια πλάγια τομή της AVE με εφαπτομενικές εισόδους και εναλλάκτες θερμότητας.

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ
1	Ζεύγος Στροβίλου-Γενήτριας	11	Υπόγειος αγωγός
2	Περιοριστής ροής	12	Steam jet υπόγειου αγωγού
3	Εναλλάκτης θερμότητας	13	Κυλινδρικό δωμάτιο
4	Ζεύγος Στροβίλου-Γενήτριας	14	Κορυφή κυλινδρικού δωματίου
5	Κάτω είσοδος αέρα κυλινδρικού τοιχώματος	15	Άνοιγμα κορυφής κυλινδρικού δωματίου
6	Ανεμιστήρας	16	Υπόγειος αγωγός κυλινδρικού δωματίου
7	Εφαπτομενική είσοδος αέρα αρένας	17	Συγκλίνον άνοιγμα κορυφής
8	Γραμμική εφαπτομενική είσοδος αέρα	18	Υπόγειος αγωγός κυλινδρικού δωματίου
9	Εφαπτομενική έξοδος αέρα	19	Είσοδος αέρα εναλλάκτη
10	Καμπύλη έξοδος υπόγειου αγωγού	20	Έξοδος αέρα εναλλάκτη

Πίνακας 4: Περιγραφή στοιχείων AVE όπως φαίνονται αριθμημένα στις παρακάτω Εικόνες 19 και 20. [35]



Εικόνα 19: Κάτοψη Μηχανής Ατμοσφαιρικής Δίνης με αρίθμηση των σημαντικότερων στοιχείων της. [35]



Εικόνα 20: Πλάγια όψη Μηχανής Ατμοσφαιρικής Δίνης με αρίθμηση των σημαντικότερων στοιχείων της. [35]

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ
21	Βαλβίδα γραμμικής επαπτομενικής εισόδου αέρα	30	Εσωτερικό κυλινδρικό δαχτυλίδι εισόδου αέρα
22	Εσωτερικός τοίχος επαπτομενικής εισόδου αέρα	31	Άνω άνοιγμα κυλινδρικού τοιχώματος
23	Εξωτερικός τοίχος επαπτομενικής εισόδου αέρα	32	Άνω άκρο κυλινδρικού τοιχώματος
24	Είσοδος αέρα αντιστροφής κυκλοφορίας	33	Είσοδος θερμού νερού
25	Steam jet	34	Στρόβιλος
26	Κυλινδρικό τοίχωμα	35	Έξοδος ψυχρού νερού
27	Πάτωμα αρένας	36	Κάτω άκρο κυλινδρικού τοιχώματος
28	Συγκλίνουσα οροφή	37	Αρένα
29	Δαχτυλίδι οροφής	38	Γεννήτρια

Πίνακας 5: Περιγραφή στοιχείων AVE όπως φαίνονται αριθμημένα στις παραπάνω Εικόνες 19 και 20. [35]

Πύργος Ψύξης Δίνης

Παράλληλα με την AVE και βασισμένος στις ίδιες αρχές λειτουργίας, ο Michaud σχεδίασε και εφαρμογή πύργου ψύξης δίνης. Ο πύργος ψύξης δίνης έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί χρησιμοποιώντας την δίνη αλλά και χωρίς αυτή. Στο μοντέλο χρήσης χωρίς τη δίνη η είσοδος του αέρα γίνεται ακτινικά στην αρένα ενώ στην περίπτωση παραγωγής δίνης η είσοδος θα είναι εφαπτομενική, όπως στην AVE.

Περιγραφή λειτουργίας

Η λειτουργία σε κατάσταση μη δίνης προβλέπεται από τον σχεδιαστή της εγκατάστασης για περιπτώσεις ασφαλείας, στην περίπτωση που ο ιδιοκτήτης δεν θέλει να λειτουργήσει σε κατάσταση περιδίνησης. Λειτουργία σε κατάσταση μη-δίνης είναι παρόμοια με εκείνη ενός συμβατικού πύργου ψύξης εξαναγκασμένης ροής. Το κυλινδρικό τοίχωμα περιμετρικά του πύργου έχει οκταγωνικό σχήμα και προσεγγίζει τον κύκλο όσο η εγκατάσταση μεγαλώνει και προστίθενται περισσότερα ψυκτικά στοιχεία. Ο αριθμός και το μέγεθος των ψυκτικών στοιχείων στον ψυκτικό πύργο δίνης εξαρτώνται από την ψυκτική του ικανότητα και είναι περίπου ίδια με τον αντίστοιχο συμβατικό πύργο ψύξης. Ο χώρος εντός του τοιχώματος ονομάζεται αρένα όπως και στην AVE. Σε κάθε είσοδο του τοιχώματος υπάρχουν ανεμιστήρες που εξασφαλίζουν τη ροή του αέρα και ψυκτικά στοιχεία για τη μεταφορά του ψυκτικού φορτίου. Ο αέρας, ωθούμενος από τους ανεμιστήρες, θερμαίνεται στους εναλλάκτες και εισέρχεται στην αρένα μέσω ακτινικών εισόδων.

Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας, η ανοδική κίνηση του αέρα, που συγκεντρώνεται στην αρένα, πρέπει να ενισχυθεί από μια καμινάδα για να εξέρθει στην ατμόσφαιρα, όπως συμβαίνει στους συμβατικούς πύργους ψύξης. Η καπνοδόχος μπορεί να έχει συγκλίνοντα και αποκλίνοντα τμήματα και πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να αποτρέψει τη δημιουργία ομίχλης και την ανακυκλοφορία. Επίσης η άνωση του θερμού αέρα εντός του ακροφύσιου μειώνει την ενέργεια που απαιτείται για να ωθήσει τον αέρα μέσα από τους εναλλάκτες στην αρένα. Με μια αρκετά υψηλή καμινάδα μπορεί να είναι δυνατό να απενεργοποιηθούν οι ανεμιστήρες όταν η ροή έχει πλέον σταθεροποιηθεί.

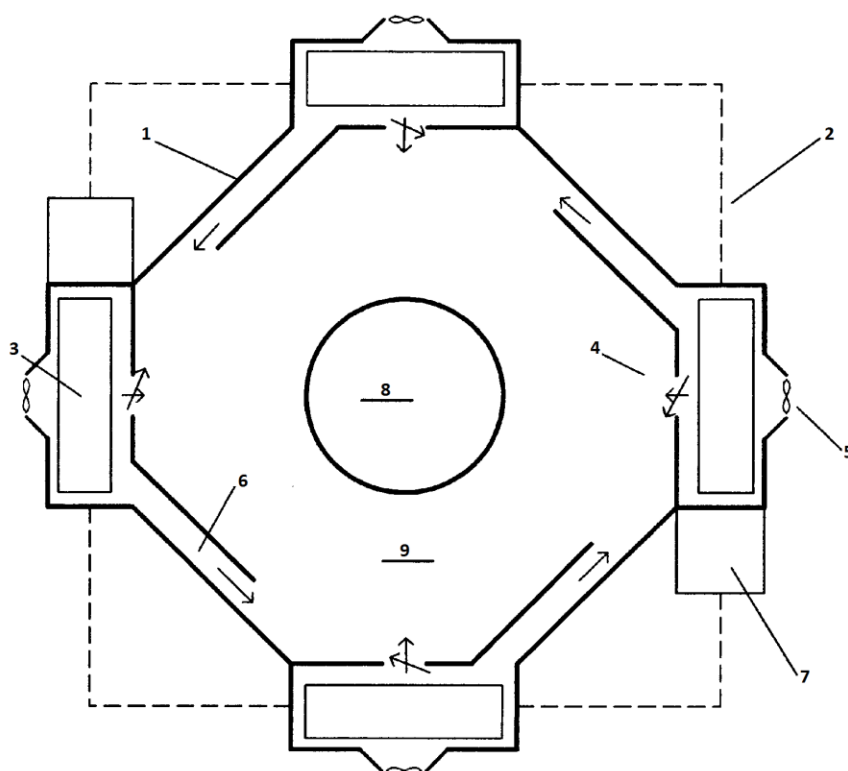
Λειτουργία σε κατάσταση περιδίνησης θα είναι παρόμοια με τη λειτουργία της AVE, όπως την περιγράψαμε παραπάνω και δεν απαιτεί την ύπαρξη καμινάδας. Σε αντίθεση με τη λειτουργία σε κατάσταση μη-δίνης, η εισαγωγή του αέρα γίνεται πλέον από τις εφαπτομενικές εισόδους της αρένας. Ο περιστρεφόμενος θερμός αέρας δημιουργεί τη δίνη και αφού αυτή σταθεροποιηθεί οι ανεμιστήρες σταματούν τη λειτουργία τους.

Η εναλλαγή μεταξύ των δυο καταστάσεων λειτουργίας του ψυκτικού πύργου γίνεται ανοίγοντας τις εφαπτομενικές εισόδους ενόσω κλείνουν τις ακτινικές και το αντίστροφο. Τόσο οι εφαπτομενικές όσο και οι ακτινικές εισόδους έχουν περιοριστές ροής. Οι περιοριστές θα μπορούσε να είναι περιστρεφόμενα πτερύγια. Τα περιστρεφόμενα πτερύγια στις εφαπτομενικές εισόδους θα περιστρέφονται σε αντίθετη κατεύθυνση, γύρω από τον οριζόντιο άξονα. Τα περιστρεφόμενα πτερύγια στις ακτινικές εισόδους θα περιστρέφονται στην ίδια κατεύθυνση, γύρω από τον κατακόρυφο άξονα για να επιτρέπουν την είσοδο αέρα στην αρένα, είτε ακτινικά είτε με αντίστροφη περιστροφή. Εναλλακτικά οι ακτινικές εισόδους θα μπορούσαν να κλείσουν με αφαιρούμενα πάνελ όταν δεν υπάρχει ανάγκη να

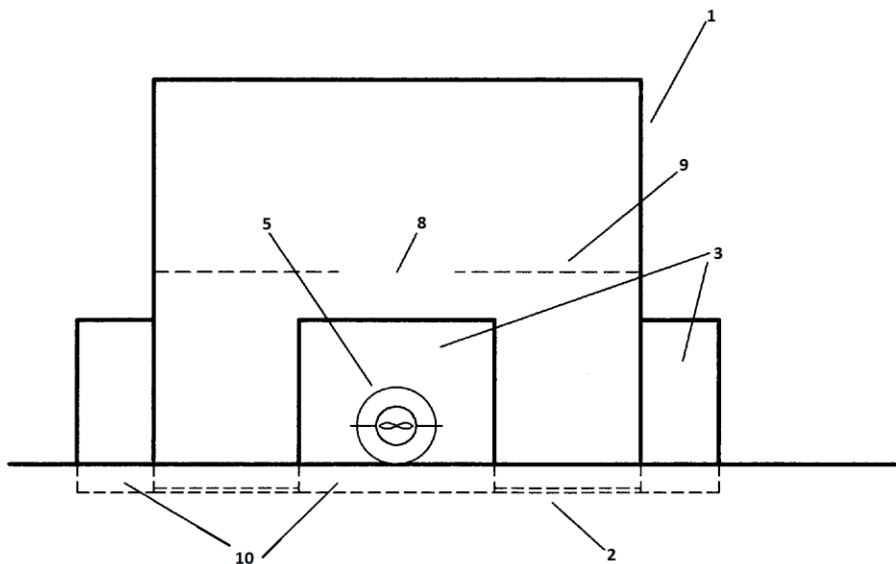
λειτουργήσει σε κατάσταση μη-δίνη. Οι περιοριστές στις εισόδους του ανεμιστήρα και στις εφαπτομενικές εισόδους εμποδίζουν τη ροή του αέρα από να πάρει πάρα πολύ μεγάλες τιμές, όταν η κατάσταση περιδίνησης σταθεροποιηθεί.

Δεν είναι αναγκαίο για όλα τα ψυκτικά στοιχεία να είναι σε λειτουργία και όσα δεν βρίσκονται σε υπηρεσία απομονώνονται με περιοριστές ροής οι οποίοι είναι τοποθετημένοι είτε στις εισόδους των ανεμιστήρων είτε στις ακτινική και εφαπτομενικές εισόδους της αρένας. Κάτω από κάθε ψυκτικό στοιχείο είναι τοποθετημένες ψύχρες λεκάνες νερού που επικοινωνούν μεταξύ τους με υπόγειες γραμμές. Η κυκλοφορία του νερού γίνεται με τη βοήθεια αντλιών.

Πρώτα ξεκινά η ροή ζεστού νερού στους εναλλάκτες και στη συνέχεια ξεκινά η παροχή του αέρα από τους ανεμιστήρες. Οι εναλλάκτες λειτουργούν με πίεση κοντά στην ατμοσφαιρική και ο δίσκος διανομής ζεστού νερού δεν χρειάζεται να είναι μέσα στο ψυκτικό στοιχείο. Η ροή του νερού προς τα επιμέρους ψυκτικά στοιχεία ρυθμίζεται με βαλβίδες. Η ροή του αέρα και η θερμοκρασία του νερού στα μεμονωμένα ψυκτικά στοιχεία πρέπει να παρακολουθείται και να ρυθμίζεται με την προσαρμογή της ταχύτητας ή της κλίσης των πτερυγίων του ανεμιστήρα. [35]



Εικόνα 21: Κάτοψη Πύργου Ψύξης Δίνης με αρίθμηση των σημαντικότερων στοιχείων του. [35]



Εικόνα 22: Πλάγια όψη Πύργου Ψύξης Δίνης με αριθμηση των σημαντικότερων στοιχείων του. [35]

A/A	ΠΕΙΓΡΑΦΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ
1	Εξωτερικό κυκλικό τοίχωμα
2	Γραμμή επικοινωνίας λεκανών νερού
3	Εναλλάκτης θερμότητας
4	Είσοδος ακτινικής ή αντίστροφης ροής
5	Ανεμιστήρας/Στρόβιλος
6	Εφαπτομενική είσοδος αέρα
7	Αντλιοστάσιο
8	Άνοιγμα οροφής
9	Οροφή
10	Λεκάνη Ψυχρού νερού

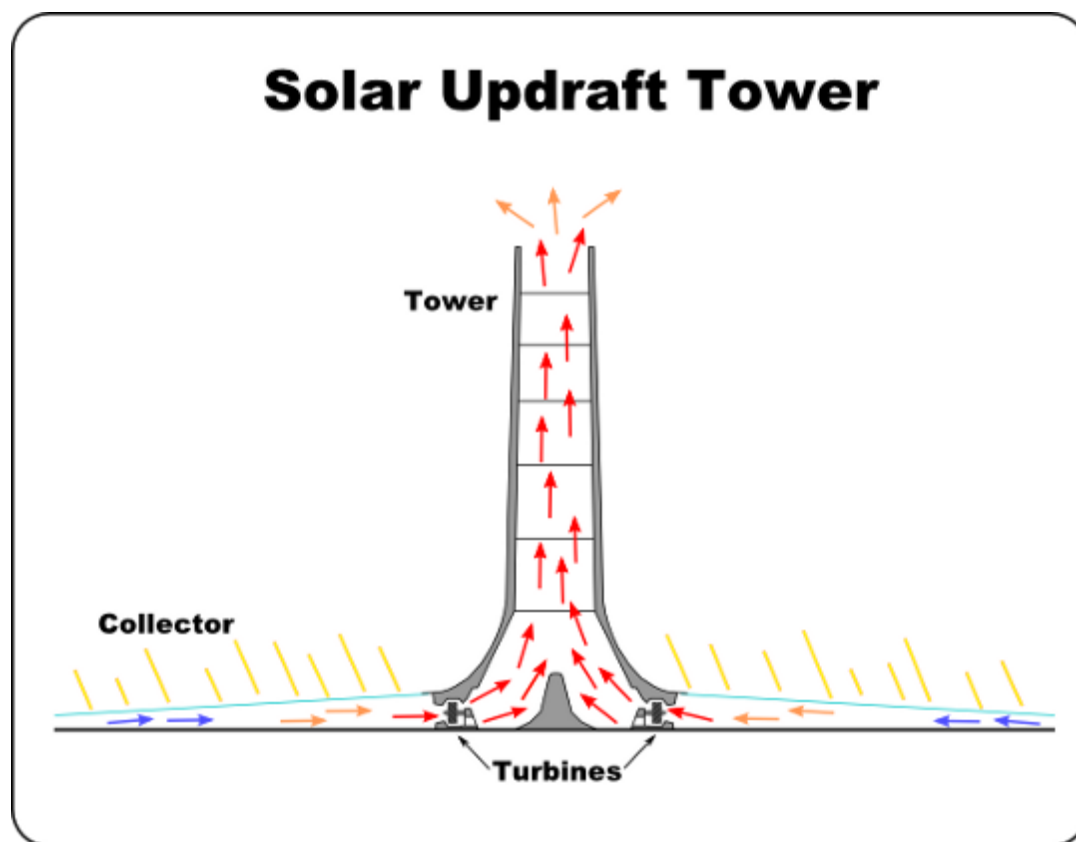
Πίνακας 6: : Περιγραφή στοιχείων Πύργου Ψύξης Δίνης όπως φαίνονται αριθμημένα στις παραπάνω Εικόνες 21 και 22. [35]

Μηχανή Ατμοσφαιρικής Δίνης και Συμβατικές Εγκαταστάσεις

Σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας περισσότερο από το μισό της θερμικής ενέργειας που παράγεται θα απορριφθεί στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Η διαχείριση της απόβλητης θερμότητας αποτελεί ένα δαπανηρό μέρος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ψυκτικές ανάγκες των εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής καλύπτονται με την απόρριψη της θερμότητας είτε σε ένα μεγάλο σώμα νερού (ποτάμι, θάλασσα) είτε στην ατμόσφαιρα. Η απόρριψη της θερμότητας σε ένα μεγάλο σώμα νερού, όπου αυτό είναι διαθέσιμο, πρέπει να υπακούει σε συγκεκριμένου περιβαλλοντικούς περιορισμούς προκειμένου να είναι αποδεκτή, καθώς θα μπορούσε να αποβεί καταστροφική για τον υδροβιότοπο. Οι πύργοι ψύξης χρησιμοποιούνται για τη απόρριψη της θερμότητας στην ατμόσφαιρα και χωρίζονται σε υγρούς και ξηρούς. Οι υγροί πύργοι ψύξης είναι συνηθέστεροι. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι υγρού πύργου ψύξης: πύργοι ψύξης φυσικής και εξαναγκασμένης κυκλοφορίας. Οι πύργοι φυσικής κυκλοφορίας είναι από τις μεγαλύτερες κατασκευές που μπορούμε να κτίσουμε (φτάνουν τα 200 μέτρα σε ύψος) και ως εκ τούτου έχουν πολύ υψηλό κόστος κατασκευής. Οι πύργοι ψύξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας είναι λιγότερο ακριβοί από τους φυσικής κυκλοφορίας, αλλά χρησιμοποιούν ανεμιστήρες για να κυκλοφορεί ο αέρας μέσα από τα σημεία εναλλαγής θερμότητας, οπότε απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία τους. Περίπου το 2% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη μονάδα παραγωγής καταναλώνεται από τους ανεμιστήρες του πύργου ψύξης. Η εφεύρεση αντικαθιστά την καμινάδα, που είναι απαραίτητη στον πύργο φυσικής κυκλοφορίας, με μια ελεγχόμενη δίνη αλλά και την ανάγκη τροφοδότησης των ανεμιστήρων, που απαιτεί ο πύργος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας. Η AVE είναι μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα διαχείρισης απόβλητης θερμότητας και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να αντικαταστήσει τους συμβατικούς πύργους ψύξης. Η εφεύρεση αυξάνει την παραγόμενη ενέργεια των θερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής πρώτων με την εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας που παράγεται όταν η θερμότητα των αποβλήτων μεταφέρεται προς τα πάνω στην ατμόσφαιρα και δεύτερων μειώνοντας τη θερμοκρασία του ψυχόμενου νερού.

Η ηλιακή καμινάδα (επίσης γνωστή ως ηλιακός πύργος), είναι μια ηλιακή θερμική μονάδα παραγωγής ενέργειας όπου θερμός αέρας ανεβαίνει σε ένα ψηλό καπνοδόχο. Ο σκοπός ύπαρξης της καπνοδόχου είναι να εμποδίσει το ζεστό ανοδικό αέρα, στο εσωτερικό της, από το να αναμιχθεί με τον περιβάλλοντα ατμοσφαιρικό αέρα. Η αποτελεσματικότητα μιας ηλιακής καμινάδας είναι ανάλογη με το ύψος της. Ο εισερχόμενος αέρας θερμαίνεται με ένα διάφανο κυκλικό ηλιακό συλλέκτη τοποθετημένο περιμετρικά της βάση της καπνοδόχου, με το μηχανισμό του θερμοκηπίου. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με ένα ζεύγος στρόβιλου-γεννήτριας που βρίσκεται στη βάση της καπνοδόχου. Όσο ψηλότερη είναι η καμινάδα τόσο περισσότερο έργο παράγει ο στρόβιλος. Η ηλιακή καμινάδα λειτουργεί εκμεταλλευόμενη την ανοδική μεταφορά θερμότητας όπως η AVE. Η AVE αντικαθιστά την καμινάδα με μια δίνη και εξαλείφει την ανάγκη για τον ηλιακό συλλέκτη με χρήση απόβλητης βιομηχανικής θερμότητας, ζεστό υγρό αέρα ή ζεστό θαλασσινό νερό σαν πηγή θερμότητας. Η καπνοδόχος και ο ηλιακός συλλέκτης αντιπροσωπεύουν πάνω από το 90% του κόστους της ηλιακής καμινάδας. Το κόστος μιας

εγκατάστασης AVE θα μπορούσε να είναι το 5% του κόστους μιας εγκατάστασης ηλιακής καμινάδας με την ίδια ηλεκτροπαραγωγική ικανότητα.



Εικόνα 23: Ηλιακή καμινάδα. [31]

Μηχανές Δίνης και Περιβάλλον

Η AVE μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα καιρικά φαινόμενα που εκδηλώνονται στην περιοχή, γύρω από όπου θα εγκατασταθεί, καθώς βοηθάει στην παραγωγή κατακρημνισμάτων, τη μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας ενώ τέλος οι καταιγίδες που τυχόν εμφανίζονται θα είναι ασθενέστερες σε σύγκριση με παλαιότερα. Επίσης “ξεπλένοντας” και ανεβάζοντας τον επιφανειακό αέρα προς την τροπόσφαιρα μειώνει τη ρύπανση της ατμόσφαιρας, ενώ συμβάλει αποφασιστικά στην αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, πρώτων με την επίσπευση της ανοδικής μεταφοράς θερμότητας και δεύτερων με τη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων.

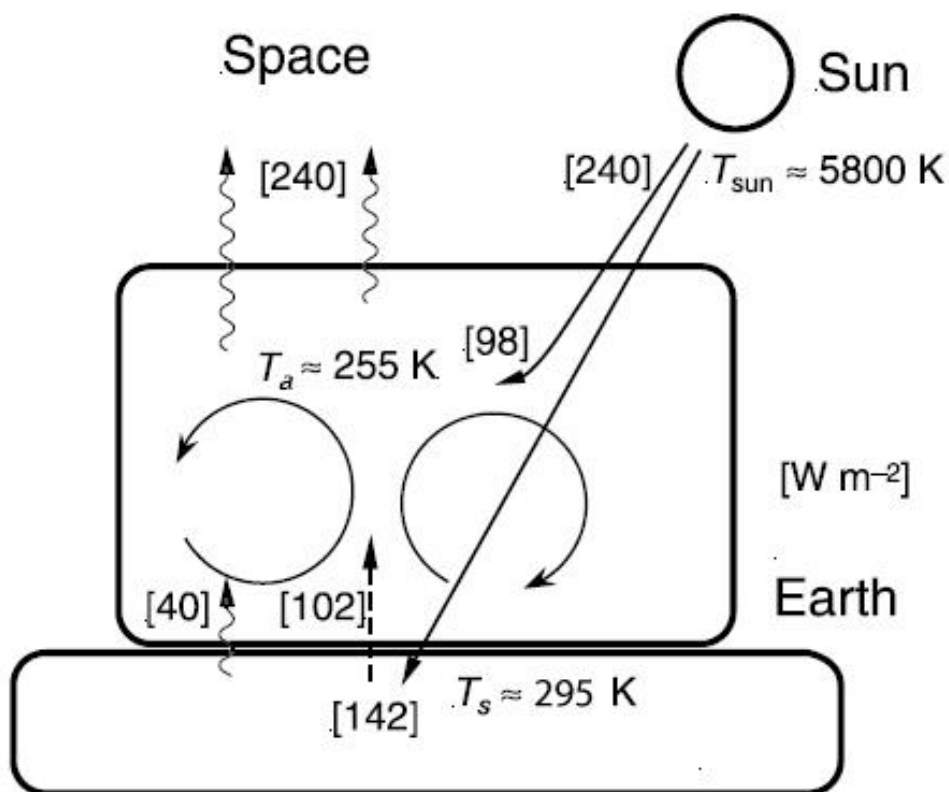
Η AVE παράγει μέγιστη ισχύ του σε περιόδους που έχουμε υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και χαμηλούς ανέμους. Έτσι η περίοδος αιχμής της ηλεκτροπαραγωγής της αντιστοιχεί σε περιόδους που απαιτείται υψηλό ηλεκτρικό φορτίο αλλά η ηλεκτροπαραγωγή από αιολικά πάρκα και ανεμογεννήτριες είναι γενικά χαμηλή. Οι υγροί πύργοι ψύξης καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες νερού, διότι μόνο ένα μικρό μέρος του νερού που κυκλοφορεί σε αυτούς θα εξατμιστεί παρέχοντας έτσι το απαραίτητο ψυκτικό φορτίο. Κατά συνέπεια η έλλειψη νερού αναγκάζει κάποιες θερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής να χρησιμοποιούν ξηρούς πύργους ψύξης που είναι λιγότερο αποτελεσματικοί και πιο δαπανηροί. Επίσης με τους συμβατικούς υγρούς πύργους ψύξης η ανοδική μεταφορά θερμότητας και τα

συνεπαγόμενα κατακρημνίσματα λαμβάνουν χώρα μακριά από τον πύργο ψύξης και δεν συμβάλλουν στις τοπικές βροχοπτώσεις. Αντίθετα ένας ψυκτικός πύργος δίνης παράγει τοπικές βροχοπτώσεις, αναπληρώνοντας έτσι για το νερό που εξατμίζεται κατά τη διάρκεια της ψυκτικής διαδικασίας και διατηρεί με αυτό τον τρόπο την ισορροπία του τοπικού κλίματος.

6. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Ενέργεια

Αναφέραμε παραπάνω ότι η πηγή ενέργειας της Γής είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Στην παρακάτω μονοδιάστατη σχηματική απεικόνιση, που χρησιμοποιείται για λόγους απλότητας, μπορούμε να δούμε το ενεργειακό ισοζύγιο του κλίματος της Γής. Οι τιμές στις αγκύλες αντιπροσωπεύουν τις μέσες παγκόσμιες ενεργειακές ροές (W/m^2) με βάση παγκόσμιες τις μετρήσεις επιφανειακής ακτινοβολίας (Ohtsura και Gilgen, 1993) και άλλες δορυφορικές μετρήσεις (Barkstrom et al., 1990).



Σχήμα 1: Η ροή ενέργειας στη Γή. [2]

Μπορούμε να δούμε ότι το 40% της ηλιακής ακτινοβολίας ($F_{\text{short}}(\text{TOA})=240\text{W}/\text{m}^2$) απορροφάται από την ατμόσφαιρα ($98\text{W}/\text{m}^2$), και το υπόλοιπο απορροφάται από την επιφάνεια της Γής ($F_{\text{short}}(0)=142\text{W}/\text{m}^2$). Το ενεργειακό όφελος στην επιφάνεια μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα μέσω συναγωγής ($F_c=102\text{W}/\text{m}^2$) λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας (εσωτερική ενέργεια της ατμόσφαιρας) και μέσω ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος ($F_{\text{long}}(0)=40\text{W}/\text{m}^2$). Για να είμαστε ακριβείς, η συναγωγική μεταφορά θερμότητας θα πρέπει

να περιλαμβάνει μια μικρή ποσότητα ενέργειας που μετατρέπεται στην κινητική ενέργεια της ατμόσφαιρας. Αυτή η συνεισφορά, ωστόσο, είναι μικρή (περίπου 2W/m^2) σε σύγκριση με τις άλλες συνιστώσες και συνήθως αμελείται σε πρώτη προσέγγιση. Όλες αυτές οι ενέργειες εκπέμπονται τελικά πίσω στο διάστημα, μέσω ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος.

Τα αντίστοιχα ποσοστά παραγωγής εντροπίας λόγω των μη αναστρέψιμων διαδικασιών μεταφοράς ενέργειας, όπως είναι για παράδειγμα η τυρβώδης συναγωγή (S_{turb}), η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους κύματος ($S_{\text{abs(short,s)}}$, $S_{\text{abs(short,a)}}$, $S_{\text{abs(long,a)}}$).

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{whole(univ)}} &= \dot{S}_{\text{surr}} = \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_{\text{sun}}}\right) \cdot 240 \approx 0.90(\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}) = \\ &= \dot{S}_{\text{turb}} + \dot{S}_{\text{abs(short,s)}} + \dot{S}_{\text{abs(short,a)}} + \dot{S}_{\text{abs(long,a)}} = \\ &= \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right) \cdot 102 + \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{\text{sun}}}\right) \cdot 142 + \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_{\text{sun}}}\right) \cdot 98 + \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right) \cdot 40 = \\ &= 0.046 + 0.469 + 0.367 + 0.018 = \\ &= (5\%) + (52\%) + (41\%) + (2\%) \end{aligned}$$

Οι θερμοκρασίες θεωρούνται ως: $T_{\text{sun}}=5800\text{K}$ για τον Ήλιο, $T_s=288\text{K}$ για την επιφάνεια της Γής και $T_a=255\text{K}$ για την ατμόσφαιρα. Παρατηρούμε ότι η τυρβώδης συνεισφορά (S_{turb}) είναι μόνο το 5% περίπου του συνολικού ρυθμού παραγωγής εντροπίας ενώ περισσότερο από το 90% οφείλεται στην άμεση απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια (52%) και στην ατμόσφαιρα (41%).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν και ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας από την τυρβώδη διάχυση (S_{turb}) είναι μικρός, σε σύγκριση με εκείνο της απορρόφησης ακτινοβολίας (S_{abs}), τείνει να μεγιστοποιηθεί στο κλιματικό σύστημα (Lorenz, 1955, 1960, 1967, 1978). Αυτό οφείλεται στο ότι ένας μη-γραμμικός μηχανισμός ανάδρασης σε ένα σύστημα τυρβώδους ρευστού ρυθμίζει τη διεργασία μεταφοράς θερμότητας, έτσι ώστε να παράγει τη διαθέσιμη ενέργεια (δηλαδή, το μέγιστο δυνατό έργο) στο μέγιστο δυνατό ρυθμό και ως εκ τούτου, με τη μέγιστη παραγωγή εντροπίας. Αντιθέτως, η απορρόφηση της ακτινοβολίας είναι ουσιαστικά μια γραμμική διαδικασία, καθώς ο ρυθμός της δίνεται από τη ροή της ακτινοβολίας επί την απορροφητικότητα του υπό εξέταση υλικού, και δεν μπορεί να υπάρξει μηχανισμός ανάδρασης για την ένταση της ροής ή την απορροφητικότητα σε αυτή τη διεργασία. Η ακτινοβολία μπορεί, ως εκ τούτου, να θεωρηθεί ότι είναι απλά μια πηγή ενέργειας για το κλιματικό σύστημα (Σχήμα 1). Για το λόγο αυτό, μόνο ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας από την τυρβώδη διάχυση τείνει να μεγιστοποιηθεί, ανεξάρτητα από την παραγωγή εντροπίας της απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας. [2]

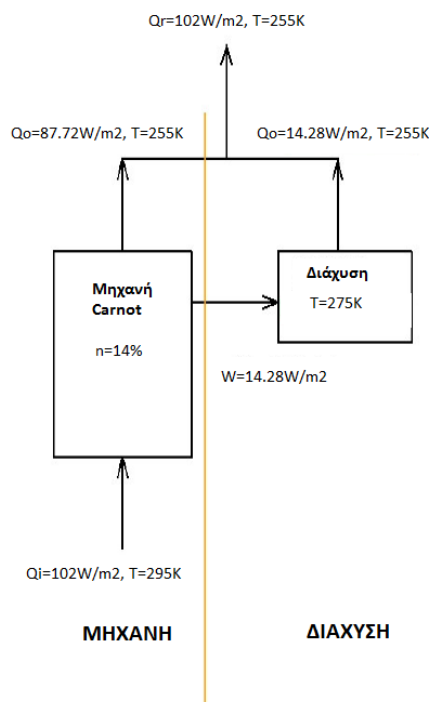
Μηχανή Carnot

Είναι προφανές πως η ατμόσφαιρα μεταφέρει θερμότητα από την επιφάνεια της Γής πίσω στο διάστημα. Με βάση την αρχή του χαμένου έργου, όταν υπάρχει μεταφορά θερμότητας από μια ζεστή σε μια κρύα δεξαμενή υπάρχει και η δυνατότητα παραγωγής τόσο έργου

όπου θα παραγόταν αν η θερμότητα μεταφερόταν από μια μηχανή Carnot. Η τροπόσφαιρα δέχεται θερμότητα σε υψηλή θερμοκρασία 295K και την αποδίδει στο διάστημα σε χαμηλότερη θερμοκρασία 255K. Ο βαθμός απόδοσης Carnot που προκύπτει από αυτές τις θερμοκρασιακές διαφορές είναι περίπου 14%.

$$n_c = \frac{T_h - T_c}{T_h} = \frac{295 - 255}{295} \approx 14\%$$

όπου T_h και T_c είναι οι απόλυτες θερμοκρασίες για το παραπάνω παράδειγμα. Γενικά η τροπόσφαιρα δέχεται θερμότητα από χαμηλά σε μια μέση θερμοκρασία 25°C περίπου και αποδίδει θερμότητα προς τα ανώτερα στρώματα κατά μέσο όρο στους -20°C, δίνοντας έτσι μια απόδοση Carnot γύρω στο 15%. Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι περίπου το 15% της θερμότητας που μεταφέρεται προς τα πάνω μέσω συναγωγής μετατρέπεται σε έργο, ανεξάρτητα από το αν η θερμότητα μεταφέρεται ως αισθητή ή λανθάνουσα. Το ίδιο συμπέρασμα συνάγεται ανεξάρτητα από άλλους ερευνητές. (Michaud, 1995)



Σχήμα 2: Μοντέλο ατμοσφαιρικής λειτουργίας.

Εντροπία

Γενικά, το έργο που παράγεται στην ατμόσφαιρα θα πρέπει να ισούται με το έργο που διαχέεται σε αυτή. Ο ακριβής υπολογισμός, είτε του έργου που παράγεται, είτε αυτού που

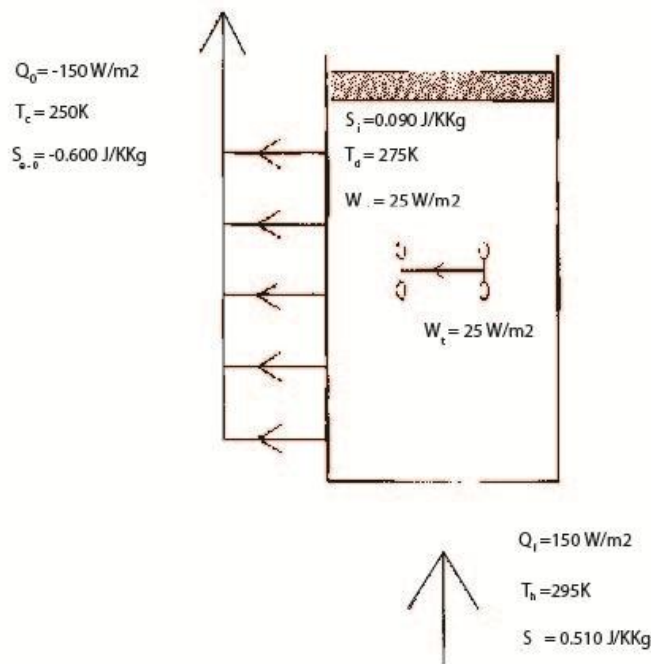
διαχέεται όμως είναι δύσκολος, δεδομένης της δυσκολίας που υπάρχει στην κατανόηση και τη μοντελοποίηση, με μεγάλη ακρίβεια, των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα. Το έργο που παράγεται διαχέεται τελικά μέσω της τριβής με μια μη-αναστρέψιμη διεργασία. Η εντροπία που παράγεται ισούται με το διαχεόμενο έργο διαιρεμένο με την θερμοκρασία στην οποία διαχέεται. Αυτή η θεωρία βασίζεται στο γεγονός ότι η ατμόσφαιρα εξάγει περισσότερη εντροπία στο σύστημά της από ότι εισάγει γιατί αποβάλλει θερμότητα σε χαμηλότερη θερμοκρασία από ότι την προσλαμβάνει. Επομένως η διαφορά της εντροπίας που εξάγεται θα πρέπει να είναι αυτή που παράγεται από τη διάχυση του έργου.

Η εντροπία της ατμόσφαιρας μπορεί να μεταβληθεί είτε με την προσθήκη εντροπίας από μια εξωτερική πηγή είτε με εσωτερική παραγωγή εντροπίας (Lesins, 1990).

$$\Delta S = (\Delta S_{e-i} + \Delta S_{e-o}) + \Delta S_i = \Delta S_e + \Delta S_i \quad (1)$$

όπου ΔS είναι η διαφορά εντροπίας στην ατμόσφαιρα, ΔS_{e-o} είναι η εντροπία που εκλύεται σε εξωτερικές πηγές και ΔS_{e-i} αυτή που προσλαμβάνεται από εξωτερικές πηγές. Ο όρος της παρένθεσης είναι η καθαρή εξωτερικά προσληφθείσα εντροπία, ενώ ΔS_i είναι αυτή η εντροπία που παράγεται από την ατμόσφαιρα.

Η τροπόσφαιρα παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα με ένα τέλειο, μονωμένο, στατικό θερμοδυναμικό σύστημα. Το σύστημα δέχεται θερμότητα στον πυθμένα του και αποδίδει θερμότητα στα ψηλότερα επίπεδα μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας. Σε ένα στατικό σύστημα η είσοδος και η έξοδος θερμότητας είναι ίσες οπότε δεν υπάρχει αλλαγή της ενθαλπίας και της εντροπίας του συστήματος. Το ζεύγος πτερωτών αντιπροσωπεύει την παραγωγή και διάχυση του έργου που λαμβάνει χώρα εντός του συστήματος. Η διεργασία παραγωγής και διάχυσης του έργου στο σχήμα είναι ανεξάρτητη από οποιαδήποτε συναγωγική διαδικασία και θα μπορούσε να επιτευχθεί με οποιοδήποτε τρόπο. Στην ατμόσφαιρα όμως, η κυριότερη διεργασία διάχυσης έργου είναι η τυρβώδης διάχυση μεταξύ ανοδικών και καθοδικών αερίων μαζών. Ένας σταθερός οριζόντιος άνεμος ασκεί μικρή διατμητική δύναμη και ως εκ τούτου η διάχυση είναι μικρή όταν η συναγωγή είναι χαμηλή γιατί αποτελεί συνάρτηση της διάτμησης. Σκοπός του μοντέλου είναι ο υπολογισμός του παραγόμενου έργου.



Σχήμα 3: Ιδανικό θερμοδυναμικό σύστημα σταθερής κατάστασης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του έργου που διαχέεται στην ατμόσφαιρα. [27]

Η είσοδος εντροπίας είναι:

$$\Delta S_{e-i} = \frac{Q_i}{T_h} \quad (2)$$

όπου η εισερχόμενη θερμοκρασία και η θερμοκρασία στην οποία εισέρχεται. Η έξοδος εντροπίας είναι:

$$\Delta S_{e-o} = \frac{Q_o}{T_c} \quad (3)$$

με την εκλυόμενη θερμότητα και τη θερμοκρασία στην οποία εκλύεται. Κατά συνθήκη η θερμότητα και η εντροπία έχουν θετικό πρόσημο όταν απορροφούνται και αρνητικό όταν εκλύονται από το σύστημα. Η εντροπία που παράγεται από τη διάχυση του έργου ισούται με το διαχεόμενο έργο προς την απόλυτη θερμοκρασία στην οποία γίνεται η διάχυση:

$$\Delta S_i = \frac{W_d}{T_d} \quad (4)$$

η διάχυση επιτυγχάνεται μέσω της τριβής και προκαλεί εσωτερική θέρμανση επομένως και παραγωγή εντροπίας. Από τις εξισώσεις (1), (4) το έργο που διαχέεται προκειμένου να αντισταθμίσει την διαφορά εισαγωγής και εξαγωγής εντροπίας θα είναι:

$$W_d = Q_i \cdot T_d \cdot \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_h} \right) \Rightarrow$$

$$\Delta S_i = Q_i \cdot \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_h} \right) \quad (5)$$

Η παραγόμενη από το σύστημα εντροπία είναι πάντα θετική αφού T_h μεγαλύτερη από την T_c .

Όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 3 η ονομαστική είσοδος θερμότητας είναι η 150W/m^2 , με θερμοκρασία εισόδου 295K και εξόδου 250K . Η εισερχόμενη και εξερχόμενη στην τροπόσφαιρα εντροπία είναι $0,510\text{J/KKg}$ και $-0,600\text{J/KKg}$, αντίστοιχα. Η εσωτερικά παραγόμενη εντροπία θα είναι $0,090\text{J/KKg}$. Αν η μέση θερμοκρασία διάχυσης του έργου θεωρηθεί να είναι 275K , περίπου στη μέση μεταξύ των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου, το έργο θα ισούται με 25W/m^2 και ο βαθμός αποτελεσματικότητας της διάχυσης θα είναι $16,7\%$. (Reixoto και Oort, 1992) (Michaud, 1995) [27]

Διαθέσιμη Δυναμική Ενέργεια Συναγωγής (CAPE)

Το έργο της άνωσης είναι ευρέως γνωστό ως διαθέσιμη δυναμική ενέργεια μεταφοράς (Convective Available Potential Energy, CAPE). Η διαθέσιμη δυναμική ενέργεια μεταφοράς ορίζεται ως:

$$CAPE = g \int \left(\frac{\rho_e}{\rho_p} - 1 \right) dz \Rightarrow$$

$$CAPE = g \int \left(\frac{TV_p}{TV_e} - 1 \right) dz \quad (1)$$

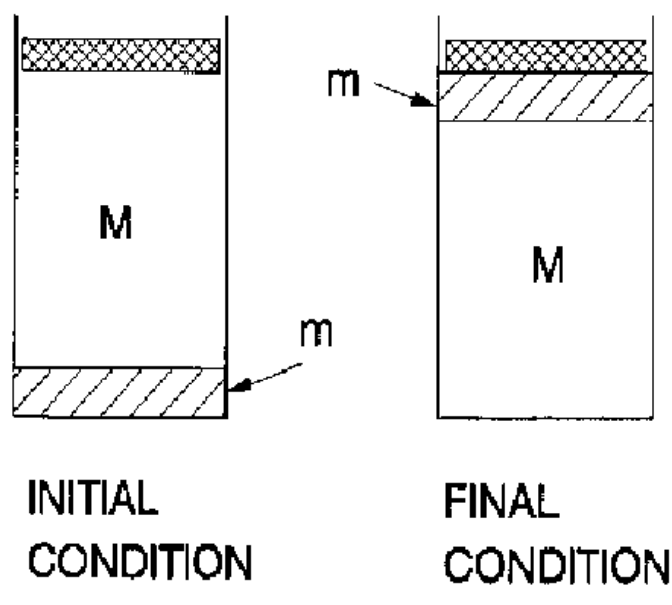
Όπου ρ είναι η πυκνότητα, TV είναι η εικονική θερμοκρασία συμπεριλαμβανομένης της συνεισφοράς του συμπυκνωμένου νερού. Οι δείκτες p και e χρησιμοποιούνται για το ανερχόμενο πακέτο αέρα και το περιβάλλον αντίστοιχα. Το CAPE υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα της δύναμης επί την απόσταση και αντιπροσωπεύει την κινητική ενέργεια που θα παραγόταν από την άνωση αν δεν υπήρχε η διαδικασία της διάχυσης. Το CAPE μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό, ο ασταθής αέρας έχει θετικό CAPE, ενώ ο ευσταθής αέρας έχει αρνητικό CAPE. Το CAPE του αέρα σε μια ηπειρωτική περιοχή, μια ζεστή μέρα μπορεί να υπερβαίνει τα 4000J/kg . Το CAPE του αέρα σε τροπική θαλάσσια περιοχή είναι συνήθως μεταξύ των 800 και 1800J/kg . Μια τιμή του CAPE της τάξης των 1800J/kg αντιστοιχεί σε ταχύτητα 60 m/s . Οι ταχύτητες των ανοδικών ρευμάτων σπάνια υπερβαίνουν τα 5m/s , γιατί η ταχύτητα περιορίζεται από την τριβή.

Η διαδικασία υπολογισμού του έργου από την εξίσωση ενθαλπίας είναι πιο εύκολη καθώς αρκεί να γνωρίζουμε την αρχική και τελική θέση του συστήματος. Αντίθετα ο υπολογισμός του CAPE απαιτεί την χρήση περισσότερων παραμέτρων. Σε μια αδιαβατική και

αναστρέψιμη διεργασία η εντροπία της κάθε αέριας μάζας διατηρείται και το έργο της άνωσης είναι μέγιστο. Σε μια αδιαβατική και μη-αναστρέψιμη διεργασία διατηρείται η συνολική ενθαλπία του συστήματος και το έργο της άνωσης είναι μηδέν καθώς μετατρέπεται και πάλι σε θερμότητα. Η ατμοσφαιρική μεταφορά θεωρείται συνήθως ισεντροπική διεργασία. Από μηχανικής άποψης μια αδιαβατική διεργασία θεωρείται ισεντροπική όταν υπάρχουν μικρές έως μηδενικές απώλειες τριβής, ενώ θεωρείται ισενθαλπική όταν το έργο διαχέεται μέσω της τριβής. Το έργο της άνωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την κινητική ενέργεια του αέρα, να εξαχθεί από το σύστημα ή ακόμα και να μετατραπεί πάλι σε θερμότητα. [26]

Υπολογισμός του Έργου της Άνωσης

Ο Margules (1905) ανέπτυξε μια μέθοδο υπολογισμού του έργου, που παράγεται όταν μια μάζα αέρα αλλάζει θέση. Η μέθοδος αυτή εξηγεί το μηχανισμό παραγωγής έργου της ατμόσφαιρας Normand (1946).



Σχήμα 4: Θερμοδυναμικό σύστημα στο οποίο μια στήλη αέρα περιβάλλεται από μονωμένο υλικό και στο πάνω μέρος της ασκείται σταθερή πίεση από ένα έμβολο. [26]

Στο Σχήμα 4 βλέπουμε το τέλειο θερμοδυναμικό σύστημα του Margules που χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε τη διαδικασία. Το σύστημα αποτελείται από μια στήλη αέρα που περιβάλλεται από μονωτικό υλικό. Στο πάνω μέρος βρίσκεται ένα πιστόνι που ασκεί σταθερή πίεση στη στήλη του αέρα. Η μονάδα μάζα m ανυψώνεται αδιαβατικά από το κάτω μέρος της στήλης στο άνω. Η αρχή διατήρησης της ενέργειας απαιτεί η ενέργεια του συστήματος στην αρχική και την τελική κατάσταση να είναι ίσες. Το σύστημα

αρχικά βρίσκεται σε ισορροπία και η συνολική του ενέργεια είναι το άθροισμα της εσωτερικής και δυναμικής ενέργειας του αέρα και του περιεχόμενου νερού, σε όποια κατάσταση και αν βρίσκεται, συν τη δυναμική ενέργεια του πιστονιού. Με άλλα λόγια μπορούμε να πούμε ότι η συνολική ενέργεια του συστήματος ισούται με τη συνολική ενθαλπία του αέρα συμπεριλαμβανομένης και της ενθαλπίας του περιεχόμενου νερού.

Το άθροισμα ενθαλπίας και κινητικής ενέργειας του συστήματος είναι σταθερό, αφού δεν υπάρχει εξωτερική πηγή ενέργεια. Κατά συνέπεια, το έργο της άνωσης, δηλαδή της αδιαβατικής ανύψωσης του αέρα, θα ισούται με τη μείωση της συνολικής ενθαλπίας του συστήματος.

$$\begin{aligned}w_b &= -\Delta H \Rightarrow \\w_b &= -\Delta h - \Delta gz = -\Delta\mu \quad (1)\end{aligned}$$

Όπου ΔH η συνολική ενθαλπία του συστήματος, ενώ Δh και Δgz είναι οι μεταβολές ενθαλπίας και δυναμικής ενέργειας του αέρα μεταξύ της αρχικής και τελικής θέσης. Τέλος $\Delta\mu$ είναι η μεταβολή στατικής ενέργειας του ανυψούμενου αέρα, δηλαδή το άθροισμα ενθαλπίας και δυναμικής ενέργειας. Η εξίσωση (1) έχει καθολική ισχύ, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό του έργου που παράγεται κατά την αδιαβατική ανύψωση μιας μικρής αέριας μάζας στην ατμόσφαιρα. Η θέρμανση και ψύξη μέσω ακτινοβολίας, στο κάτω και πάνω μέρος της ατμόσφαιρας αντίστοιχα, μεταφέρει ενθαλπία από και προς το σύστημα. Έτσι δημιουργείται όμως μια αποσταθεροποίηση αφού η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο άκρων αυξάνεται, άρα, θα αυξηθεί κατ' αντιστοιχία και το παραγόμενο έργο από τη διαδικασία αναδιάταξης. Η διαδικασία αναδιάταξης επιτυγχάνεται από την ανοδική μεταφορά θερμότητας που παράγει έργο και επαναφέρει το σύστημα σε ισορροπία. [26]

7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ MATHCAD

Εισαγωγή

Η ενότητα αυτή επεξηγεί τη βάση των υπολογισμών. Το Mathcad είναι η κύρια γλώσσα προγραμματισμού για μεσαίου μεγέθους τεχνικούς υπολογισμούς. Τα προγράμματα σε Mathcad είναι εύκολο να τεκμηριωθούν επειδή οι εξισώσεις εμφανίζονται σχεδόν σε κανονική αλγεβρική σημειογραφία και επειδή τα αποτελέσματα μπορούν να εμφανίζονται ή να σχεδιάζονται αμέσως μετά τον υπολογισμό τους. Λειτουργίες, όπως λειτουργίες συναρτήσεων λύτη μπορεί να οριστούν κατά την έναρξη του προγράμματος και να επαναχρησιμοποιηθούν όποτε απαιτείται. Το Mathcad έχει ένα ισχυρό πρόγραμμα επίλυσης που είναι κατάλληλη για το χειρισμό θερμοδυναμικών μεταβολών, όπου ο αριθμός των εμπλεκόμενων μεταβλητών είναι μικρός και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λύσει μεγάλο εύρος προβλημάτων. Τέλος το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τα πρότυπα θερμοδυναμικά σύμβολα όπου είναι δυνατόν ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο εύκολο στην παρακολούθηση.

Οι υπολογισμοί στα άρθρα του L. Michaud έγιναν με Mathcad και ελέγχθηκαν με ένα προγενέστερο πρόγραμμα το Hewlett – Packard HP48SX. Η έκδοση Mathcad είναι ταχύτερη και ευκολότερη, αλλά η έκδοση υπολογισμού HP έχει πιο ισχυρές δυνατότητες looping και είναι πιο ευέλικτη και πιο βολική για τη δοκιμή νέων ιδεών. Το Mathcad έχει πρόβλημα με ορισμένους πίνακες και για να καθοριστούν τα όριά του ήταν αναγκαίος ο πειραματισμός.

Βασικές Συναρτήσεις

Το πρώτο τμήμα του προγράμματος αποτελείται από τις βασικές συναρτήσεις που θα καλεστούν αργότερα από το πρόγραμμα, όταν απαιτείται. Η βασική ενότητα λειτουργίας αυτή περιλαμβάνει :

- Θερμοδυναμικές σταθερές
- Θερμοδυναμικές συναρτήσεις
- Λύτες (Solver Blocks)

Η ενότητα των βασικών συναρτήσεων ακολουθείται από την εισαγωγή στο πρόγραμμα των ατμοσφαιρικών δεδομένων που θέλουμε να επεξεργαστεί. Συνήθως αποτελούνται από ένα πίνακα με διάφορες τιμές των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του αέρα, πίεση, θερμοκρασία υγρασία. Στη συνέχεια ο υπολογισμός οποιασδήποτε θερμοδυναμικής παραμέτρου, όπως η εντροπία, η ενθαλπία, η εικονική θερμοκρασία επιτυγχάνεται με την επίκλησή της κατάλληλης συνάρτησης.

Θερμοδυναμικές σταθερές

Οι σταθερές που χρησιμοποιούνται δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Ειδική Θερμοχωρητικότητα Πάγου	$c_i = 2090 J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Αέρα	$c_{pa} = 1004.7 J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Υδρατμού	$c_{pv} = 1846 J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Υγρού Νερού	$c_w = 4190 J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$
Επιτάχυνση της Βαρύτητας	$g = 9.80 m \cdot s^{-1}$
Λανθάνουσα Θερμότητα Καύσης	$L_{f0} = 333660 J \cdot kg^{-1}$
Λανθάνουσα Θερμότητα Εξάτμισης	$L_{v0} = 2500840 J \cdot kg^{-1}$
Επιφανειακή Πίεση Αέρα	$P_{a0} = 100 kPa$
Επιφανειακή Πίεση Υδρατμού	$P_{v0} = 0.61068 kPa$
Σταθερά των Αερίων για Αέρα	$R_a = 287.0 J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$
Σταθερά των Αερίων για Υδρατμό	$R_v = 461.5 J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$
Επιφανειακή Θερμοκρασία Αέρα	$T_0 = 273.15 K$

Πίνακας 7: Βασικές σταθερές όπως χρησιμοποιούνται στα προγράμματα Mathcad.

Επίσης χρησιμοποιούνται οι συντελεστές ισορροπίας Clapeyron για το υγρό νερό και τον πάγο.

$\alpha_w = 52.92$	$\alpha_i = 25.49$
$\beta_w = 6806$	$\beta_i = 6286$
$\gamma_w = 5.079$	$\gamma_i = 0.5286$

Πίνακας 8: Συντελεστές ισορροπίας Clapeyron.

Θερμοδυναμικές συναρτήσεις

Σύμφωνα με τον κανόνα του Duhem, για ένα κλειστό σύστημα γνωστής σύνθεσης, δύο γνωστές θερμοδυναμικές ιδιότητες αρκούν ώστε να υπολογιστούν όλες οι υπόλοιπες. Το κλειστό σύστημα θεωρείται ότι αποτελείται από 1 χιλιόγραμμα αέρα και M χιλιόγραμμα νερού, γνωρίζοντας την μάζα του νερού και οποιεσδήποτε δύο ιδιότητες όλες οι άλλες θερμοδυναμικές ιδιότητες μπορούν να υπολογιστούν. Επομένως για τον υπολογισμό οποιονδήποτε θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του υγρού αέρα, πρέπει τρεις ιδιότητες να είναι γνωστές. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την πίεση (P) σε kPa, τη θερμοκρασία (T) σε K, και τη

συνολική αναλογία ανάμιξης (M) σε kg/kg, οι οποίες αποκαλούνται μεταβλητές PKM και θεωρούνται οι πρότυπες μεταβλητές. Άλλες παράμετροι υγρασίας μπορούν να μετατραπούν εύκολα στις πρότυπες PKM μεταβλητές. Αυτές είναι οι: PCD, PCW, PCU, όπου η πίεση είναι σε kPa, C είναι η θερμοκρασία, το D είναι το σημείο δρόσου, W είναι του υγρού βολβού (εδώ οι θερμοκρασίες είναι σε βαθμούς Κελσίου C) και U είναι η σχετική υγρασία σε κλάσμα.

Η αναλογία ανάμιξης (M) είναι η συνολική περιεκτικότητα σε νερό σε kg νερού/kg αέρα, όπου το νερό μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε φάση. Οι υπολογισμοί βασίζονται στο ότι οι διάφορες φάσεις βρίσκονται σε ισορροπία. Αν η αναλογία ανάμιξης είναι μικρότερη από την αναλογία ανάμιξης κορεσμού, το νερό έχει ληφθεί να είναι όλο στη φάση ατμού. Αν η αναλογία ανάμιξης είναι μεγαλύτερη από την αναλογία ανάμιξης κορεσμού, η ποσότητα του νερού σε κατάσταση ατμού είναι η ποσότητα κορεσμού και το πρόγραμμα υπολογίζει πόσο νερό υπάρχει σε κάθε φάση. Το πρόγραμμα έχει ισχύ για 3 είδη αέρα:

- Καθαρό αέρα, όπου η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι μηδέν
- Υγρό αέρα, όπου η υγρασία είναι μεγαλύτερη του μηδενός και μικρότερη από την ποσότητα κορεσμού
- Κορεσμένο αέρα, όπου η περιεκτικότητα σε νερό είναι ίση ή μεγαλύτερη από την ποσότητα κορεσμού

Οι τρεις πρότυπες μεταβλητές (PKM) χρησιμοποιούνται και για τα τρία είδη του αέρα. Όταν ο αέρας είναι καθαρός η τρίτη ιδιότητα (M) είναι μηδέν. Ο κανόνας των φάσεων απαιτεί ότι τρεις ιδιότητες πρέπει να καθορίζονται για να περιγραφεί ο υγρός αέρας, αλλά ο αριθμός των ιδιοτήτων που μπορούν να καθοριστούν περιορίζονται σε δύο κατά τον κορεσμό. Όταν ο αέρας είναι κορεσμένος, η τρίτη ιδιότητα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ποσότητας του συμπυκνωμένου νερού. Το πρόγραμμα ελέγχει αν το M είναι πέρα από την ποσότητα κορεσμού και εφόσον είναι έτσι, το νερό που υπερβαίνει την ποσότητα κορεσμού λαμβάνεται να είναι σε μία ή και στις δύο φάσεις συμπυκνώματος. Οι υπολογιζόμενες ιδιότητες περιλαμβάνουν τη συμβολή του νερού σε κάθε φάση.

Οι μονάδες των υπολογισμών είναι συνήθως οι βασικές μονάδες του SI ή πολλαπλάσια αυτών. Οι πιέσεις είναι πάντα σε kPa. Η αναλογία ανάμιξης είναι σε kg/kg και η σχετική υγρασία είναι σε μορφή κλάσματος για να μην περιπλοκούν οι συναρτήσεις με πολλαπλάσια του 10. Η αναλογία ανάμιξης που εμφανίζεται πολλαπλασιάζεται με 1000 και η εμφανιζόμενη σχετική υγρασία πολλαπλασιάζεται με 100 για λόγους αναγνωσιμότητας. Τα ονόματα σταθερών και μεταβλητών δίνονται συνήθως με κεφαλαία γράμματα. Οι συναρτήσεις που ορίζονται κατά την έναρξη του προγράμματος ξεκινούν με ένα πεζό "f". Όπως είπαμε και παραπάνω οι συναρτήσεις έχουν γραφτεί έτσι ώστε οποιαδήποτε θερμοδυναμική ιδιότητα να μπορεί να υπολογιστεί από τις ίδιες τρεις πρότυπες μεταβλητές πάντα κατά την ίδια PKM σειρά. Ο αριθμός 3 στο τέλος του ονόματος της συνάρτησης χρησιμοποιείται ως μια υπενθύμιση ότι οι τρεις βασικές ιδιότητες που απαιτούνται ως μεταβλητές, για παράδειγμα fST3 (P, T, M) είναι η συνάρτηση για να υπολογιστεί η συνολική εντροπία ενός κιλού αέρα, συμπεριλαμβανομένης της εντροπίας

του νερού που περιέχει, σε οποιαδήποτε φάση όπως είδαμε και παραπάνω. Αντίστοιχα η fHT3 είναι η ενθαλπία, η fTV3 είναι η εικονική θερμοκρασία και η fU3 είναι η σχετική υγρασία. Οι fMV3, fML3 και fMI3, ως συναρτήσεις σχετικών πιέσεων, εκφράζουν το περιεχόμενο υγρασίας στη φάση του ατμού, την υγρή και τη στερεά φάση. Τα γράμματα T και M χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν την ιδιότητα ανά μονάδα μάζας του αέρα συν την περιεκτικότητά του σε νερό, και την ιδιότητα ανά μονάδα μάζας της ουσίας, αντίστοιχα. Για παράδειγμα, fST3 είναι η εντροπία ανά μονάδα μάζας του αέρα, fSM3 είναι η εντροπία ανά μονάδα μάζας της ουσίας.

Η παραγωγή των βασικών συναρτήσεων βασίζεται στο Thermodynamique de l' Atmosphere από τους L. Dufour και J. Van Meighem. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες υπολογίζονται συνήθως ανά μονάδα μάζας του καθαρού αέρα. Συγκεκριμένα για την ενθαλπία μιας μάζας αέρα που περιέχει νερό σε υγρή, αέρια και στερεή μορφή ισχύει:

$$fHT3= h = h_a + h_v + h_w + h_i$$

Οι επιμέρους ενθαλπίες υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\text{Η ενθαλπία του αέρα είναι η } fHA=fHA3= h_a = c_{pa} \cdot (T - T_0)$$

$$\text{Η ενθαλπία του νερού στην υγρή του φάση υπολογίζεται με την } fHL= h_w = r_w \cdot [c_w \cdot (T - T_0)]$$

$$\text{Η ενθαλπία των υδρατμών είναι η } fHV= h_v = r_v [c_{pv} \cdot (T - T_0) + L_{v0}]$$

$$\text{Η ενθαλπία του πάγου δίνεται από τη σχέση } fHI= h_i = r_i \cdot [c_i \cdot (T - T_0) - L_{f0}]$$

Στο πρόγραμμα ορίζονται οι σχετικές πιέσεις fML3, fMV3, fMI3 για τις οποίες ισχύει:

$$r = r_v + r_w + r_i = const$$

Η συνάρτηση υπολογισμού της στατικής ενέργειας ονομάζεται fμ4, στο πρόγραμμα και αντιστοιχεί στην:

$$\mu = h + (1 + r) \cdot g \cdot z$$

Για την εντροπία μιας μάζας αέρα που περιέχει νερό σε υγρή, αέρια και στερεή μορφή ισχύει:

$$fST3= s = s_a + s_v + s_w + s_i$$

Οι επιμέρους εντροπίες υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\text{Η εντροπία του αέρα είναι η } fSA=fSA3= s_a = c_{pa} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_a \cdot \ln\left(\frac{P_a}{P_{a0}}\right)$$

Η εντροπία του νερού στην υγρή του φάση υπολογίζεται με την $fSL = s_w = r_w \cdot [c_w \cdot \ln(\frac{T}{T_0})]$

Η εντροπία των υδρατμών είναι η $fSV = s_v = r_v \cdot [c_{pv} \cdot \ln(\frac{T}{T_0}) - R_v \cdot \ln(\frac{P_v}{P_{v0}}) + \frac{L_{v0}}{T_0}]$

Η εντροπία του πάγου δίνεται από τη σχέση $fSI = s_i = r_i \cdot [c_i \cdot \ln(\frac{T}{T_0}) - \frac{L_{f0}}{T_0}]$

Η πίεση υδρατμού, $fPV(T)$, υπολογίζεται από την εξίσωση Clapeyron:

$$\ln p_v = \alpha - \frac{\beta}{T} - \gamma \cdot \ln T$$

και διακρίνονται οι περιπτώσεις υγρής και στερεής κατάστασης ανάλογα με τη θερμοκρασία. Για την υγρή ορίζεται η $fPVL$, ενώ για τη στερεή έχουμε την $fPVI$. Στην κάθε περίπτωση χρησιμοποιούνται και οι αντίστοιχοι συντελεστές Clapeyron.

Λύτες – Solver Blocks

Το πρόγραμμα κάνει εκτεταμένη χρήση των συναρτήσεων λύτη. Το Mathcad απαιτεί ότι οι συναρτήσεις λύτη πρέπει να ορίζονται πριν την επίκλησή τους από το πρόγραμμα. Για το λόγο αυτό οι βασικοί λύτες τοποθετούνται στην αρχή του προγράμματος. Αφού οριστούν με μια συγκεκριμένη δήλωση οι συναρτήσεις λύτη μπορεί να χρησιμοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο ως βασικές συναρτήσεις.

Ο λύτης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της αδιαβατικής εκτόνωσης. Συγκεκριμένα η $fTSOL(S, P, M)$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισεντροπικής θερμοκρασίας διαστολής. Η θερμοκρασία υπολογίζεται από την εντροπία (S), την πίεση (P) και την περιεκτικότητα σε νερό (M). Αρχικά ο λύτης υπολογίζει τη θερμοκρασία που ικανοποιεί την βασική εξίσωση εντροπίας $fST3$ και στη συνέχεια θεωρεί στην τύχη μια θερμοκρασία διαστολής, υπολογίζει τις ποσότητες νερού για κάθε φάση και τελικά υπολογίζει την εντροπία. Η αρχική θεώρηση επαναπροσδιορίζεται έως ότου η εντροπία που προκύπτει ισούται με την αρχική που προέκυψε από την $fST3$. Αντίστοιχα η $fPSOL(S, P, M)$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισεντροπικής πίεσης διαστολής. Η πίεση υπολογίζεται από την εντροπία (S), την πίεση (P) και την περιεκτικότητα σε νερό (M). Στην περίπτωση αυτή ο λύτης θεωρεί τιμές για την πίεση μέχρι να προκύψει ενθαλπία ίση με τη αρχικά υπολογισμένη από την $fST3$.

Η $fTHOL(H, P, M)$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισοστατικής θερμοκρασίας διαστολής από την ενθαλπία, την πίεση και την περιεκτικότητα σε νερό. Αρχικά ο λύτης υπολογίζει τη θερμοκρασία που ικανοποιεί την βασική εξίσωση ενθαλπίας $fHT3$ και στη συνέχεια θεωρεί στην τύχη μια ισοστατική θερμοκρασία, υπολογίζει τις ποσότητες νερού για κάθε φάση και τελικά υπολογίζει την ενθαλπία. Η αρχική θεώρηση επαναπροσδιορίζεται έως ότου η ενθαλπία που προκύπτει ισούται με την αρχική που προέκυψε από την $fHT3$.

Η $fASOL(S, P, M)$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισεντροπικής θερμοκρασίας αποξήρανσης από την εντροπία, την πίεση και την περιεκτικότητα σε νερό. Αρχικά ο λύτης θεωρεί στην τύχη μια ισεντροπική θερμοκρασία αποξήρανσης, υπολογίζει τις ποσότητες νερού για κάθε φάση και τελικά υπολογίζει την εντροπία. Η αρχική θεώρηση επαναπροσδιορίζεται έως ότου η εντροπία που προκύπτει να ισούται με αυτή που προκύπτει από την $fAA3$. Η $fESOL(H, P, M)$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισενθαλπικής θερμοκρασίας αποξήρανσης από την ενθαλπία, την πίεση και την περιεκτικότητα σε νερό. Κατά τη γνωστή διαδικασία ο λύτης θεωρεί μια ισενθαλπική θερμοκρασία αποξήρανσης, υπολογίζει τις ποσότητες νερού για κάθε φάση και τελικά υπολογίζει την ενθαλπία. Η αρχική θεώρηση επαναπροσδιορίζεται έως ότου η ενθαλπία που προκύπτει να ισούται με αυτή που προκύπτει από την $fEE3$.

Η $fMSOL(P, T, W)$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αναλογίας ανάμιξης από την πίεση, τη θερμοκρασία και τη θερμοκρασία υγρού βολβού. Η $fWSOL(P, T, M)$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας υγρού βολβού από την πίεση, τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητα σε νερό.

Η $fCSOL(P, T, M)$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του επιπέδου ανύψωσης συμπυκνώματος από την πίεση, τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητα σε νερό. Τέλος η $fDSOL(P, T, M)$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας σημείου δρόσου από την πίεση, τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητα σε νερό. Όταν είναι γνωστή η θερμοκρασία οποιαδήποτε άλλη θερμοδυναμική ιδιότητα μπορεί να υπολογιστεί από το βασικό PKM επιχειρήματα.

Στην “ψευδώς αδιαβατική” εκτόνωση, όπου διαχωρίζεται το νερό καθώς συμπυκνώνεται (ανοιχτό σύστημα), ο υπολογισμός γίνεται με εκτόνωση σε βήματα των 2kPa περίπου, με διαχωρισμό του συμπυκνωμένου νερού μετά από κάθε βήμα και υπολογισμό, εκ νέου, της εντροπίας της αέριας φάσης πριν από το επόμενο βήμα.

Θερμοκρασία πήξης και η ζώνη στερεοποίησης

Η θερμοκρασία πήξης (TF) και η ζώνη στερεοποίησης (FB) ορίζονται βάσει παγκόσμιων ορισμών. Το συμπυκνωμένο νερό λαμβάνεται σε υγρή φάση, εάν η θερμοκρασία είναι πάνω από τη θερμοκρασία πήξεως. Αν η θερμοκρασία είναι κάτω από τη ζώνη στερεοποίησης, το συμπυκνωμένο νερό λαμβάνεται να είναι όλο σε κατάσταση πάγου. Το σημείο πήξης (TF) είναι το άνω άκρο της ζώνης στερεοποίησης. Εντός της ζώνης στερεοποίησης η ποσότητα του συμπυκνωμένου νερού σε κάθε φάση λαμβάνεται να είναι ανάλογη προς τη συγκεκριμένη θέση της ζώνης, στο μέσον της ζώνης στερεοποίησης το συμπυκνωμένο νερό είναι μισό υγρό και μισό στερεό. Χρησιμοποιώντας μια ζώνη στερεοποίησης εξαλείφεται μια ιδιομορφία, που μπορεί να προκύψει όταν το συμπυκνωμένο νερό παγώνει ξαφνικά, έτσι περιγράφουμε ό, τι συμβαίνει πραγματικά στην ατμόσφαιρα. Η επίδραση της χρήσης μιας ζώνης στερεοποίησης είναι ισοδύναμη με τη φάση μετάπτωσης που προτείνεται από Oogama. Ένα σημείο πήξης στους -10°C με μια ζώνη στερεοποίησης 20°C χρησιμοποιούνται για τους περισσότερους υπολογισμούς. Το αποτέλεσμα της αλλαγής στη θερμοκρασία πήξης και τη ζώνη στερεοποίησης μπορεί να ελεγχθεί με την αλλαγή των τιμών TF και FB. Όταν συνυπάρχουν και οι τρεις φάσεις το νερό

στην αέρια κατάσταση είναι σε ισορροπία με τη φάση του πάγου. Το νερό στην υγρή φάση δεν είναι αυστηρά σε ισορροπία, αλλά το σφάλμα είναι αμελητέο. Ο Donner χρησιμοποίησε μία μεταβατική ζώνη, όπου το συμπυκνωμένο νερό παγώνει γραμμικά μεταξύ των 258K και των 248K. Η θερμοκρασία πήξεως (TF) και η ζώνη στερεοποίησης (FB) τοποθετήθηκαν στην αρχή των βασικών συναρτήσεων με τη μορφή θερμοδυναμικών σταθερών, έτσι ώστε να μπορούν να τροποποιηθούν εάν αυτό είναι επιθυμητό. Τίποτα άλλο στην ενότητα βασικών συναρτήσεων δεν θα πρέπει να αλλάξει. Η πήξη μπορεί να εξαλειφθεί με τον ορισμό της TFC σε -150°C . Η εξάλειψη της ιδιομορφίας, όταν το συμπυκνωμένο νερό παγώνει ξαφνικά, προϋποθέτει ότι η ζώνη στερεοποίησης (FB) να είναι τουλάχιστον 5K.

Η προσέγγιση επίλυσης είναι ισχυρή.

1. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη να προκύψουν συναρτήσεις για την εντροπία κατά τη διάρκεια της αδιαβατικής εκτόνωσης. Η εντροπία υπολογίζεται πάντα από το θεμελιώδη ορισμό της. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη να υπολογιστεί η λανθάνουσα θερμότητα για συγκεκριμένες θερμοκρασίες.
2. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη να χρησιμοποιηθούν προσεγγίσεις, όταν γίνεται προσπάθεια να ρυθμιστούν εκ νέου οι συναρτήσεις για την απομόνωση μεταβλητών. Η διαδικασία υπολογισμού μπορεί πάντα να αντιστραφεί αποδίδοντας πίσω τις αρχικές συνθήκες. Οι συναρτήσεις είναι αρκετά γραμμικές ώστε ο λύτης σπάνια έχει δυσκολία στην παραγωγή της λύσης. Οι αρχικές συνθήκες (PG, TG και MG) μπορεί να είναι οι ίδιες για όλες τις περιπτώσεις.
3. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη να χρησιμοποιήσουν διαφορετικές εξισώσεις κατά τη μετάβαση από υγρό αέρα, σε κορεσμένο αέρα που περιέχει υγρό νερό, σε κορεσμένο αέρα που περιέχει πάγο. Δεν υπάρχει ανάγκη να γίνουν προσαρμογές της εντροπίας όταν γίνεται μετάβαση από την υγρή στη φάση πάγου.
4. Οι ατμοσφαιρικές διεργασίες τείνουν να είναι τέτοιου τύπου ώστε μερικές ιδιότητες διατηρούνται και κάποιες μεταβάλλονται. Για την “πραγματικά αδιαβατική” εκτόνωση, ο λύτης επιλύει ως προς τη θερμοκρασία με γνωστές την εντροπία, την πίεση και τη συνολική αναλογία ανάμιξης. Για τις διεργασίες ανάμιξης, ο λύτης επιλύει ως προς τη θερμοκρασία με δεδομένες την ενθαλπία, την πίεση και τη συνολική περιεκτικότητα σε νερό.
5. Ο υπολογισμός της δυνητικής θερμοκρασία είναι ταυτόσημος με τον υπολογισμό της θερμοκρασίας ισοεντροπική διαστολής εκτός του ότι η τελική πίεση είναι 100kPa. Η δυνητική θερμοκρασία περιλαμβάνει έτσι και την επίδραση του νερού σε οποιαδήποτε φάση και αν βρίσκεται. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη για συναρτήσεις όπως για δυνητική θερμοκρασία υγρού νερού, η δυνητική θερμοκρασία της μάζας αέρα που περιέχει συμπυκνωμένο νερό είναι η δυνητική θερμοκρασία του υγρού νερού με δεδομένο ότι οι αρχικές συνθήκες περιελάμβαναν την ολική περιεκτικότητα σε νερό. Η χρήση των δυνητικών θερμοκρασιών αποφεύγεται λόγω της ασάφειας των ορισμών τους. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει συναρτήσεις για τον

υπολογισμό θερμοκρασιών ισεντροπικής αποξήρανσης και ισοδύναμες θερμοκρασίες και μερικές άλλες ιδιότητες.

6. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες που υπολογίζεται με βάση τις τρεις μεταβλητές PKM είναι σαφείς. Είναι σπάνια ξεκάθαρο κατά πόσον υπολογισμοί δυνητικής θερμοκρασίας περιλαμβάνουν την επίδραση του νερού στην υγρή ή την αέρια φάση. Η ανάγκη να παραχθούν συναρτήσεις για τις τρεις πρότυπες μεταβλητές αναγκάζει τον χρήστη να ορίσει προσεκτικά τη διεργασία.

Η κατάσταση αναφοράς, δηλαδή η κατάσταση μηδενικής εντροπίας και ενθαλπίας, για τον αέρα είναι στους 0°C και τα 100kPa. Η κατάσταση αναφοράς για το νερό είναι υγρό νερό στους 0°C. Η πίεση αναφοράς για υδρατμών είναι η τάση κορεσμένων ατμών του υγρού νερού στους 0°C, τα 0,61070kPa. [31]

STANDARD FUNCTIONS

ATMOSPHERIC THERMODYNAMIC FUNCTIONS

This section contains the standard thermodynamic functions which can be used with any program. The program does not use all these functions.

1.0 Define Constants

Enter Freezing temperature and freezing band

$$\mathbf{TFC \equiv 0, FB \equiv 10}$$

$$\mathbf{CPA \equiv 1004.675}$$

$$\mathbf{KA \equiv \frac{2}{7}}$$

$$\mathbf{RA \equiv CPA \cdot KA}$$

$$\mathbf{CPV \equiv 1846.04}$$

$$\mathbf{KV \equiv \frac{1}{4}}$$

$$\mathbf{RV \equiv CPV \cdot KV}$$

$$\mathbf{fCPA(M) := CPA + CPV \cdot M}$$

$$\mathbf{fRA(M) := RA + RV \cdot M}$$

$$\mathbf{fKA(M) := \frac{fRA(M)}{fCPA(M)}}$$

$$P_0 \equiv 100, P_{V0} \equiv 0.6106\text{E}$$

$$\varepsilon \equiv \frac{RA}{RV}$$

$$T_0 \equiv 273.15, T_F \equiv T_0 + T_{FC}$$

$$G \equiv 9.8, P_G \equiv 70, T_G \equiv 270, M_G \equiv 0.01$$

$$L_{V0} \equiv 2500840, L_{F0} \equiv 333660$$

$$C_W \equiv 4190, C_I \equiv 2090$$

$$\alpha_L \equiv 52.9168\text{E}, \alpha_I \equiv 25.48597, \Gamma_L \equiv 5.07889\text{E}$$

$$\beta_L \equiv 6806.171, \beta_I \equiv 6286.1912, \Gamma_I \equiv 0.52861\text{E}$$

2.0 FUNCTIONS: Vapor pressure, mixing ratio, virtual temperature

$$f_{PVL}(T) \equiv \exp\left(\alpha_L - \frac{\beta_L}{T} - \Gamma_L \cdot \ln(T)\right)$$

$$f_{PVI}(T) \equiv \exp\left(\alpha_I - \frac{\beta_I}{T} - \Gamma_I \cdot \ln(T)\right)$$

$$f_{PV}(T) \equiv \text{if}(T > T_F, f_{PVL}(T), f_{PVI}(T))$$

$$f_{MVS}(P, T) \equiv \varepsilon \cdot \left(\frac{f_{PV}(T)}{P - f_{PV}(T)}\right)$$

$$f_{MVL}(P, T) \equiv \varepsilon \cdot \left(\frac{f_{PVL}(T)}{P - f_{PVL}(T)}\right)$$

$$f_{PV2}(P, M) \equiv M \cdot \frac{P}{M + \varepsilon}$$

$$f_{MS3}(P, T, M) \equiv f_{MVS}(P, T)$$

$$f_{MV3}(P, T, M) \equiv \text{if}(f_{MVS}(P, T) > M, M, f_{MVS}(P, T))$$

$$f_{U3}(P, T, M) := 100 \cdot \left(\frac{M}{f_{MVS}(P, T)}\right)$$

$$f_{PV3}(P, T, M) \equiv f_{MV3}(P, T, M) \cdot \frac{P}{\varepsilon + f_{MV3}(P, T, M)}$$

$$f_{PA3}(P, T, M) \equiv P - f_{PV3}(P, T, M)$$

$$f_{MC3}(P, T, M) \equiv \text{if}(f_{MVS}(P, T) < M, M - f_{MVS}(P, T), 0)$$

$$fMLB(P, T, M) \equiv \text{if}\left(T > TF - FB, fMC3(P, T, M) \cdot \frac{T - TF + FB}{FB}, 0\right)$$

$$fML3(P, T, M) \equiv \text{if}(T \geq TF, fMC3(P, T, M), fMLB(P, T, M))$$

$$fMIB(P, T, M) \equiv \text{if}\left(T < TF, fMC3(P, T, M) \cdot \frac{TF - T}{FB}, 0\right)$$

$$fMI3(P, T, M) \equiv \text{if}(T < TF - FB, fMC3(P, T, M), fMIB(P, T, M))$$

3.0 ENTROPY

$$fSA(P, T) \equiv CPA \cdot \ln\left(\frac{T}{T0}\right) - RA \cdot \ln\left(\frac{P}{P0}\right)$$

$$fSA3(P, T, M) \equiv fSA(fPA3(P, T, M), T)$$

$$fSV(P, T) \equiv CPV \cdot \ln\left(\frac{T}{T0}\right) - RV \cdot \ln\left(\frac{P}{PV0}\right) + \frac{LVO}{T0}$$

$$fSV3(P, T, M) \equiv fMV3(P, T, M) \cdot fSV(fPV3(P, T, M), T)$$

$$fSL(T) \equiv CW \cdot \ln\left(\frac{T}{T0}\right)$$

$$fSL3(P, T, M) \equiv fML3(P, T, M) \cdot fSL(T)$$

$$fSI(T) \equiv CI \cdot \ln\left(\frac{T}{T0}\right) - \frac{LFO}{T0}$$

$$fSI3(P, T, M) \equiv fMI3(P, T, M) \cdot fSI(T)$$

$$fST3(P, T, M) \equiv fSA3(P, T, M) + fSV3(P, T, M) + fSL3(P, T, M) + fSI3(P, T, M)$$

$$fSM3(P, T, M) := \frac{fST3(P, T, M)}{(1 + M)}$$

$$fSC(T) \equiv \text{if}(T > TF, fSL(T), fSI(T))$$

$$fAA3(P, T, M) \equiv fSA(P, T) + M \cdot fSC(T)$$

$$f\theta M4(P, T, M, PC) \equiv T \cdot \left(\frac{PC}{P}\right)^{\frac{RA + M \cdot RV}{CPA + M \cdot CPV}}$$

4.0 ENTHALPY

$$fHA(T) \equiv CPA \cdot (T - T0)$$

$$fHA3(P, T, M) \equiv fHA(T)$$

$$fHV(T) \equiv [CPV \cdot (T - T0) + LV0]$$

$$fHV3(P, T, M) \equiv fMV3(P, T, M) \cdot fHV(T)$$

$$fHL(T) \equiv [CW \cdot (T - T0)]$$

$$fHL3(P, T, M) \equiv fML3(P, T, M) \cdot fHL(T)$$

$$fHI(T) \equiv [CI \cdot (T - T0) - LF0]$$

$$fHI3(P, T, M) \equiv fMI3(P, T, M) \cdot fHI(T)$$

$$fHC(T) \equiv \text{if}(T > TF, fHL(T), fHI(T))$$

$$fEE3(P, T, M) \equiv fHA(T) + M \cdot fHC(T)$$

$$fHT3(P, T, M) \equiv fHA3(P, T, M) + fHV3(P, T, M) + fHL3(P, T, M) + fHI3(P, T, M)$$

$$fHW4(P, T, M, W) \equiv fHA(T) + M \cdot fHV(T) + \text{if}(W > TF, fHL(W), fHI(W)) \cdot (fMVS(P, W) - M)$$

$$f\mu4(P, T, M, Z) \equiv fHT3(P, T, M) + G \cdot (1 + M) \cdot Z$$

5.0 VIRTUAL TEMPERATURE AND HEIGHT

$$fTV(T, M) \equiv T \cdot \left(\frac{1 + \frac{M}{\varepsilon}}{1 + M} \right)$$

$$fTV3(P, T, M) \equiv \text{if} \left[M < fMVS(P, T), fTV(T, M), fTV(T, fMVS(P, T)) \cdot \left(\frac{1 + fMVS(P, T)}{1 + M} \right) \right]$$

$$f\alpha(P1, P2, TV1, TV2) \equiv \frac{G}{RA} \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{TV2}{TV1}\right)}{\ln\left(\frac{P2}{P1}\right)} \right)$$

$$fZ(P1, P2, TV1, TV2) \equiv \frac{TV2 - TV1}{f\alpha(P1, P2, TV1, TV2)}$$

SOLVER BLOCKS

ISENTROPIC EXPANSION TEMPERATURE

Given

$$fST3(P, TG, M) = S$$

$$fTSOL(S, P, M) := \text{Find}(TG)$$

ISENTROPIC EXPANSION PRESSURE

Giver

$$\mathbf{fST3(PG, T, M) = S}$$

$$\mathbf{fPSOL(S, T, M) := Find(PG)}$$

Solve block for ISO-STATIC-ENERGY expansion temperature

Giver

$$\mathbf{fHT3(P, TG, M) = H}$$

$$\mathbf{fTHOL(H, P, M) := Find(TG)}$$

ISENTROPIC DESSICATION TEMPERATURE

Giver

$$\mathbf{fAA3(P, TG, M) = S}$$

$$\mathbf{fASOL(S, P, M) := Find(TG)}$$

ISENTHALPIC DESSICATION TEMPERATURE, EQUIVALENT TEMPERATURE

Giver

$$\mathbf{fEE3(P, TG, M) = H}$$

$$\mathbf{fESOL(H, P, M) := Find(TG)}$$

MIXING RATIO FROM WET BULB

Giver

$$\mathbf{fHT3(P, W, fMVS(P, W)) = fHW4(P, T, MG, W)}$$

$$\mathbf{fMSOL(P, T, W) := Find(MG)}$$

WET BULB FROM MIXING RATIO

Giver

$$\mathbf{fHT3(P, TG, fMVS(P, TG)) = fHW4(P, T, M, TG)}$$

$$\mathbf{fWSOL(P, T, M) := Find(TG)}$$

LIFTING CONDENSATION LEVEL

Giver

$$\mathbf{fU3(PG, fM4(P, T, M, PG), M) - 100 = 0}$$

$$\mathbf{fCSOL(P, T, M) := Find(PG)}$$

DEW POINT

Giver

fPV2(P, M) = fPV(TG)

fDSOL(P, T, M) := Find(TG)

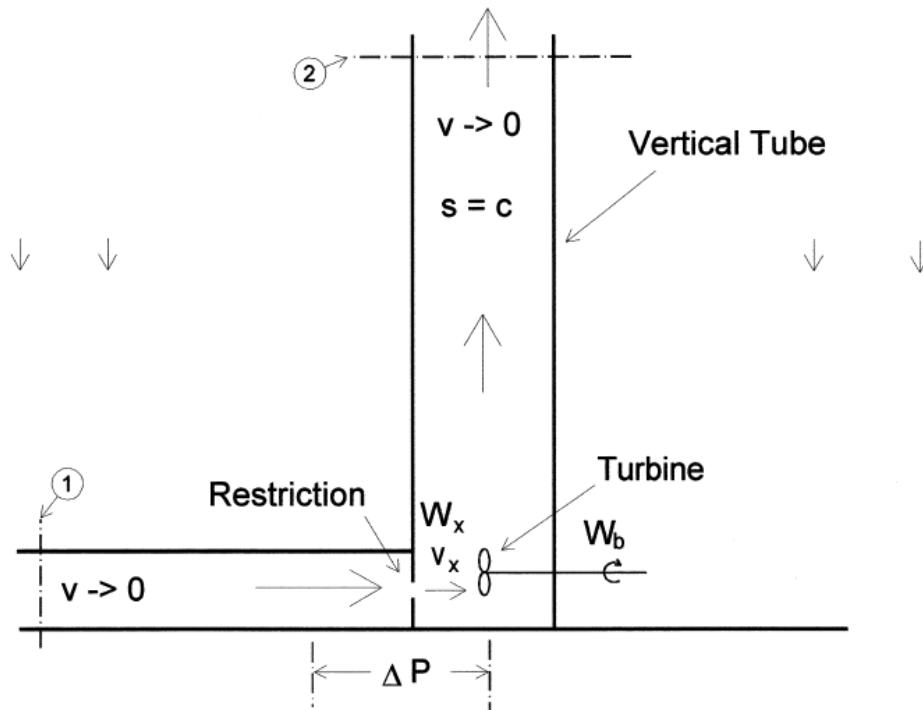
Παραγωγή Έργου από Δίνη κατά την Ανοδική Ατμοσφαιρική Συναγωγή

Εισαγωγή

Το πρόγραμμα “VPS_Z.mcd” χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του έργου που παράγεται όταν ο αέρας ανυψώνεται αναστρέψιμα από την επιφάνεια της Γής στο επίπεδο των 20kPa σε τροπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το πρόγραμμα θεωρεί ένα σταθερό γεωδυναμικό ύψος για το επίπεδο των 20kPa και χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργήσει τον Πίνακα 1 του άρθρου “Vortex process for capturing mechanical energy during upward heat convection in the atmosphere” του Michaud. Οι υπολογισμοί βασίζονται στο ότι το συμπυκνωμένο νερό δεν διαχωρίζεται από τον αέρα και του επιτρέπεται να παγώσει (αδιαβατική μεταβολή με ψύξη).

Παρουσίαση

Το έργο της άνωσης που παράγεται όταν ο αέρας ανυψώνεται μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας την εξίσωση ενέργειας στη διεργασία που φαίνεται στο Σχήμα 5 και μπορεί να θεωρηθεί θερμοδυναμικά ισοδύναμη με την AVE.



Σχήμα 5: Κατακόρυφος σωλήνας με περιορισμό και στρόβιλο στη βάση του. [23]

Η εξίσωση ενέργειας γράφεται:

$$w_b = q - \Delta h - \Delta gz - \frac{\Delta v^2}{2} \quad (1)$$

όπου δέλτα είναι για τις διαφορές των παραμέτρων μεταξύ των συνθηκών της εισόδου και της εξόδου όπως επισημαίνονται με 1 και 2 στο Σχήμα 5, όπου το q είναι η θερμότητα που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια των διεργασιών 1-2, το h είναι η ενθαλπία του αέρα συμπεριλαμβανομένης της ενθαλπίας του περιεχομένου νερού, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, z είναι το ύψος του σωλήνα, και το v είναι η ταχύτητα του αέρα. Για μια αδιαβατική διεργασία ($Q = 0$), με αμελητέα ταχύτητα εισόδου και εξόδου ($v \rightarrow 0$), η εξίσωση ενέργειας γίνεται:

$$w_b = -\Delta h - \Delta gz \quad (2)$$

Το έργο ισούται με τη μείωση της ενθαλπίας του αέρα μείον την αύξηση της δυναμικής ενέργεια του αέρα. Το έργο είναι μέγιστο, όταν η διαδικασία είναι χωρίς τριβές και αναστρέψιμη, δηλαδή όταν η εκτόνωση είναι ισεντροπική. Το μέγιστο έργο είναι, ως εκ

τούτου, ίσο με τη μείωση της ενθαλπίας μείον την αύξηση της δυναμικής ενέργειας σε μια διαδικασία με σταθερή εντροπία, (s =σταθερά).

Μπορούμε να υπολογίσουμε το έργο της άνωσης που παράγεται όταν ο αέρας ανυψώνεται από την επιφάνεια της Γής στο επίπεδο των 20kPa για δεδομένες συνθήκες: $P_1=101\text{kPa}$, $T_1=27^\circ\text{C}$, $U_1=80\%$ που αντιστοιχεί σε $m_1=18.18\text{g/kg}$, $P_2=20\text{kPa}$ και $z_2=12.400$, αφού το επίπεδο ουδέτερης άνωσης είναι συνήθως πάνω από το επίπεδο των 20kPa και τυπικά 12.400m για τροπικές περιοχές. Οι αντίστοιχες μεταβλητές ενέργειας είναι: $h_1=73485\text{J/kg}$, $h_2=51954\text{J/kg}$, $s_1=s_2=256.7\text{J/kg}$, $h=125440\text{J/kg}$, $gz=123.730\text{J/kg}$. Το έργο της εκτόνωσης όταν ο αέρας διαστέλλεται από τα 101 στα 20kPa είναι 125.440J/kg, αλλά 123.730J/kg απαιτούνται για να σηκωθεί ένα κιλό αέρα, συμπεριλαμβανομένου του περιεχόμενου νερού στο επίπεδο των 20kPa. Το καθαρό έργο επομένως προκύπτει: $w_b=1.710\text{J/kg}$.

Η επίδραση των τιμών είναι δύσκολο να φανεί από την εξίσωση (2), αλλά μπορεί άμεσα να εκτιμηθεί εφαρμόζοντας την για διαφορετικές συνθήκες. Αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα επιφάνειας κατά 1°C , με σταθερή αναλογία ανάμιξης, αυξάνει το $w_b=250\text{J/kg}$. Αυξάνοντας την σχετική υγρασία της επιφάνειας του αέρα κατά 5%, σε σταθερή θερμοκρασία, αυξάνουμε το $w_b=585\text{J/kg}$. Αυξάνοντας την αναλογία ανάμιξης της επιφάνειας του αέρα 1g/kg , με σταθερή τη θερμοκρασία, αυξάνει το w_b κατά 517J/kg . Αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα επιφάνειας κατά 1°C , με τη σχετική υγρασία σταθερή, αυξάνει το w_b κατά 825J/kg , διότι τόσο η θερμοκρασία όσο και η αναλογία ανάμιξη αυξάνουν. Μια μικρή αλλαγή στη θερμοκρασία του αέρα έχει μεγάλο αντίκτυπο στο έργο της άνωσης. Η μείωση της θερμοκρασίας του αέρα στην επιφάνεια κατά 2°C με σταθερή σχετική υγρασία, θα μειώσει το w_b κοντά στο μηδέν. Μειώνοντας τη μέση θερμοκρασία κατά περίπου 2°C , χωρίς μεταβολή των συνθηκών του αέρα επιφάνειας, μειώνει το επίπεδο της επιφάνειας των 20kPa κατά 100m και αυξάνει το w_b κατά 1000J/kg .

Το έργο που παράγεται όταν η θερμότητα μεταφέρεται προς τα άνω από την συναγωγή είναι ουσιαστικά ίση με το έργο που θα παραχθεί εάν η θερμότητα μεταφερθεί από μια μηχανή Carnot. Ο βαθμός απόδοσης Carnot (n_c) δίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$n_c = \frac{T_h - T_c}{T_h} \quad (3)$$

όπου T_h και T_c είναι οι απόλυτες θερμοκρασίες στις οποίες η θερμότητα που υποβλήθηκαν και δεδομένου επάνω. Τροπόσφαιρα δέχεται θερμότητα από χαμηλά σε μια μέση θερμοκρασία 20°C και δίνει θερμότητα προς τα πάνω κατά μέσο όρο στους -20°C , ο βαθμός απόδοσης Carnot θα είναι 15%. [26] [27] Περίπου το 15% της θερμότητα που μεταφέρεται προς τα πάνω από την συναγωγή μετατρέπεται σε έργο, ανεξάρτητα από το αν η θερμότητα μεταφέρεται ως αισθητή ή λανθάνουσα. Το ίδιο συμπέρασμα συνάγεται ανεξάρτητα από άλλους ερευνητές.

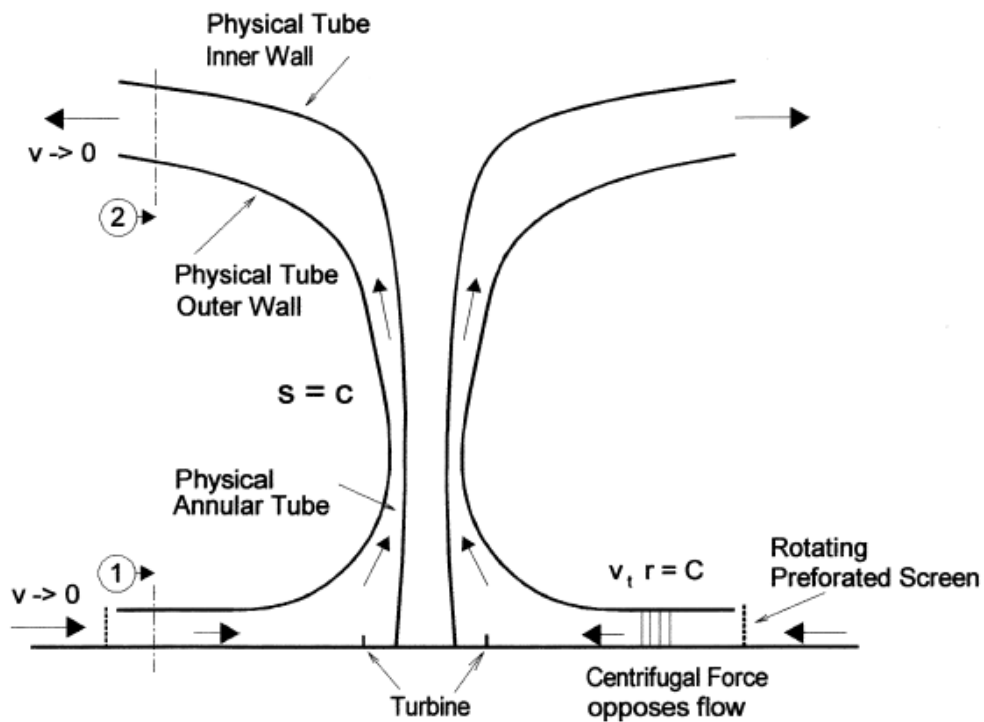
Η AVE μπορεί να χρησιμοποιήσει τη θερμότητα που λαμβάνεται κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, επειδή η ψυχρή δεξαμενή βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ψυχρή δεξαμενή είναι η τροπόσφαιρα της Γής, που ακτινοβολεί θερμότητα στο διάστημα και έχει κατά μέσο όρο θερμοκρασία -20°C .

Στην AVE, το ανερχόμενο “δαχτυλίδι” αέρα θα έχει θερμοκρασία από 1 έως 5°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος για ύψος 12 χιλιομέτρων, δίνοντας έτσι τιμή στο w_b μεταξύ των 400 και των 2000J/kg .

Η τουρμπίνα στο Σχήμα 5, που παράγεται η κινητική ενέργεια (w_x), είναι ουσιαστικά ένας περιορισμός που ακολουθείται από μία πτερωτή, όπου η κινητική ενέργεια συλλαμβάνεται, δηλαδή $w_b = w_x$. Το γεγονός ότι το έργο παράγεται όταν η θερμότητα μεταφέρεται προς τα πάνω με συναγωγή είναι γενικά αναγνωρισμένο. [32] [33]

Το μεγαλύτερο εμπόδιο για την αποδοχή της σκοπιμότητας της AVE είναι η έλλειψη αναγνώρισης του γεγονότος ότι το έργο της άνωσης μπορεί να μεταφέρεται στο σημείο όπου η ροή περιορίζεται αντί να διαχέεται όταν συμβαίνει εκτόνωση. Η μείωση της πίεσης στη βάση του σωλήνα στο Σχήμα 5 είναι ίση με το βάρος ανά μονάδα επιφάνειας της στήλης του αέρα περιβάλλοντος στο ίδιο ύψος με την καπνοδόχο μείον το βάρος ανά μονάδα επιφάνειας του αέρα στο εσωτερικό της καμινάδας. Το γεγονός ότι η κινητική ενέργεια (w_x) που υπολογίζεται από τη διαφορά πίεσης στη βάση του σωλήνα (ΔP) είναι πανομοιότυπη με το έργο της άνωσης που υπολογίζεται από την Εξ. (2) καταδεικνύει ότι το έργο της άνωσης μπορεί να μεταφερθεί προς τα κάτω. Η μείωση της πίεσης βάσης (ΔP) στο προηγούμενο παράδειγμα είναι $1,94\text{kPa}$. Η κινητική ενέργεια του αέρα επιφάνειας αφότου διέρχεται από τον περιορισμό, με διαφορά πίεσης $1,94\text{kPa}$, θα είναι 1.710J/kg .

Ένας καλός τρόπος για να κατανοήσουμε τη λειτουργία μιας συναγωγικής δίνης είναι να ξεκινήσουμε με ένα δακτυλιοειδή σωλήνα, και να εξετάσουμε τι συμβαίνει όταν ο αέρας συγκλίνει προς η βάση του σωλήνα έχει μία εφαπτομενική ταχύτητα (v_t). Η ανοδική ροή μπορεί να λάβει χώρα στο δακτυλιοειδή σωλήνα που δείχνεται παρακάτω στο Σχήμα 6 και όχι στον κυκλικό σωλήνα που δείχνεται στο Σχήμα 5, επειδή το σχήμα της καπνοδόχου δεν αλλάζει την θερμοδυναμική διεργασία. Η ανοδική ροή πραγματοποιείται στο δακτύλιο μεταξύ των δύο σωλήνων. Δεν υπάρχει ροή στον κεντρικό σωλήνα που είναι κλειστός στο κάτω μέρος. Καθώς ο αέρας συγκλίνει προς το δακτυλιοειδή σωλήνα, η εφαπτομενική ταχύτητά του αυξάνεται για να διατηρηθεί η στροφορμή που αποκτήθηκε περνώντας μέσα από την είσοδο ($v_t \cdot r = \text{σταθερά}$), όπου r είναι η ακτινική απόσταση από τον άξονα της δίνης. Η διαφορά πίεσης λόγω της φυγόκεντρης δύναμης στο συγκλίνοντα αέρα είναι $\rho \cdot v_m^2 / 2$.



Σχήμα 6: Φυσικός ανοδικός σωλήνας της AVE. [23]

Σε μία ροή χωρίς τριβή, η ακτινική ροή θα σταματήσει όταν η φυγόκεντρος δύναμη είναι ίση με τη μείωση της πίεσης στην βάση του σωλήνα. Περαιτέρω σύγκλιση μπορεί να προκύψει μόνο αφότου η τριβή έχει μειώσει την εφαπτομενική ταχύτητα επαρκώς για τη φυγόκεντρο δύναμη για να γίνει μικρότερη από την διαφορική πίεση βάσης. Η σύγκλιση είναι, συνεπώς, περιορίζεται στο λεπτό στρώμα κοντά στην επιφάνεια της Γής, γιατί πάνω από αυτό το οριακό στρώμα η τριβή είναι αμελητέα. Ο αέρας ανυψώνεται στο δακτύλιο διατηρώντας μια εφαπτομενική ταχύτητα και τη φυγόκεντρο δύναμη που παράγεται από την ανύψωση και ο σπειροειδώς ανερχόμενος αέρας αντιτίθεται στην ακτινική διαφορά πίεσης. Εάν η σωλήνα εξαφανιζόταν αφού η δίνη είχε σταθεροποιηθεί, η διάμετρος του δακτυλίου θα προσαρμοζόταν από μόνη της, έτσι ώστε η ακτινική διαφορά πίεσης να εξισορροπείται από την φυγόκεντρο δύναμη. Μόλις επανέλθει η ισορροπία ακτινικής πίεσης, δεν θα υπάρχει περαιτέρω σύγκλιση σε ενδιάμεσα επίπεδα. Η δίνη θα αποκλίνει σε μεγάλο υψόμετρο καθώς η διαφορική πίεση, λόγω της διαφοράς πυκνότητας, μειώνεται και γίνεται μικρότερη από τη φυγόκεντρο δύναμη. Η δίνη συμπεριφέρεται σαν μια δυναμική καμινάδα: μια δίνη σε κυκλοστροφική ισορροπία επιτρέπει λίγο ή και καθόλου ακτινική ροή προς τον πυρήνα της, διότι η ακτινική δύναμη που παράγει η διαφορά πίεσης βρίσκεται σε σταθερή ισορροπία με τη φυγόκεντρο δύναμη. Η κυκλοστροφική ισορροπία διαταράσσεται μόνο στο επιφανειακό στρώμα, επειδή η τριβή με το έδαφος μειώνει την

εφαπτομενική ροή και τη φυγόκεντρο δύναμη. Η διάχυση του έργου σε ανεμοστρόβιλους και τυφώνες συγκεντρώνεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. [15] Η ανοδική ταχύτητα των μη περιστρεφόμενων ανοδικών ρευμάτων αέρα περιορίζεται από την εισροή και την τριβή και το έργο της άνωσης δεν μεταφέρεται προς τα κάτω στην επιφάνεια. [22] Οι απώλειες τριβής είναι υψηλότερες σε ασυνεχή ανοδικά ρεύματα αέρα από ό,τι σε μια συνεχή ροή δίνης. [22] [23]

VPS_Z

[STANDARD FUNCTIONS]

by L. Michaud,

MathCad calculations for article:

"Vortex Process for Capturing the Mechanical Energy Produced during Upward Heat convection in the atmosphere".

Enter pressures and height:

$$P1 := 101, P2 := 20, Z2 := 1240C$$

Enter temperature and relative humidity for the four cases:

$$n := 1..4$$

$$C1 := \begin{pmatrix} 27.0 \\ 28.0 \\ 27.0 \\ 28.0 \end{pmatrix} \quad UP1 := \begin{pmatrix} 80 \\ 75 \\ 85 \\ 80 \end{pmatrix}$$

Convert temperature to K, and Humidity to fraction:

$$T1 := \overrightarrow{(C1 + T0)}$$

$$U1 := \overrightarrow{\left(\frac{UP1}{100}\right)}$$

Calculate Mixing Ratio:

$$M1 := \overrightarrow{(fMVS(P1, T1) \cdot U1)}$$

Make mixing ratio in case 2 the same as in case 1:

$$M1_2 := M1_1$$

$$U1_2 := \frac{M1_2}{fMVS(P1, T1_2)}$$

Calculate Enthalpy and Entropy:

$$\underline{H1} := \text{fHT3}(\underline{P1}, \underline{T1}, \underline{M1})$$

$$\underline{S1} := \text{fST3}(\underline{P1}, \underline{T1}, \underline{M1})$$

Display State 1 conditions for the four cases:

$\underline{C1}_n =$	$\underline{T1}_n =$	$\underline{U1}_n \cdot 100$	$\underline{M1}_n \cdot 1000$	$\underline{H1}_n =$	$\underline{S1}_n =$
27	300	80	18	73486	257
28	301	75	18	74524	260
27	300	85	19	76383	266
28	301	80	19	77422	270

Calculate state 2 conditions.

Calculate isentropic expansion temperature using a solver:

$$\underline{T2} := \text{fTSOL}(\underline{S1}, \underline{P2}, \underline{M1})$$

Calculate Enthalpy:

$$\underline{H2} := \text{fHT3}(\underline{P2}, \underline{T2}, \underline{M1})$$

Calculate Static Energy:

$$\underline{\mu2} := [\underline{H2} + \underline{G} \cdot \underline{Z2} \cdot (1 + \underline{M1})]$$

Calculate the work of buoyance (CAPE):

$$\underline{W12} := (\underline{H1} - \underline{\mu2})$$

Calculate Base Pressure and Base Pressure Reduction:

$$\underline{PX} := \left[\underline{P1} \cdot \left(1 - \frac{\underline{W12}}{\text{fCPA}(\underline{M1}) \cdot \underline{T1}} \right)^{\frac{1}{\text{fKA}(\underline{M1})}} \right]$$

$$\underline{\Delta P} := (\underline{P1} - \underline{PX})$$

$T_{2n} =$	$H_{2n} =$	$\mu_{2n} =$	$W_{12n} =$	$PX_n =$	$\Delta P_n =$
229	-51954	71775	1711	99	2
229	-51164	72565	1959	99	2
231	-49779	74088	2295	98	3
232	-48979	74887	2535	98	3

Calculate work increment beyond the base case:

$$\Delta W_2 := W_{12_2} - W_{12_1}$$

$$\Delta W_2 = 248$$

$$\Delta W_3 := W_{12_3} - W_{12_1}$$

$$\Delta W_3 = 584$$

$$\Delta W_4 := W_{12_4} - W_{12_1}$$

$$\Delta W_4 = 824$$

Calculate the efficiency of the heat increment:

$$EFF_2 := \frac{\Delta W_2 \cdot 100}{H_{1_2} - H_{1_1}}$$

$$EFF_2 = 24$$

$$EFF_3 := \frac{\Delta W_3 \cdot 100}{H_{1_3} - H_{1_1}}$$

$$EFF_3 = 20$$

$$EFF_4 := \frac{\Delta W_4 \cdot 100}{H_{1_4} - H_{1_1}}$$

$$EFF_4 = 21$$

Υπολογισμός Μέγιστης Δυνατής Έντασης Τροπικού Κυκλώνα με τη Μέθοδο Συνολικής Ενέργειας

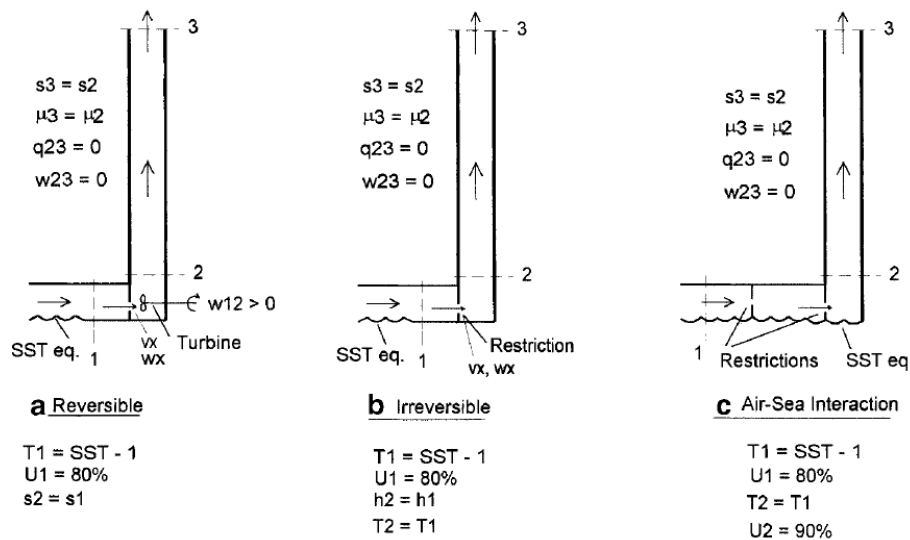
Εισαγωγή

Το πρόγραμμα "MPI_Z.mcd" χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ελάχιστης πίεσης επιφάνεια όταν ο αέρας ανυψώνεται από την επιφάνεια στα επίπεδα των 20 ή των 10kPa σε τροπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η ελάχιστη επιφανειακή πίεση υπολογίζεται για τον αέρα που πλησιάζει ισορροπία σε κανονική επιφάνεια και για τον αέρα που πλησιάζει ισορροπία στη μειωμένη πίεση του eyewall. Το συμπυκνωμένο νερό δεν διαχωρίζεται από

τον ανερχόμενο αέρα και αφήνεται να ψυχθεί. Αυτό το πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθούν οι Πίνακες 1 και 2 της εργασίας “Total energy equation method for calculating hurricane intensity” του Michaud. Το πρόγραμμα “MPI_S.mcd” είναι αντίστοιχο με το “MPI_Z.mcd”, με τη μόνη διαφορά ότι υπολογίζει την τελική τιμή της ανύψωσης για τα επίπεδα των 20 ή των 10kPa από τα δεδομένα εισόδου και δεν τα θεωρεί γνωστά όπως κάνει το “MPI_Z.mcd”. Το πρόγραμμα μπορεί ασφαλώς να τρέξει για οποιαδήποτε δεδομένα εισόδου επιλέξουμε. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν ατμοσφαιρικά δεδομένα από τις 17 Ιανουαρίου 1999, για το νησί Willis το οποίο βρίσκεται στο Μεγάλο Κοραλλιογενή Ύφαλο στη Θάλασσα των Κοραλλίων περίπου 450 χιλιόμετρα ανατολικά του Queensland της Αυστραλίας. Τα δεδομένα είναι τυπικά για το μήνα Ιανουάριο.

Παρουσίαση

Αναλύουμε τα τρία ιδανικά θερμοδυναμικά μοντέλα σταθερής κατάστασης που φαίνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Ιδανική ανοδική ροή σε κατακόρυφο αγωγό. α) Αναστρέψιμη περίπτωση, β) Μη αναστρέψιμη περίπτωση, γ) Περίπτωση αλληλεπίδρασης αέρα – θάλασσας. [25]

Στην κάθε περίπτωση, ο αέρας επιφάνειας εξυψώνεται ισητροπικά σε ένα μονωμένο κάθετο σωλήνα και η ροή εισόδου περιορίζεται στον πυθμένα του σωλήνα (Michaud, 2000). Οι υπολογισμοί βασίστηκαν στο ότι ο ανερχόμενος αέρας έχει μια σταθερή ισοδύναμη δυναμική θερμοκρασία θ_e κατά την υδροστατική μέθοδο του Holland, (1997). Η μέθοδος της εξίσωσης συνολικής ενέργειας (Total Energy Equation) βασίζεται στο ότι ο ανερχόμενος αέρας έχει μια σταθερή εντροπία (s). Οι δύο μέθοδοι είναι ισοδύναμες, δεδομένου ότι, μια διαδικασία σταθερής ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας είναι μια ισητροπική διαδικασία. Η υδροστατική μέθοδος υπολογισμού μείωσης της επιφανειακής πίεσης συνεπάγεται ότι το ανερχόμενο ρεύμα αέρα διαχωρίζεται από το περιβάλλον μέσω ενός

χωρίσματος, όπως το τοίχωμα του σωλήνα που φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα 7. Η αναστρέψιμη περίπτωση Α αντιστοιχεί σε πραγματικά αδιαβατική διαστολή. Η αντιστρεψιμότητα απαιτεί η κινητική ενέργεια να αφαιρεθεί από το σύστημα πριν να διαλυθεί. Η πτερωτή στο Σχήμα 7α δεσμεύει την κινητική ενέργεια της ροής που προέρχονται από το άνοιγμα στη βάση του σωλήνα. Στη μη αναστρέψιμη περίπτωση Β η κινητική ενέργεια της ροής δεν δεσμεύεται και αφήνεται να επανέλθει στη μορφή θερμότητας. Η διαδικασία 1-2 μετατρέπεται από διεργασία σταθερής εντροπίας, $s_2=s_1$, σε διεργασία σταθερής ενθαλπίας $h_2=h_1$, που είναι επίσης και διεργασία σταθερής θερμοκρασίας $T_2=T_1$. Στην αναστρέψιμη περίπτωση Α και τη μη-αναστρέψιμη περίπτωση Β, ο αέρας έχει σχετική υγρασία 80% και θερμοκρασία 1°C χαμηλότερη από την SST στη θέση 1 πριν από την έναρξη της διαστολής. Στην περίπτωση αλληλεπίδρασης αέρα-θάλασσας C, ο αέρας έχει σχετική υγρασία 90% και θερμοκρασία 1°C χαμηλότερη από την SST σε ελαττωμένη πίεση P_2 μετά την αρχική διαστολή. Το έργο για μια διαδικασία συνεχής ροής δίνεται από την εξίσωση ολικής ενέργειας:

$$w_b = q - \Delta h - \Delta gz - \frac{\Delta v^2}{2} \quad (1)$$

όπου w είναι το έργο που παράγει η ροή του ρευστού, q είναι η θερμότητα που λαμβάνει το ρευστό, h είναι η ενθαλπία του αέρα, συμπεριλαμβανομένης της ενθαλπίας του περιεχόμενου νερού, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, το z είναι το ύψος, και v είναι η ταχύτητα της ροής. Τα δέλτα λαμβάνονται μεταξύ των όρων εισόδου και εξόδου της κάθε διεργασίας. Η εξίσωση (1) εφαρμόζεται μεμονωμένα στις διεργασίες 1-2 και 2-3 καθώς επίσης και στη συνολική διεργασία 1-3. Για τις διεργασίες χωρίς μεταφορά θερμότητας και αμελητέα ταχύτητες, ισχύει $q=0$ και v προσεγγίζει το μηδέν ($v \rightarrow 0$) η (12) γίνεται:

$$w_b = -\Delta h - \Delta gz \quad (2)$$

Το έργο ισούται με τη μείωση της ενθαλπίας του αέρα μείον την αύξηση δυναμικής ενέργειας του αέρα. Το έργο είναι μέγιστο, όταν η διαδικασία γίνεται χωρίς τριβές και είναι αναστρέψιμη, όταν δηλαδή η εκτόνωση είναι ισεντροπική. Το μέγιστο έργο είναι, ως εκ τούτου, ίσο με τη μείωση της ενθαλπίας μείον την αύξηση της δυναμικής ενέργειας σε μια διαδικασία με σταθερή εντροπία, ($s = \text{σταθερά}$). Η μεταβλητή μ αντιπροσωπεύει τη στατική ενέργεια του αέρα, συμπεριλαμβανομένου του περιεχόμενου νερού. Η μέθοδος της εξίσωσης συνολικής ενέργειας βασίζεται στο γεγονός ότι το έργο κατά τη διάρκεια της διεργασίας σταθερής εντροπίας 2-3 πλησιάζει το μηδέν ($W_{23}=0$). Η πτώση πίεσης λόγω της τριβής στο κομμάτι της ανοδικής ροής είναι μικρή σε σύγκριση με τη μείωση της υδροστατικής πίεσης επιφανείας. Η πτώση πίεσης λόγω της τριβής σε ένα οριζόντιο σωλήνα διαμέτρου 1km και μήκους 15km με ταχύτητα αέρα 20m/s είναι μικρότερη από 0,01kPa. Η πίεση στη βάση του σωλήνα, P_2 , είναι επομένως η πίεση, για την οποία, το έργο κατά τη διάρκεια της διεργασίας 2-3 προσεγγίζει το μηδέν, άρα και η πίεση, για την οποία, η μεταβολή της στατικής ενέργειας του ανερχόμενου αέρα είναι μηδέν. Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πίεσης βάσης και στις τρεις περιπτώσεις.

Ιδιότητες Αέρα	Αναστρέψιμη	Μη αναστρέψιμη	Αλληλεπίδραση Αέρα-Θάλασσας
	Περίπτωση Α	Περίπτωση Β	Περίπτωση C
SST (C)	28	28	28
P ₁ (kPa)	101.0	101.0	101.0
SAT=T ₁ (C)	27.0	27.0	27.0
T ₁ (K)	300.15	300.15	300.15
U ₁ (%)	80	80	80
r ₁ (g/kg)	18.18	18.18	18.18
μ ₁ =h ₁ (J/kg)	73485	73485	73485
s ₁ (J/kgK)	256.7	256.7	256.7
MPI = P ₂ (kPa)	99.06	98.48	96.29
T ₂ (K)	298.50	300.15	300.15
r ₂ (g/kg)	18.18	18.18	21.49
U ₂ (%)	86.7	77.9	90
μ ₂ =h ₂ (J/kg)	71775	73485	81931
s ₂ (J/kgK)	256.7	264.4	299.3
P ₃ (kPa)	20.0	20.0	20.0
T ₃ (K)	228.50	230.02	237.94
r ₃ (g/kg)	18.18	18.18	21.49
z ₃ (m)	12400	12400	12400
h ₃ (J/kg)	-51954	-50243	-42201
μ ₃ =h ₃ +gz ₃ (1+r)	71775	73485	81931
s ₃ (J/kgK)	256.7	264.2	299.3
Έργο (J/kg)			
Δh ₂₃ =h ₂ -h ₃	123730	123730	124130
Δgz ₂₃ =gz(1+r)	123730	123730	124130
w ₂₃	0	0	0
w _x	1710	2232	4230
Ταχύτητα (m/s)			
v _x	58.5	66.8	92.0
Μείωση Πίεσης Βάσης			
HI=ΔP ₁₂ (kPa)	1.94	2.52	4.71

Πίνακας 9: Υπολογισμός του MPI και της πτώσης πίεσης στη βάση, για ανύψωση στο επίπεδο των 20kPa για κάθε περίπτωση. [25]

Ο Πίνακας 9 δείχνει τα αποτελέσματα για την άνοδο του αέρα από την επιφάνεια στο επίπεδο 20kPa κάτω από τις τυπικές συνθήκες τροπικής ζώνης. Το γεωδυναμικό ύψος του επιπέδου των 20kPa λαμβάνεται ως 12.400m, το οποίο είναι τυπικό για τις τροπικές περιοχές. Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, η ένταση είναι υψηλότερη εάν ο αέρας ανεβαίνει στο επίπεδο της ουδέτερης άνωσης. Το επίπεδο ουδέτερης άνωσης στις τροπικές περιοχές είναι συνήθως πάνω από το επίπεδο των 20kPa.

Αναστρέψιμη περίπτωση A

Οι συνθήκες της επιφάνειας του αέρα στον Πίνακα 9 είναι: $P_1 = 101\text{kPa}$, $T_1 = 27\text{ C}$, $U_1 = 80\%$. Το MPI υπολογίζεται $99,06\text{kPa}$, και η ένταση είναι 1.94kPa . Η εντροπία (s) του αέρα είναι $256,7\text{J/kg}$ στις τρεις περιπτώσεις. Η ευαισθησία της έντασης είναι μεγάλη για την επιφανειακή θερμοκρασία και την υγρασία. Αύξηση της SAT κατά 1°C με σταθερή αναλογία ανάμιξης (r) αυξάνει την ένταση κατά $0,27\text{kPa}$. Αύξηση της SAU κατά 1% με σταθερή SAT αυξάνει την ένταση κατά $0,11\text{kPa}$. Αύξηση της SAT κατά 1°C με σταθερή SAU αυξάνει την ένταση κατά $0,90\text{kPa}$ διότι τόσο η θερμοκρασία όσο και η αναλογία ανάμιξης αυξάνει. Η μείωση του γεωδυναμικού ύψους των 20kPa κατά 100m , μειώνοντας τη μέση θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά 2K αυξάνει την ένταση κατά $1,11\text{kPa}$. Επομένως μια μικρή αλλαγή στη θερμοκρασία του αέρα έχει μεγάλη επίδραση στην ένταση. Η μείωση της SAT κατά 2°C με σταθερή σχετική υγρασία θα μειώσει την ένταση σχεδόν στο μηδέν. Η περίπτωση A αντιστοιχεί σε αδιαβατική ανύψωση, η οποία είναι μια εξιδανίκευση διεργασία δεδομένου ότι το έργο στη φύση δεν αφαιρείται από το σύστημα. Το έργο $w_{12} = 1710\text{J/kg}$ αντιστοιχεί στο CAPE.

Μη αναστρέψιμη περίπτωση B

Στη μη αναστρέψιμη περίπτωση B, το MPI είναι $98,48\text{kPa}$, και η ένταση είναι $2,52\text{kPa}$. Η εντροπία του αέρα αυξάνεται από τα $256,7$ στα $264,4\text{J/kg}$ καθώς η κινητική ενέργεια καταναλώνεται στη μη-αναστρέψιμη διαδικασία 1-2. Η ευαισθησία είναι υψηλότερη από ό,τι στην αναστρέψιμη περίπτωση A. Αύξηση της SAT κατά 1°C με σταθερή αναλογία ανάμιξης αυξάνει την ένταση κατά $0,35\text{kPa}$. Αύξηση της SAU κατά 1% με σταθερή SAT αυξάνει την ένταση κατά $0,16\text{kPa}$. Αύξηση της SAT κατά 1°C με σταθερή SAU αυξάνει την ένταση κατά $1,13\text{kPa}$. Η μη αναστρεψιμότητα αυξάνει την ένταση κατά 30% . Το διαχεόμενο έργο $w_x = 2.232\text{J/kg}$ είναι 30% μεγαλύτερο από το έργο στην αναστρέψιμη περίπτωση. Η ταχύτητα του αέρα στην έξοδο του περιορισμού αυξάνει κατά 14% . Το συμπέρασμα αυτό συνάδει με αυτά των Bister και Emanuel, (1998), οι οποίοι χρησιμοποίησαν αριθμητικά μοντέλα για να δείξουν ότι διαχεόμενη θερμότητα αυξάνουν τη μέγιστη ταχύτητα του ανέμου σε τυφώνες κατά 20% . Υποστήριξαν ότι το μεγαλύτερο μέρος της διαχεόμενης θέρμανσης λαμβάνει χώρα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα κοντά στην ακτίνα του μέγιστου ανέμου. Η διεργασία σταθερής ενθαλπίας 1-2 δεν πρέπει να έχει ένα μόνο περιορισμό, οι διεργασίες αδιαβατικής διάχυσης είναι συνήθως διεργασίες σταθερής ενθαλπίας. Εκεί θα μπορούσαν να υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί στον αγωγό οπότε η κινητική ενέργεια στην έξοδο του κάθε περιορισμού θα ήταν μόνο μέρος της συνολικής κινητικής ενέργειας. Η κινητική ενέργεια στην έξοδο του περιορισμού δίνει μια καλή ένδειξη τη συνολική μηχανική ενέργεια που διαχέεται, αλλά η διαχεόμενη κινητική ενέργεια δεν προσφέρει γενικά μια καλή ένδειξη της ενέργειας διαχέεται σε μια διεργασία σταθερής ενθαλπίας, διότι η μηχανική ενέργεια μπορεί να διαχέεται σε στάδια. Ο κινητική ενέργεια στην έξοδο του περιορισμού είναι ίση με τη μείωση της ενθαλπίας κατά την διάρκεια ισεντροπικής εκτόνωσης από P_1 σε P_2 . Η κατάσταση x μπορεί να θεωρηθεί ως μία ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ των καταστάσεων 1 και 2, όπου η κινητική ενέργεια δεν έχει διαχυθεί ακόμα.

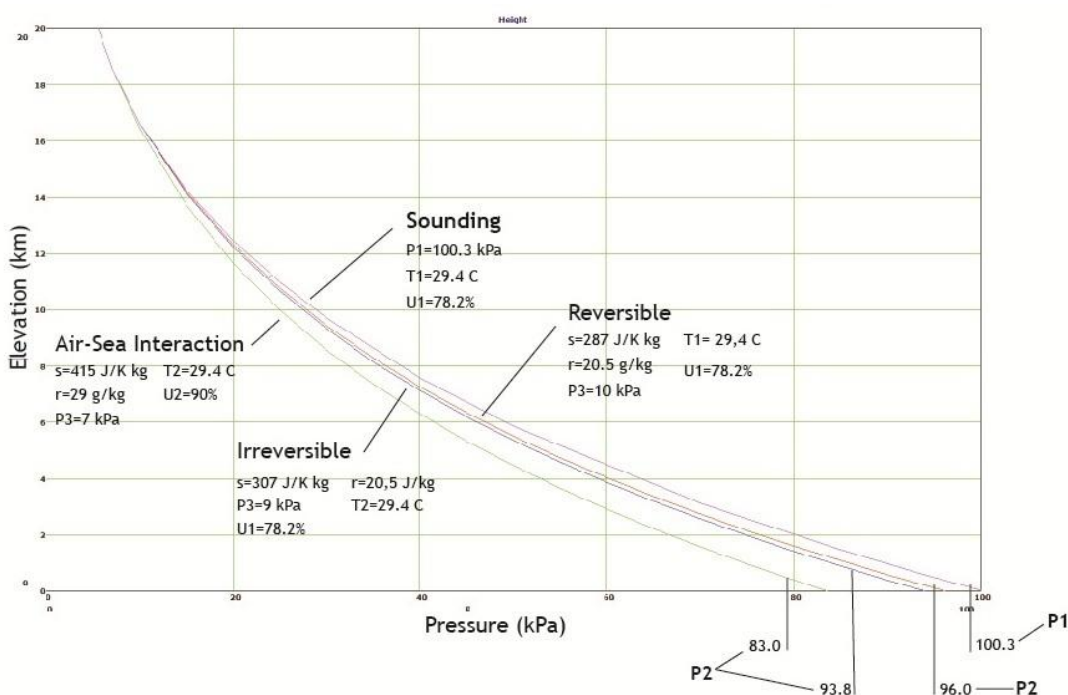
Ιδιότητες Αέρα	Βάση	U=Ub+5%	T=Tb+1K
SST (C)	28	28	29
P ₁ (kPa)	101.0	101.0	101.0
SAT=T ₁ (C)	27.0	27.0	28.0
T ₁ (K)	300.15	300.15	301.15
U ₁ (%)	80	80	80
r ₁ (g/kg)	18.18	18.18	19.31
μ ₁ =h ₁ (J/kg)	73485	73485	77422
s ₁ (J/kgK)	256.7	256.7	269.9
MPI = P ₂ (kPa)	93.22	91.21	90.29
T ₂ (K)	298.50	300.15	301.15
r ₂ (g/kg)	22.22	24.00	24.41
U ₂ (%)	90	95	90
μ ₂ =h ₂ (J/kg)	83807	88330	90446
s ₂ (J/kgK)	315.2	336.9	346.9
P ₃ (kPa)	10.0	10.0	10.0
T ₃ (K)	201.69	206.48	208.59
r ₃ (g/kg)	22.22	24.00	24.41
z ₃ (m)	16600	16600	16600
h ₃ (J/kg)	-82488	-78252	-76206
μ ₃ =h ₃ +gz ₃ (1+r)	83807	88330	90446
s ₃ (J/kgK)	315.2	336.9	346.9
Έργο (J/kg)			
Δh ₂₃ =h ₂ -h ₃	166295	166582	166652
Δgz ₂₃ =gz(1+r)	166295	166582	166652
w ₂₃	0	0	0
w _x	7074	8997	9909
Δw _x	-	1923	2835
Ταχύτητα (m/s)			
v _x	58.5	66.8	92.0
Δv _x (%)	-	12.8	18.4
Μείωση Πίεσης Βάσης			
Hl=ΔP ₁₂ (kPa)	1.94	2.52	4.71
ΔP ₂	-	2.01	2.93

Πίνακας 10: Υπολογισμός του MPI και της πτώσης πίεσης στη βάση για ανύψωση στο επίπεδο των 10kPa για την περίπτωση C. [25]

Αλληλεπίδραση αέρα-θάλασσας περίπτωση C

Το επίπεδο ουδέτερης άνωσης για τον αέρα, που πλησιάζει ισορροπία με το νερό στην μειωμένη πίεση επιφάνειας, είναι πιο κοντά στο 10kPa από τα 20kPa. Το γεωδυναμικό ύψος των 10kPa σε τροπικό περιοχές είναι συνήθως 16.600m. Ο Πίνακας 9 δείχνει την πίεση βάσης όταν ο αέρας ανυψώνεται στο επίπεδο 20kPa, και ο Πίνακας 10 δείχνει την

πίεση βάσης όταν ο αέρας ανυψώνεται στο επίπεδο 10kPa. Για συνθήκες 27°C SAT και 90% σχετική υγρασία, η ένταση είναι 4.71kPa και 7,78kPa, όταν ο αέρας ανυψώνεται στο επίπεδο των 20kPa και των 10kPa αντίστοιχα. Ο Πίνακας 10 δείχνει ότι η ένταση στην περίπτωση αλληλεπίδρασης αέρα-θάλασσας είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στη θερμοκρασία επιφάνειας και την υγρασία. Αύξηση της SAT κατά 1°C με σταθερή σχετική υγρασία αυξάνει την ένταση κατά 2.9kPa. Αυξάνοντας την σχετική υγρασία, με σταθερή επιφανειακή θερμοκρασία αέρα, κατά 1% αυξάνει την ένταση κατά 0,4kPa. Η υψηλότερη ένταση στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης αέρος-θαλάσσης οφείλεται κυρίως στην γεγονός ότι για την ίδια θερμοκρασία και σχετική υγρασία ο αέρας συγκρατεί περισσότερους υδρατμούς σε χαμηλότερη πίεση. Ο διπλός περιορισμός που φαίνεται στο μοντέλο αέρα-θάλασσας για την περίπτωση αλληλεπίδρασης του Σχήματος 7c αντιπροσωπεύει το γεγονός ότι το έργο μπορεί να διαχέεται σε στάδια. Οι τιμές των ελάχιστων πιέσεων που παρατηρούνται σε ένα τυφώνα συμπίπτουν με τις τιμές του Πίνακα 10. Οι μέγιστες ταχύτητες σε ένα τυφώνα είναι χαμηλότερες από αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 10 επειδή το έργο διαχέεται σε στάδια, όπως ο αέρας συγκλίνει προς το μάτι του κυκλώνα. Για την περίπτωση $P_3=20\text{kPa}$, η κινητική ενέργεια στην έξοδο του περιορισμού είναι, $w_x=4230\text{J/kg}$, δηλαδή, 2,5 φορές η κινητική ενέργεια της αναστρέψιμης διεργασίας. Για τον αέρα που ανεβαίνει στο επίπεδο των 10kPa, η κινητική ενέργεια υπολογίζεται 7074J/kg με 27°C SAT και 9909J/kg για 28°C SAT.



Σχήμα 8: Διάγραμμα πίεσης προς την ανύψωση για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάζουμε.

Το Σχήμα 8 δείχνει την πίεση στο εσωτερικό του σωλήνα για τις τρεις περιπτώσεις και την πίεση περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα του ανερχόμενου αέρα ελήφθησαν με τιμές

συνθηκών βάσης: $P=100,3\text{kPa}$, $T=29,4\text{C}$, $U=78,2\%$. Το MPI είναι $93,8\text{kPa}$ για τη μη αναστρέψιμη διαδικασία και 96kPa για την αναστρέψιμη διαδικασία. Η μείωση της πίεσης βάσης υπολογίστηκε με τη χρήση των δύο θεωρητικών μεθόδων, υποθέτοντας πίεση στην κορυφή του σωλήνα 10kPa . Η άνωση του αέρα που ανυψώνεται στην κορυφή του σωλήνα ελέγχθηκε τότε και το ύψος κορυφής σωλήνα προσαρμόστηκε μέχρις ότου ο σωλήνας να φτάσει στο επίπεδο της ουδέτερης άνωσης. Το επίπεδο ουδέτερης άνωσης είναι 10kPa για την αναστρέψιμη περίπτωση, 9kPa για τη μη αναστρέψιμη περίπτωση, και 7kPa για την περίπτωση αλληλεπίδρασης αέρος-θαλάσσης. Η πίεση επιφάνειας στην περίπτωση αλληλεπίδρασης αέρος-θαλάσσης είναι 83kPa . Ο υπολογισμός της έντασης γίνεται με δεδομένο ότι το συμπυκνωμένο νερό παγώνει και δεν διαχωρίζεται από τον αέρα, πραγματικά αδιαβατική εκτόνωση. Ο διαχωρισμός του νερού από τον αέρα, ψευδώς αδιαβατική διαστολή, έχει μικρή επίδραση στην ένταση. Περισσότερη μηχανική ενέργεια παράγεται σε πραγματικά αδιαβατική εκτόνωση, διότι περισσότερη θερμότητα μεταφέρεται από το συμπυκνωμένο νερό στον αέρα, αλλά τελικά η πρόσθετη ενέργεια απαιτείται για την ανύψωση του νερού επομένως η ένταση δεν αυξάνει σημαντικά. [25]

MPI_Z

[STANDARD FUNCTIONS]

by: L.Michaud, Nov 99.

Calculate Maximum Potential Intensity (MPI), ie Minimum Eyewall Surface Pressure

This program uses standard heights for the 20 and 10 kPa surfaces instead of full sounding.

Enter the standard height in gpm at the upper level.

The standard height of the 20 kPa surface is 12400 m.

The standard height of the 10 kPa surface is 16600 m.

Set P3 and Z3 to the appropriate values:

P3 := 20

Z3 := 12400

Enter the SST in Degree C:

SST := 28

Calculate the SST in degrees K:

SSTK := SST + T0

SSTK = 301.15

Calculate air temperature in K as 1 K less than the SST:

$$T1 := SSTK - 1$$

$$T1 = 300.15$$

Enter base pressure:

$$P1 := 101$$

Enter Base Relative Humidity for reversible and irreversible cases:

$$U1 := 80$$

Enter Base Relative Humidity for Air-Sea Interaction case:

$$U2 := 90$$

Calculate mixing ratio of the surface air:

$$M1 := fMVS(P1, T1) \cdot \frac{U1}{100}$$

$$M1 \cdot 1000 = 18.18$$

Calculate the entropy of the surface air:

$$S1 := fST3(P1, T1, M1)$$

$$S1 = 256.71$$

Case 1 reversible expansion - Letter "A" designator.

Enter two guesses for eyewall base pressure:

$$PA2_1 := 100$$

$$PA2_2 := PA2_1 - 2$$

Calculate the properties of the rising air for the two guesses.

Calculate the temperature of the rising air at P2 based on isentropic expansion:

$$TA2 := \overrightarrow{fTSOL}(S1, PA2, M1)$$

$$TA2 = \begin{pmatrix} 299.3 \\ 297.59 \end{pmatrix}$$

Calculate the enthalpy of the rising air at P2:

$$HA2 := \overrightarrow{fHT3}(PA2, TA2, M1)$$

$$HA_2 = \begin{pmatrix} 7.26 \times 10^4 \\ 7.08 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Calculate the temperature of the rising air at P3 based on isentropic expansion:

$$TA_3 := \overrightarrow{fTSOL}(S1, P3, M1)$$

$$TA_3 = 228.5$$

Calculate the enthalpy of the rising air at P3:

$$HA_3 := \overrightarrow{fHT3}(P3, TA_3, M1)$$

$$HA_3 = -5.2 \times 10^4$$

Calculate the static energy of the rising air at P3:

$$\sigma A_3 := \overrightarrow{f\sigma 4}(P3, TA_3, M1, Z3)$$

$$\sigma A_3 = 7.18 \times 10^4$$

Calculate the work of buoyancy from the reduction in the static energy of the rising air:

$$WA := (HA_2 - \sigma A_3)$$

$$WA = \begin{pmatrix} 829.64 \\ -951.66 \end{pmatrix}$$

Calculate the pressure P2 required to make the work zero:

$$MPL_A := PA_{21} - (PA_{21} - PA_{22}) \cdot \left[\frac{WA_1}{(WA_1 - WA_2)} \right]$$

$$MPL_A = 99.07$$

Calculate base pressure reduction:

$$HI_A := P1 - MPL_A$$

$$HI_A = 1.93$$

Calculate the virtual temperature of the rising air at P3 to check that the air is buoyant:

$$fTV3(P3, TA_3, M1) = 224.51$$

Case 2 Irreversible expansion - Letter "B" designator.

Enter two guesses for eyewall base pressure:

$$PB2_1 := 99$$

$$PB2_2 := PB2_1 - 2$$

Calculate the properties of the rising air for the two guesses.

Calculate the entropy of the rising air at P2, based on constant enthalpy, $T_2=T_1$:

$$SB2 := \overrightarrow{fST3}(PB2, T1, M1)$$

$$SB2 = \begin{pmatrix} 262.62 \\ 268.65 \end{pmatrix}$$

Calculate the enthalpy of the rising air at P2:

$$HB2 := \overrightarrow{fHT3}(PB2, T1, M1)$$

$$HB2 = \begin{pmatrix} 7.35 \times 10^4 \\ 7.35 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Calculate the temperature of the rising air at P3, based on constant entropy expansion:

$$TB3 := \overrightarrow{fTSOL}(SB2, P3, M1)$$

$$TB3 = \begin{pmatrix} 229.71 \\ 230.93 \end{pmatrix}$$

Calculate the enthalpy of the rising air at P3:

$$HB3 := \overrightarrow{fHT3}(P3, TB3, M1)$$

$$HB3 = \begin{pmatrix} -5.06 \times 10^4 \\ -4.92 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Calculate the static energy of the rising air at P3:

$$\sigma B3 := \overrightarrow{f\sigma 4}(P3, TB3, M1, Z3)$$

$$\sigma B3 = \begin{pmatrix} 7.31 \times 10^4 \\ 7.45 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Calculate the work of buoyancy from the reduction in the static energy of the rising air.

$$WB := (HB2 - \sigma B3)$$

$$WB = \begin{pmatrix} 356.98 \\ -1.03 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Calculate the pressure P2 required to make the work zero:

$$MPL_B := PB2_1 - (PB2_1 - PB2_2) \cdot \left[\frac{WB_1}{(WB_1 - WB_2)} \right]$$

$$MPL_B = 98.49$$

Calculate base pressure reduction:

$$HI_B := P1 - MPL_B$$

$$HI_B = 2.51$$

Calculate the virtual temperature of the rising air at P3 and check that it is buoyant.

$$SB := fST3(MPL_B, T1, M1)$$

$$SB = 264.15$$

$$T3 := fTSOL(SB, P3, M1)$$

$$T3 = 230.02$$

$$fTV3(P3, T3, M1) = 226.01$$

Case 3 Irreversible expansion - Letter "C" designator.

Enter two guesses for eyewall base pressure:

$$PC2_1 := 97$$

$$PC2_2 := PC2_1 - 2$$

Calculate the properties of the rising air for the two guesses.

Calculate surface air mixing ratio:

$$MC2 := \overrightarrow{\left(fMVS(PC2, T1) \cdot \frac{U2}{100} \right)}$$

$$MC2 \cdot 1000 = \begin{pmatrix} 21.32 \\ 21.79 \end{pmatrix}$$

Calculate air properties at P2:

$$SC2 := \overrightarrow{fST3(PC2, T1, MC2)}$$

$$SC2 = \begin{pmatrix} 295.7 \\ 305.89 \end{pmatrix}$$

$$HC2 := \overrightarrow{fHT3(PC2, T1, MC2)}$$

$$HC2 = \begin{pmatrix} 8.15 \times 10^4 \\ 8.27 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Calculate air properties at P3:

$$TC3 := \overrightarrow{fTSOL(SC2, P3, MC2)}$$

$$TC3 = \begin{pmatrix} 237.21 \\ 239.25 \end{pmatrix}$$

$$HC3 := \overrightarrow{fHT3(P3, TC3, MC2)}$$

$$HC3 = \begin{pmatrix} -4.3 \times 10^4 \\ -4.06 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Calculate static energy at P3:

$$\sigma C3 := \overrightarrow{f\sigma 4(P3, TC3, MC2, Z3)}$$

$$\sigma C3 = \begin{pmatrix} 8.11 \times 10^4 \\ 8.35 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Calculate the work for the two guesses:

$$WC := (HC2 - \sigma C3)$$

$$WC = \begin{pmatrix} 448.4 \\ -822.06 \end{pmatrix}$$

Calculate the pressure P2 required to make the work zero:

$$MPL_C := PC2_1 - (PC2_1 - PC2_2) \cdot \left[\frac{WC_1}{(WC_1 - WC_2)} \right]$$

$$MPL_C = 96.29$$

Calculate base pressure reduction:

$$HL_C := P1 - MPL_C$$

$$HL_C = 4.71$$

Calculate the virtual temperature of the rising air at P3 to check that it is buoyant.

$$MC2X := fMVS(MPI_C, T1) \cdot \frac{U2}{100}$$

$$MC2X \cdot 1000 = 21.48$$

$$SC := fST3(MPI_C, T1, MC2X)$$

$$SC = 299.26$$

$$TC3 := fTSOL(SC, P3, MC2X)$$

$$TC3 = 237.93$$

$$fTV3(P3, TC3, MC2X) = 233.18$$

SUMMARY:

$$SST = 28, T1 - T0 = 27$$

$$P1 = 101$$

$$P3 = 20$$

CASE	MPI Maximum Potential Intensity	HI Hurricane Intensity
Reversible	MPI_A = 99.07	HI_A = 1.93
Irreversible	MPI_B = 98.49	HI_B = 2.51
Air-Sea Inter-action	MPI_C = 96.29	HI_C = 4.71

MPI_S

[STANDARD FUNCTIONS]

by: L.Michaud, Sept 99.

Sounding analysis for calculating Hurricane Maximum Potential Intensity.

Fetch and display sounding data.

Ending α denotes property of the parcel at its initial location.

Fetch the Willis Island 17 Jan 99 00Z sounding from file.

Sounding Pressure (kPa):

$$P_{\alpha} := \frac{\mathbf{SDAT}^{\langle 1 \rangle}}{10}$$

Sounding Level (m):

$$\mathbf{ZW} := \mathbf{SDAT}^{\langle 2 \rangle}$$

Sounding Temperature (C):

$$\mathbf{TC}_{\alpha} := \mathbf{SDAT}^{\langle 3 \rangle}$$

Sounding Dew Point (C):

$$\mathbf{TD}_{\alpha} := \mathbf{SDAT}^{\langle 4 \rangle}$$

Sounding Realtive Humidity (%):

$$\mathbf{UW} := \mathbf{SDAT}^{\langle 5 \rangle}$$

Sounding Mixing Ratiol (g/kg):

$$\mathbf{MW} := \mathbf{SDAT}^{\langle 6 \rangle}$$

$P_{\alpha} =$	100.3 100 94.2 85 70 50 40 30 25 20 15 10 7 5	$TC_{\alpha} =$	29.4 29 23.6 19.4 11.8 -4.7 -14.1 -28.5 -39.5 -52.7 -68.7 -83.3 -80.1 -70.3	$TD_{\alpha} =$	25.2 24.6 22 15.3 7.9 -7.3 -18.4 -32.9 -48.5 -64.7 -72.2 -83.8 -80.7 -71.8
----------------	--	-----------------	--	-----------------	---

Calculate sounding properties:

$$\mathbf{im} := \mathbf{last}(\mathbf{P}\alpha)$$

$$\mathbf{i} := \mathbf{1}.. \mathbf{im}$$

$$\mathbf{jm} := \mathbf{last}(\mathbf{P}\alpha) - \mathbf{1}$$

$$\mathbf{j} := \mathbf{1}.. \mathbf{jm}$$

Temperature in degree Kelvin:

$$\mathbf{T}\alpha := \mathbf{TC}\alpha + \mathbf{T0}$$

Mixing Ratio from dew point:

$$\mathbf{M}\alpha := \overrightarrow{\mathbf{fMVL}(\mathbf{P}\alpha, \mathbf{TD}\alpha + \mathbf{T0})}$$

Entropy:

$$\mathbf{S}\alpha := \overrightarrow{(\mathbf{fST3}(\mathbf{P}\alpha, \mathbf{T}\alpha, \mathbf{M}\alpha))}$$

Enthalpy:

$$\mathbf{H}\alpha := \overrightarrow{(\mathbf{fHT3}(\mathbf{P}\alpha, \mathbf{T}\alpha, \mathbf{M}\alpha))}$$

Relative Humidity from mixing ratio:

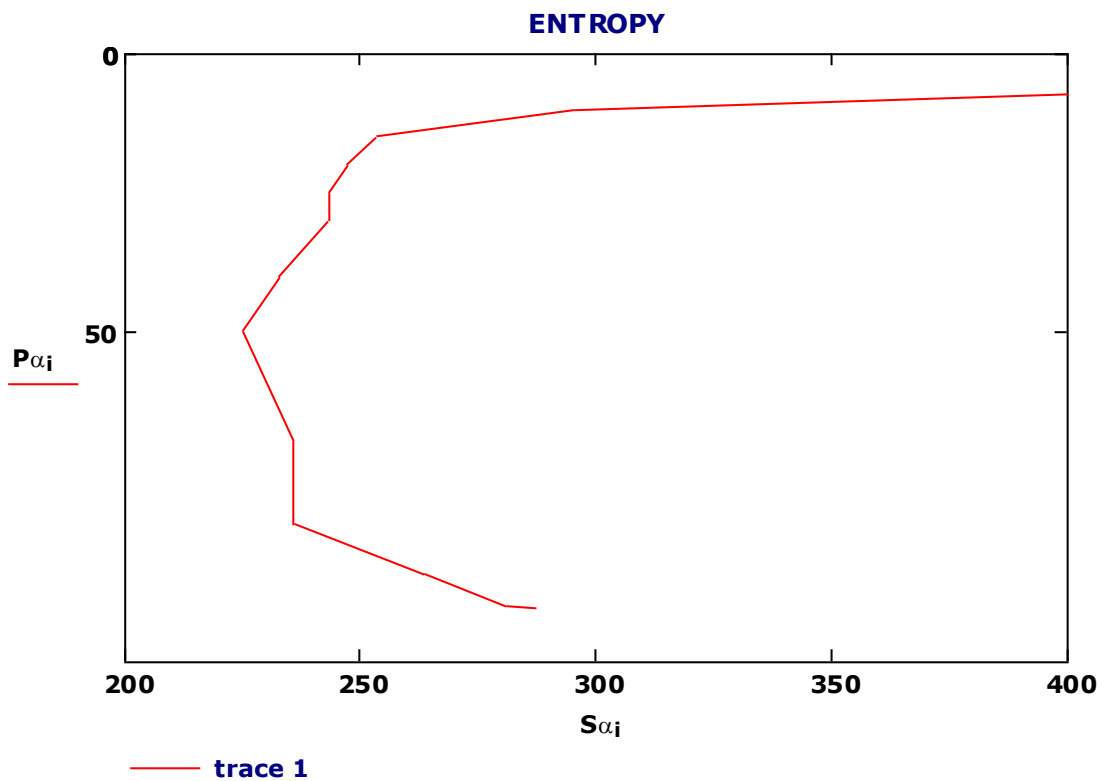
$$\mathbf{U}\alpha := \overrightarrow{\mathbf{fU3}(\mathbf{P}\alpha, \mathbf{T}\alpha, \mathbf{M}\alpha)}$$

Virtual Temperature:

$$\mathbf{TV}\alpha := \overrightarrow{\mathbf{fTV}(\mathbf{T}\alpha, \mathbf{M}\alpha)}$$

$P_{\alpha_i} =$	$T_{\alpha_i} =$	$M_{\alpha_i} \cdot 1000 =$	$MW_i =$
100.3	302.55	20.5	20.52
100	302.15	19.82	19.84
94.2	296.75	17.93	17.94
85	292.55	12.97	12.97
70	284.95	9.6	9.6
50	268.45	4.43	4.43
40	259.05	2.25	2.24
30	244.65	0.8	0.8
25	233.65	0.19	0.19
20	220.45	0.03	0.03
15	204.45	0.02	0.01
10	189.85	0	0
7	193.05	0.01	0
5	202.85	0.05	0.02
$S_{\alpha_i} =$	$H_{\alpha_i} =$	$P_{\alpha_i} =$	$U_{\alpha_i} =$
287.04	81918.83	100.3	77.5
280.7	79760.82	100	76.51
263.38	69338.59	94.2	90.5
235.64	52389.95	85	76.71
235.49	36082.25	70	76.64
225.09	6316.1	50	85.73
232.65	-8608.61	40	80.11
243.47	-26669.52	30	87.13
243.16	-39225.53	25	56.06
247.04	-52867.51	20	37.8
253.67	-68991.75	15	120.5
295.49	-83686.03	10	209.36
414.7	-80465.87	7	200.45
561.33	-70565.29	5	161.95

$UW_i =$	(78)	$TV_{\alpha_i} =$	(306.24)
	77		305.72
	91		299.93
	77		294.83
	77		286.6
	82		269.17
	70		259.4
	66		244.77
	38		233.68
	22		220.45
	30		204.45
	40		189.85
	40		193.05
	40		202.86



Calculate lapse rate and heights:

$$\alpha_1 := 0$$

$$\alpha_{j+1} := f\alpha(P_{\alpha_j}, P_{\alpha_{j+1}}, TV_{\alpha_j}, TV_{\alpha_{j+1}})$$

$$\mathbf{Z}_{j+1} := -f\mathbf{Z}(\mathbf{P}_{\alpha_j}, \mathbf{P}_{\alpha_{j+1}}, \mathbf{TV}_{\alpha_j}, \mathbf{TV}_{\alpha_{j+1}})$$

$$\mathbf{ZC}_1 := \mathbf{0}$$

$$\mathbf{ZC}_{j+1} := \mathbf{Z}_{j+1} + \mathbf{ZC}_j$$

$$\mathbf{ZW} - 9 = \begin{pmatrix} 0 \\ 26 \\ 555 \\ 1450 \\ 3099 \\ 5831 \\ 7561 \\ 9691 \\ 10961 \\ 12451 \\ 14241 \\ 16571 \\ 18581 \\ 20561 \end{pmatrix} \alpha \cdot (-1000) = \begin{pmatrix} 0 \\ -19.56 \\ -10.93 \\ -5.7 \\ -4.98 \\ -6.37 \\ -5.65 \\ -6.89 \\ -8.68 \\ -8.91 \\ -8.94 \\ -6.24 \\ 1.6 \\ 5.03 \end{pmatrix} \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 0 \\ 26.85 \\ 529.96 \\ 895.14 \\ 1653.17 \\ 2737.8 \\ 1727.19 \\ 2123.59 \\ 1277.31 \\ 1483.69 \\ 1789.38 \\ 2340.38 \\ 2000.1 \\ 1950.54 \end{pmatrix} \mathbf{ZC} = \begin{pmatrix} 0 \\ 26.85 \\ 556.81 \\ 1451.95 \\ 3105.11 \\ 5842.91 \\ 7570.1 \\ 9693.69 \\ 10971 \\ 12454.69 \\ 14244.07 \\ 16584.44 \\ 18584.54 \\ 20535.08 \end{pmatrix}$$

CALCULATE THE WORK WHEN SURFACE AIR IS RAISED ISENTROPICALLY

The base pressure reduction for REVERSIBLE upflow can be calculated directly without using the two guess method.

The direct calculation will be used first so that the results of the two guess method can be compared to its results later.

The direct method consists of the following steps:

1. Calculate the properties of a parcel of surface air rising isentropically.
2. Calculate the static energy (σ) of the rising parcel.
3. Calculate the work of buoyancy (WT) from the reduction in the parcel's static energy.
4. Calculate the reduction in temperature corresponding to the kinetic energy.
5. Calculate the pressure reduction corresponding to the temperature reduction.

Calculate expanded air properties.

Ending p denotes property of the parcel at its initial location.

Ending ω denotes property of the parcel after it is moved.

Enter temperature and pressure of the raised parcel are base sounding base condition plus a delta to permit sensitivity analysis.

$$\mathbf{P}_\rho := \mathbf{P}_{\alpha 1}$$

$$\mathbf{T}_\rho := \mathbf{T}_{\alpha 1} + \mathbf{0}$$

$$\mathbf{M}_\rho := \mathbf{M}_{\alpha 1} + \mathbf{0}$$

Parcel Entropy:

$$\mathbf{S}_\rho := \mathbf{fST3}(\mathbf{P}_\rho, \mathbf{T}_\rho, \mathbf{M}_\rho)$$

$$\mathbf{S}_\rho = \mathbf{287.04}$$

Parcel initial relative humidity:

$$\mathbf{U}_\rho := \mathbf{fU3}(\mathbf{P}_\rho, \mathbf{T}_\rho, \mathbf{M}_\rho)$$

$$\mathbf{U}_\rho = \mathbf{77.5}$$

Parcel Temperature:

$$\mathbf{T}_\omega := \mathbf{fTSOL}(\mathbf{S}_\rho, \mathbf{P}_\alpha, \mathbf{M}_\rho)$$

$$\mathbf{TC}_\omega := \mathbf{T}_\omega - \mathbf{T0}$$

Parcel water content in vapor phase:

$$\mathbf{MV}_\omega := (\mathbf{fMV3}(\mathbf{P}_\alpha, \mathbf{T}_\omega, \mathbf{M}_\rho))$$

Parcel water content in liquid phase:

$$\mathbf{ML}_\omega := (\mathbf{fML3}(\mathbf{P}_\alpha, \mathbf{T}_\omega, \mathbf{M}_\rho))$$

Parcel water content in ice phase:

$$\mathbf{MI}_\omega := (\mathbf{fMI3}(\mathbf{P}_\alpha, \mathbf{T}_\omega, \mathbf{M}_\rho))$$

Parcel Enthalpy:

$$\mathbf{H}_\omega := (\mathbf{fHT3}(\mathbf{P}_\alpha, \mathbf{T}_\omega, \mathbf{M}_\rho))$$

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{H}_{\omega_i} = \begin{pmatrix} 81918.83 \\ 81650.22 \\ 76339.88 \\ 67350.2 \\ 50738.67 \\ 23105 \\ 5531.46 \\ -16328.09 \\ -29559.83 \\ -45051.24 \\ -63799.12 \\ -87890.62 \\ -106986.12 \\ -123367.57 \end{pmatrix} \\
 \\
 \mathbf{MV}_{\omega_i} \cdot 1000 = \begin{pmatrix} 20.5 \\ 20.5 \\ 20.47 \\ 18.29 \\ 14.42 \\ 8.59 \\ 5.85 \\ 2.89 \\ 1.47 \\ 0.51 \\ 0.09 \\ 0.01 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 \\
 \mathbf{TC}_{\omega_i} = \begin{pmatrix} 29.4 \\ 29.14 \\ 24.12 \\ 20.63 \\ 13.9 \\ 1.51 \\ -5.87 \\ -16.88 \\ -25.68 \\ -37.85 \\ -54.62 \\ -77.39 \\ -95.6 \\ -111.24 \end{pmatrix} \\
 \\
 \mathbf{ML}_{\omega_i} \cdot 1000 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.03 \\ 2.21 \\ 6.08 \\ 11.91 \\ 6.05 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 \\
 \mathbf{T}_{\omega_i} = \begin{pmatrix} 302.55 \\ 302.29 \\ 297.27 \\ 293.78 \\ 287.05 \\ 274.66 \\ 267.28 \\ 256.27 \\ 247.47 \\ 235.3 \\ 218.53 \\ 195.76 \\ 177.55 \\ 161.91 \end{pmatrix} \\
 \\
 \mathbf{MI}_{\omega_i} \cdot 1000 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 8.61 \\ 17.61 \\ 19.03 \\ 19.99 \\ 20.41 \\ 20.5 \\ 20.5 \\ 20.5 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

$$P_{\alpha_j} = \begin{pmatrix} 100.3 \\ 100 \\ 94.2 \\ 85 \\ 70 \\ 50 \\ 40 \\ 30 \\ 25 \\ 20 \\ 15 \\ 10 \\ 7 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Calculation work produced when an air mass is raised.

Static Energy of the initial parcel:

$$\sigma_p := f_{\mu 4}(P_p, T_p, M_p, ZC_1)$$

$$\sigma_p = 81918.83$$

Static Energy of the raised parcel:

$$\sigma_{\omega} := \overrightarrow{f_{\mu 4}(P_{\alpha}, T_{\omega}, M_p, ZC)}$$

Work of Buoyancy:

$$WK := (\sigma_p - \sigma_{\omega})$$

Potential Energy of Condensed Water:

$$WP := [(M_p - M_{V_{\omega}}) \cdot G \cdot ZC]$$

Total Work:

$$WT := (WK + WP)$$

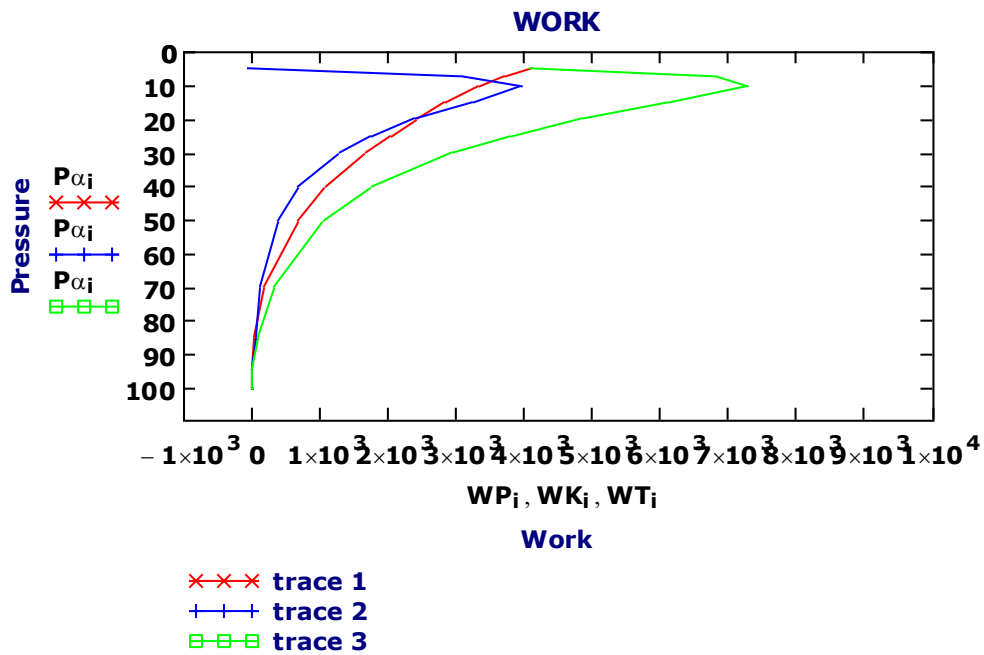
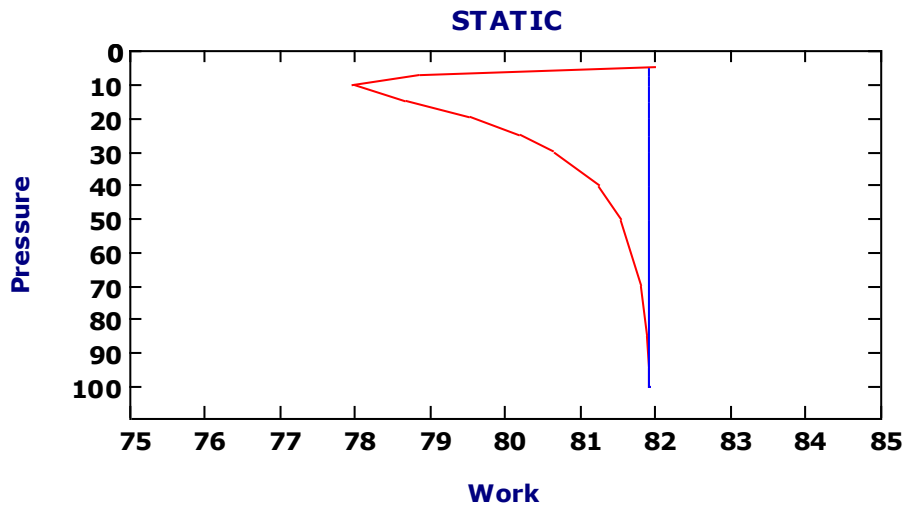
$\sigma_i =$	(81918.83)	$WP_i =$	(0)	$WK_i =$	(0)	$WT_i =$	(0)
	81918.71		(0)		(0.12)		(0.12)
	81908.48		(0.17)		(10.35)		(10.53)
	81870.98		(31.49)		(47.84)		(79.34)
	81792.6		(185.13)		(126.22)		(311.36)
	81539.37		(681.95)		(379.46)		(1061.41)
	81239.32		(1087.12)		(679.51)		(1766.63)
	80617.61		(1673.16)		(1301.22)		(2974.38)
	80160.07		(2045.82)		(1758.76)		(3804.57)
	79506.95		(2440.32)		(2411.88)		(4852.2)
	78654.47		(2849.09)		(3264.36)		(6113.45)
	77968.85		(3331.09)		(3949.98)		(7281.07)
	78876.14		(3733.69)		(3042.69)		(6776.38)
	82001.87)		(4125.62)		(-83.04)		(4042.58)
$ZC_i =$	(0)	$P\alpha_i =$	(100.3)				
	26.85		(100)				
	556.81		(94.2)				
	1451.95		(85)				
	3105.11		(70)				
	5842.91		(50)				
	7570.1		(40)				
	9693.69		(30)				
	10971		(25)				
	12454.69		(20)				
	14244.07		(15)				
	16584.44		(10)				
	18584.54		(7)				
	20535.08)		(5)				

The work of buoyancy is maximum ($WK=3950$ J/kg) when the surface air is lifted to the 10 kPa level.

For this level the potential energy of the condensed water $WP=3331$ J/kg, and the total work $WT=7281$ J/kg.

The sounding indicates a CAPE of 1450 J/kg. The work of buoyancy is considerably higher than the CAPE because CAPE based on the average properties of a 5 kPa layer and because CAPE is calculated based on pseudo adiabatic expansion without the condensed water

freezing. The work which can be produced by raising surface air is generally higher than indicated by CAPE.



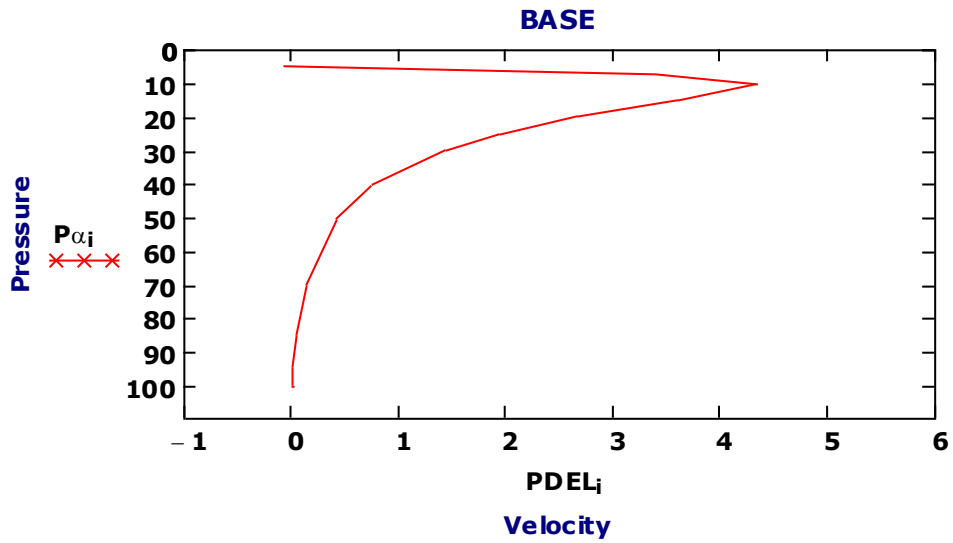
Velocity and Base Pressure Reduction:

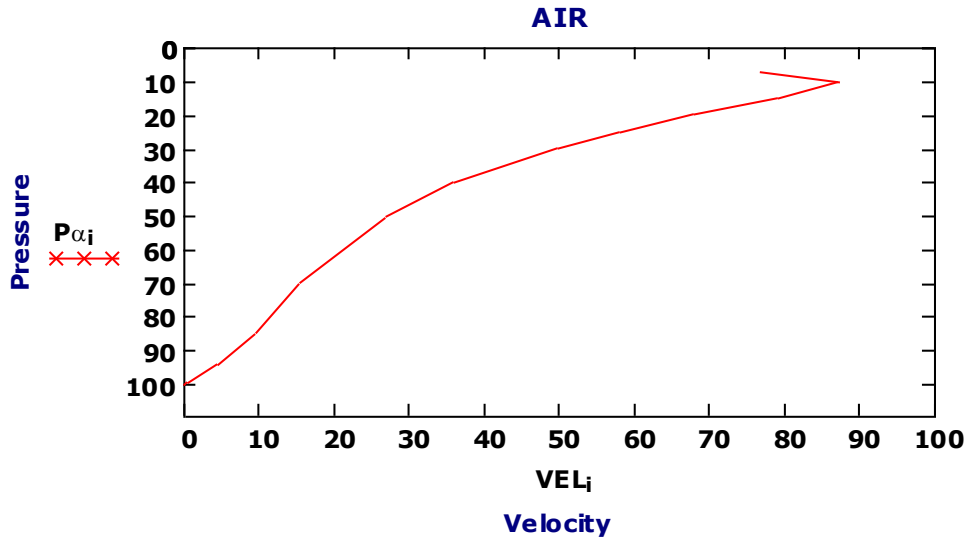
$$VEL := \left(\frac{\sqrt{2 \cdot WK}}{1 + M_{\alpha 1}} \right) \rightarrow$$

$$PBASE := \left[P_{\alpha 1} \cdot \left[\left(1 - \frac{WK}{f_{CPA}(M_{\alpha 1}) \cdot T_{\alpha 1}} \right)^{\frac{1}{f_{KA}(M_{\alpha 1})}} \right] \right] \rightarrow$$

$$PDEL := P_{\alpha 1} - PBASE$$

$P_{\alpha_i} =$	100.3	$P_{BASE_i} =$	100.3	$PDEL_i =$	0	$VEL_i =$	0
	100		100.3		0		0.47
	94.2		100.29		0.01		4.46
	85		100.25		0.05		9.59
	70		100.16		0.14		15.57
	50		99.88		0.42		26.99
	40		99.54		0.76		36.12
	30		98.85		1.45		49.99
	25		98.35		1.95		58.12
	20		97.63		2.67		68.06
	15		96.7		3.6		79.18
	10		95.95		4.35		87.1
	7		96.94		3.36		76.44
	5		100.39		-0.09		12.63i





Virtual Temperatures:

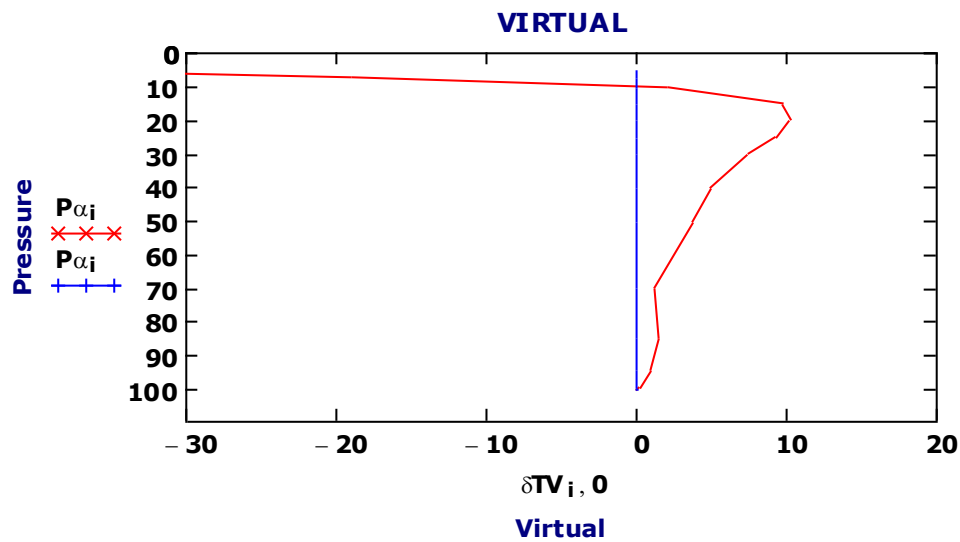
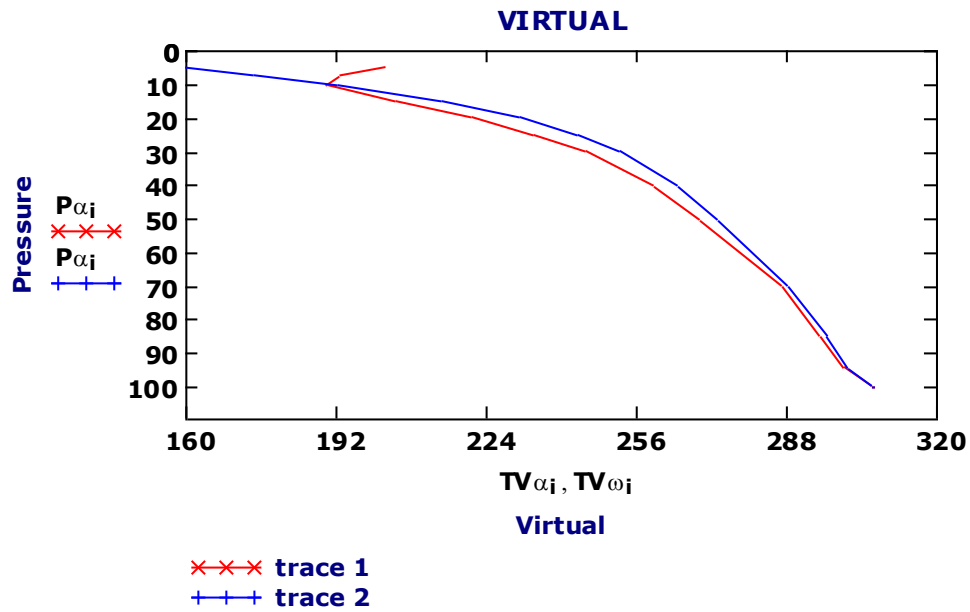
$$\mathbf{TV}_{\omega} := \overrightarrow{\text{fTV3}}(\mathbf{P}_{\alpha}, \mathbf{T}_{\omega}, \mathbf{M}_{\rho})$$

Virtual Temperature difference between parcel and environment:

$$\delta\mathbf{TV} := (\mathbf{TV}_{\omega} - \mathbf{TV}_{\alpha})$$

$\mathbf{P}_{\alpha_i} =$	100.3 100 94.2 85 70 50 40 30 25 20 15 10 7 5	$\mathbf{TV}_{\alpha_i} =$	306.24 305.72 299.93 294.83 286.6 269.17 259.4 244.77 233.68 220.45 204.45 189.85 193.05 202.86	$\mathbf{TV}_{\omega_i} =$	306.24 305.98 300.89 296.34 287.8 272.86 264.37 252.28 243.07 230.76 214.17 191.83 173.98 158.66	$\delta\mathbf{TV}_i =$	0 0.26 0.96 1.52 1.2 3.69 4.97 7.52 9.39 10.3 9.72 1.98 -19.07 -44.2
---------------------------	--	----------------------------	--	----------------------------	---	-------------------------	---

Virtual Temperature of Parcel and of Environment.



TWO GUESSES METHOD.

First recalculate the reversible case to verify that the two guess method gives results which agree with the above direct method.

Calculate MPI for reversible expansion case:

n := 12

P3 := P_{α_n}

P3 = 10

PBASE_n = 95.95

Case 1 reversible expansion - Letter "A" designator.

$$U_p = 77.5$$

Enter two guesses for eyewall base pressure:

$$M_p \cdot 1000 = 20.5$$

$$S_p = 287.04$$

$$PA_{2_1} := 97$$

$$PA_{2_2} := PA_{2_1} - 2$$

Calculate air properties at 2:

$$TA_2 := \overrightarrow{\text{fTsol}}(S_p, PA_2, M_p)$$

$$TA_2 = \begin{pmatrix} 299.68 \\ 297.91 \end{pmatrix}$$

$$HA_2 := \overrightarrow{\text{fHT3}}(PA_2, TA_2, M_p)$$

$$HA_2 = \begin{pmatrix} 78931.86 \\ 77086.01 \end{pmatrix}$$

Calculate air properties at 3:

$$TA_3 := \overrightarrow{\text{fTsol}}(S_p, P_3, M_p)$$

$$TA_3 = 195.76$$

$$HA_3 := \overrightarrow{\text{fHT3}}(P_3, TA_3, M_p)$$

$$HA_3 = -87890.62$$

$$\sigma_{A3} := \overrightarrow{\text{f}\mu_4}(P_3, TA_3, M_p, ZC_n)$$

$$\sigma_{A3} = 77968.85$$

Calculate the work for the two guesses:

$$WA := (HA_2 - \sigma_{A3})$$

$$WA = \begin{pmatrix} 963 \\ -882.84 \end{pmatrix}$$

Calculate the pressure P2 required to make the work zero.

$$\mathbf{MPI_A := PA2_1 - (PA2_1 - PA2_2) \cdot \left[\frac{WA_1}{(WA_1 - WA_2)} \right]}$$

$$\mathbf{MPI_A = 95.96}$$

Note agreement with direct method:

$$\mathbf{fTSQL(S_p, MPI_A, M_p) - T_0 = 25.61}$$

Calculate base pressure reduction, the Hurricane Intensity:

$$\mathbf{HI_A := P_p - MPI_A}$$

$$\mathbf{HI_A = 4.34}$$

Verify that the virtual temperature at P3 is higher than the sounding temperature:

$$\mathbf{fTV3(P3, TA3, M_p) = 191.83}$$

$$\mathbf{TV_{\alpha_n} = 189.85}$$

$$\mathbf{P3 = 10}$$

Case 2 Irreversible expansion - Letter "B" designator.

$$\mathbf{n := 12}$$

$$\mathbf{P3 := P_{\alpha_n}}$$

$$\mathbf{P3 = 10}$$

Enter two guesses for eyewall base pressure:

$$\mathbf{PB2_1 := 94}$$

$$\mathbf{PB2_2 := PB2_1 - 2}$$

Calculate air properties at 2:

$$\mathbf{SB2 := \overrightarrow{fST3(PB2, T_p, M_p)}}$$

$$\mathbf{SB2 = \begin{pmatrix} 306.28 \\ 312.65 \end{pmatrix}}$$

$$\mathbf{HB2 := \overrightarrow{fHT3(PB2, T_p, M_p)}}$$

$$\mathbf{HB2 = \begin{pmatrix} 81918.83 \\ 81918.83 \end{pmatrix}}$$

Calculate air properties at 3:

$$\mathbf{TB3} := \overrightarrow{\text{fTSOL}(\mathbf{SB2}, \mathbf{P3}, \mathbf{M}\rho)}$$

$$\mathbf{TB3} = \begin{pmatrix} 199.38 \\ 200.59 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{HB3} := \overrightarrow{\text{fHT3}(\mathbf{P3}, \mathbf{TB3}, \mathbf{M}\rho)}$$

$$\mathbf{HB3} = \begin{pmatrix} -84090.44 \\ -82815.17 \end{pmatrix}$$

$$\sigma\mathbf{B3} := \overrightarrow{\text{f}\mu\mathbf{4}(\mathbf{P3}, \mathbf{TB3}, \mathbf{M}\rho, \mathbf{ZC}_n)}$$

$$\sigma\mathbf{B3} = \begin{pmatrix} 81769.03 \\ 83044.3 \end{pmatrix}$$

Calculate the work for the two guesses:

$$\mathbf{WB} := (\mathbf{HB2} - \sigma\mathbf{B3})$$

$$\mathbf{WB} = \begin{pmatrix} 149.8 \\ -1125.47 \end{pmatrix}$$

Calculate the pressure P2 required to make the work zero:

$$\mathbf{MPI_B} := \mathbf{PB2}_1 - (\mathbf{PB2}_1 - \mathbf{PB2}_2) \cdot \left[\frac{\mathbf{WB}_1}{(\mathbf{WB}_1 - \mathbf{WB}_2)} \right]$$

$$\mathbf{MPI_B} = 93.77$$

$$\text{fU3}(\mathbf{MPI_B}, \mathbf{T}\rho, \mathbf{M}\rho) = 72.23$$

Calculate base pressure reduction:

$$\mathbf{HI_B} := \mathbf{P}\rho - \mathbf{MPI_B}$$

$$\mathbf{HI_B} = 6.53$$

Check the virtual temperature at P3

$$\mathbf{SB} := \text{fST3}(\mathbf{MPI_B}, \mathbf{T}\rho, \mathbf{M}\rho)$$

$$\mathbf{SB} = 307.02$$

$$\mathbf{T3} := \text{fTSOL}(\mathbf{SB}, \mathbf{P3}, \mathbf{M}\rho)$$

$$\mathbf{T3} = 199.52$$

$$\text{fTV3}(\mathbf{P3}, \mathbf{T3}, \mathbf{M}\rho) = 195.52$$

$$TV_{\alpha_n} = 189.85$$

Case 3 Irreversible expansion - Letter "C" designator.

$$n := 13$$

$$P3 := P_{\alpha_n}$$

$$P3 = 7$$

Enter two guesses for eyewall base pressure:

$$PC2_1 := 90$$

$$PC2_2 := PC2_1 - 2$$

$$U2 := 90$$

Calculate surface air mixing ratio:

$$MC2 := \overrightarrow{\text{fMVS}(PC2, T_p) \cdot \frac{U2}{100}}$$

$$MC2 \cdot 1000 = \begin{pmatrix} 26.66 \\ 27.3 \end{pmatrix}$$

Calculate air properties at 2:

$$SC2 := \overrightarrow{\text{fST3}(PC2, T_p, MC2)}$$

$$SC2 = \begin{pmatrix} 371.97 \\ 384.11 \end{pmatrix}$$

$$HC2 := \overrightarrow{\text{fHT3}(PC2, T_p, MC2)}$$

$$HC2 = \begin{pmatrix} 97661.79 \\ 99285.57 \end{pmatrix}$$

Calculate air properties at 3:

$$TC3 := \overrightarrow{\text{fTSOL}(SC2, P3, MC2)}$$

$$TC3 = \begin{pmatrix} 194.72 \\ 197.18 \end{pmatrix}$$

$$HC3 := \overrightarrow{\text{fHT3}(P3, TC3, MC2)}$$

$$\mathbf{HC3} = \begin{pmatrix} -92045.07 \\ -89742.16 \end{pmatrix}$$

Calculate static energy at 3:

$$\sigma_{C3} := \overrightarrow{f_{\mu 4}(P3, TC3, MC2, ZC_n)}$$

$$\sigma_{C3} = \begin{pmatrix} 94939.35 \\ 97358 \end{pmatrix}$$

Calculate the work for the two guesses:

$$\mathbf{WC} := (\mathbf{HC2} - \sigma_{C3})$$

$$\mathbf{WC} = \begin{pmatrix} 2722.44 \\ 1927.57 \end{pmatrix}$$

Calculate the pressure P2 required to make the work zero:

$$\mathbf{MPI_C} := \mathbf{PC2_1} - (\mathbf{PC2_1} - \mathbf{PC2_2}) \cdot \left[\frac{\mathbf{WC_1}}{(\mathbf{WC_1} - \mathbf{WC_2})} \right]$$

$$\mathbf{MPI_C} = 83.15$$

Calculate base pressure reduction:

$$\mathbf{HI_C} := P_{\rho} - \mathbf{MPI_C}$$

$$\mathbf{HI_C} = 17.15$$

Check the virtual temperature at P3:

$$\mathbf{MC2X} := \mathbf{fMVS}(\mathbf{MPI_C}, T_{\rho}) \cdot \frac{\mathbf{U2}}{100}$$

$$\mathbf{MC2X} \cdot 1000 = 28.97$$

$$\mathbf{SC} := \mathbf{fST3}(\mathbf{MPI_C}, T_{\rho}, \mathbf{MC2X})$$

$$\mathbf{SC} = 415.37$$

$$\mathbf{TC3} := \mathbf{fTSOL}(\mathbf{SC}, P3, \mathbf{MC2X})$$

$$\mathbf{TC3} = 203.62$$

$$\mathbf{fTV3}(P3, \mathbf{TC3}, \mathbf{MC2X}) = 197.89$$

$$\mathbf{TV}_{\alpha_n} = 193.05$$

Calculate the pressure versus level for the air in the tube:

Hydrostatic Base Pressure Calculation - Reversible case.

$$\underline{n} := 12$$

$$P_{\alpha n} = 10$$

$$ZC_n = 16584.44$$

$$PH := P_{\rho}$$

$$TH := T_{\rho}$$

$$MH := M_{\rho}$$

$$SH := fST3(PH, TH, MH)$$

$$SH = 287.04$$

$$PHH_1 := P_{\alpha n}$$

$$PHH_2 := PHH_1 + 5$$

$$\underline{m} := 3.. 20$$

$$PHH_m := \overrightarrow{[PHH_2 + 5 \cdot (m - 2)]}$$

$$PHH_{20} = 105$$

$$\underline{TH} := \overrightarrow{fTSOL(SH, PHH, MH)}$$

$$TVH := \overrightarrow{fTV3(PHH, TH, MH)}$$

$$UH := \overrightarrow{fU3(PHH, TH, MH)}$$

PHH =	10	195.76	191.83	404354.37
	15	218.53	214.17	22655.83
	20	235.3	230.76	4041.96
	25	247.47	243.07	1392.22
	30	256.27	252.28	709.83
	35	262.86	259.45	452.58
	40	267.28	264.37	350.63
	45	271.05	268.66	285.92
	50	274.66	272.86	238.63
	55	278.29	277.14	202.65
	60	281.51	281	176.76
	65	284.41	284.54	157.31
	70	287.05	287.8	142.2
	75	289.46	290.83	130.14
	80	291.7	293.67	120.29
	85	293.78	296.34	112.1
	90	295.73	298.87	105.19
	95	297.91	301.55	97.11
	100	302.29	305.98	78.46
	105	306.52	310.26	64.25

$$\mathbf{ZH_1 := ZC_n}$$

$$\mathbf{PHH_{18} = 95}$$

$$\mathbf{m := 1.. 19}$$

$$\mathbf{DHZ_m := fZ[PHH_m, PHH_{(m+1)}, TVH_m, TVH_{(m+1)}]}$$

$$\mathbf{ZH_{(m+1)} := ZH_m - DHZ_m}$$

$$\mathbf{PHH_{18} = 95}$$

$$\mathbf{ZH_{18} = 99.24}$$

	2408.49	16584.44	10
	1873.71	14175.96	15
	1548.13	12302.25	20
	1322.53	10754.12	25
	1155.22	9431.59	30
	1024.37	8276.37	35
	919.45	7252	40
	835.58	6332.55	45
	767.7	5496.97	50
DHZ =	711.23	4729.26	55
	662.94	4018.03	60
	621.17	3355.09	65
	584.66	2733.92	70
	552.47	2149.25	75
	523.86	1596.79	80
	498.26	1072.93	85
	475.43	574.67	90
	456.38	99.24	95
	440.33	-357.14	100
		-797.47	105

$$\text{TVH}_{18} = 301.55$$

$$\text{TVH}_0 := \text{TVH}_{18} + \text{ZH}_{18} \cdot \frac{G}{\text{CPA}}$$

$$\text{TVH}_0 = 302.52$$

$$\text{PH}_0 := \text{PHH}_{18} \cdot \left(\frac{\text{TVH}_0}{\text{TVH}_{18}} \right)^{\frac{1}{f_{KA}(\text{MH})}}$$

$$\text{PH}_0 = 96.08$$

Hydrostatic Base Pressure Calculation - Irreversible case.

$$\underline{n} := 12$$

$$P_{\alpha_n} = 10$$

$$\text{ZC}_n = 16584.44$$

$$\text{PJ} := \text{MPI}_B$$

TJ := T α_1

MJ := M α_1

SJ := fST3(PJ, TJ, MJ)

SJ = 307.02

PJ = 93.77

PHJ₁ := P α_n

PHJ₂ := PHH₁ + 5

m := 3.. 20

PHJ_m := [PHJ₂ + 5 · (m - 2)]

TJ := $\xrightarrow{\text{fTSOL}}(\text{SJ}, \text{PHJ}, \text{MJ})$

TVJ := $\xrightarrow{\text{fTV3}}(\text{PHJ}, \text{TJ}, \text{MJ})$

UJ := $\xrightarrow{\text{fU3}}(\text{PHJ}, \text{TJ}, \text{MJ})$

PHJ =	10	199.52	195.52	223082.27
	15	222.57	218.15	13567.55
	20	239.11	234.59	2661.86
	25	250.7	246.47	1009.05
	30	258.95	255.27	552.57
	35	264.82	261.75	380.1
	40	269.08	266.57	300.1
	45	272.77	270.86	247.23
	50	276.68	275.45	206.34
	55	280.18	279.65	177.48
	60	283.3	283.46	156.38
	65	286.11	286.95	140.32
	70	288.67	290.17	127.71
	75	291.03	293.18	117.55
	80	293.21	296	109.19
	85	295.25	298.65	102.19
	90	299.04	302.7	85.66
	95	303.68	307.39	68.44
	100	308.14	311.9	55.48
	105	312.45	316.26	45.55

$$\mathbf{ZJ}_1 := \mathbf{ZC}_n$$

$$\mathbf{PHJ}_{18} = 95$$

$$m := 1.. 19$$

$$\mathbf{DJZ}_m := \mathbf{fZ}[\mathbf{PHJ}_m, \mathbf{PHJ}_{(m+1)}, \mathbf{TVJ}_m, \mathbf{TVJ}_{(m+1)}]$$

$$\mathbf{ZJ}_{(m+1)} := \mathbf{ZJ}_m - \mathbf{DJZ}_m$$

$$\begin{array}{r}
 \mathbf{DJZ =} \\
 \mathbf{2453.99} \\
 \mathbf{1906.68} \\
 \mathbf{1571.81} \\
 \mathbf{1339.58} \\
 \mathbf{1167.15} \\
 \mathbf{1033.16} \\
 \mathbf{927.03} \\
 \mathbf{842.96} \\
 \mathbf{774.82} \\
 \mathbf{717.56} \\
 \mathbf{668.65} \\
 \mathbf{626.37} \\
 \mathbf{589.43} \\
 \mathbf{556.88} \\
 \mathbf{527.97} \\
 \mathbf{503.38} \\
 \mathbf{483.07} \\
 \mathbf{465.21} \\
 \mathbf{448.85}
 \end{array}
 \mathbf{ZJ =}
 \begin{array}{r}
 \mathbf{16584.44} \\
 \mathbf{14130.46} \\
 \mathbf{12223.78} \\
 \mathbf{10651.97} \\
 \mathbf{9312.39} \\
 \mathbf{8145.24} \\
 \mathbf{7112.08} \\
 \mathbf{6185.04} \\
 \mathbf{5342.08} \\
 \mathbf{4567.26} \\
 \mathbf{3849.7} \\
 \mathbf{3181.05} \\
 \mathbf{2554.68} \\
 \mathbf{1965.25} \\
 \mathbf{1408.37} \\
 \mathbf{880.4} \\
 \mathbf{377.01} \\
 \mathbf{-106.06} \\
 \mathbf{-571.27} \\
 \mathbf{-1020.12}
 \end{array}
 \mathbf{PHJ =}
 \begin{array}{r}
 \mathbf{10} \\
 \mathbf{15} \\
 \mathbf{20} \\
 \mathbf{25} \\
 \mathbf{30} \\
 \mathbf{35} \\
 \mathbf{40} \\
 \mathbf{45} \\
 \mathbf{50} \\
 \mathbf{55} \\
 \mathbf{60} \\
 \mathbf{65} \\
 \mathbf{70} \\
 \mathbf{75} \\
 \mathbf{80} \\
 \mathbf{85} \\
 \mathbf{90} \\
 \mathbf{95} \\
 \mathbf{100} \\
 \mathbf{105}
 \end{array}$$

$$\mathbf{PHJ_{17} = 90}$$

$$\mathbf{ZJ_{17} = 377.01}$$

$$\mathbf{TVJ_{17} = 302.7}$$

$$\mathbf{TVJ0 := TVJ_{17} + ZJ_{17} \cdot \frac{G}{CPA}}$$

$$\mathbf{TVH0 = 302.52}$$

$$\mathbf{PJO := PHH_{17} \cdot \left(\frac{TVJ0}{TVJ_{17}} \right)^{\frac{1}{fKA(MJ)}}$$

$$\mathbf{PJO = 93.9}$$

Hydrostatic Base Pressure Calculation - Air-Sea Interaction case.

$$\mathbf{n := 13}$$

$$\mathbf{P\alpha_n = 7}$$

$$\mathbf{ZC_n = 18584.54}$$

$$\mathbf{PK := MPI_C}$$

$$\mathbf{TK := T_p}$$

$$\mathbf{UK := 90}$$

$$\mathbf{MK := fMVS(PK, TK) \cdot \frac{UK}{100}}$$

$$\mathbf{MK = 0.03}$$

$$\mathbf{SK := fST3(PK, TK, MK)}$$

$$\mathbf{SK = 415.37}$$

$$\mathbf{PK = 83.15}$$

$$\mathbf{PHK_1 := P_{\alpha_n}}$$

$$\mathbf{PHK_2 := PHK_1 + 3}$$

$$\mathbf{m := 3.. 20}$$

$$\mathbf{PHK_m := [PHK_2 + 5 \cdot (m - 2)]}$$

$$\mathbf{TK := \overrightarrow{fTSOL(SK, PHK, MK)}}$$

$$\mathbf{TVK := \overrightarrow{fTV3(PHK, TK, MK)}}$$

$$\mathbf{UK := \overrightarrow{fU3(PHK, TK, MK)}}$$

	7	203.62	197.89	118309.8
	10	223.53	217.32	11350.37
	15	244.85	238.67	1539.36
	20	257.02	251.65	621.62
	25	264.6	260.22	389.79
	30	269.55	265.96	304.46
	35	273.82	271.08	249.6
	40	278.28	276.52	207.24
	45	282.1	281.3	178.75
PHK =	50	285.45	285.58	158.32
	55	288.45	289.46	142.94
	60	291.15	293.02	130.94
	65	293.62	296.31	121.3
	70	295.9	299.38	113.38
	75	298.01	302.25	106.75
	80	299.98	304.96	101.1
	85	304.45	309.66	82.17
	90	309.43	314.72	65
	95	314.21	319.59	52.2
	100	318.82	324.28	42.46

$$\mathbf{ZK_1 := ZC_n}$$

$$\mathbf{PHK_{18} = 90}$$

$$\mathbf{m := 1.. 19}$$

$$\mathbf{DKZ_m := fZ[PHK_m, PHK_{(m+1)}, TVK_m, TVK_{(m+1)}]}$$

$$\mathbf{ZK_{(m+1)} := ZK_m - DKZ_m}$$

	(2167.36)	(18584.54)	(7)
	2705.83	16417.18	10
	2065.38	13711.35	15
	1672.67	11645.97	20
	1404.96	9973.3	25
	1212.39	8568.34	30
	1070.86	7355.95	35
	962.2	6285.09	40
	874.7	5322.88	45
DKZ =	802.65	4448.18	50
	742.25	3645.53	55
	690.84	2903.28	60
	646.52	2212.44	65
	607.9	1565.92	70
	573.93	958.01	75
	545.69	384.08	80
	522.66	-161.61	85
	502.26	-684.27	90
	483.67	-1186.54	95
		-1670.21	100

$$\text{PHK}_{16} = 80$$

$$\text{ZK}_{16} = 384.08$$

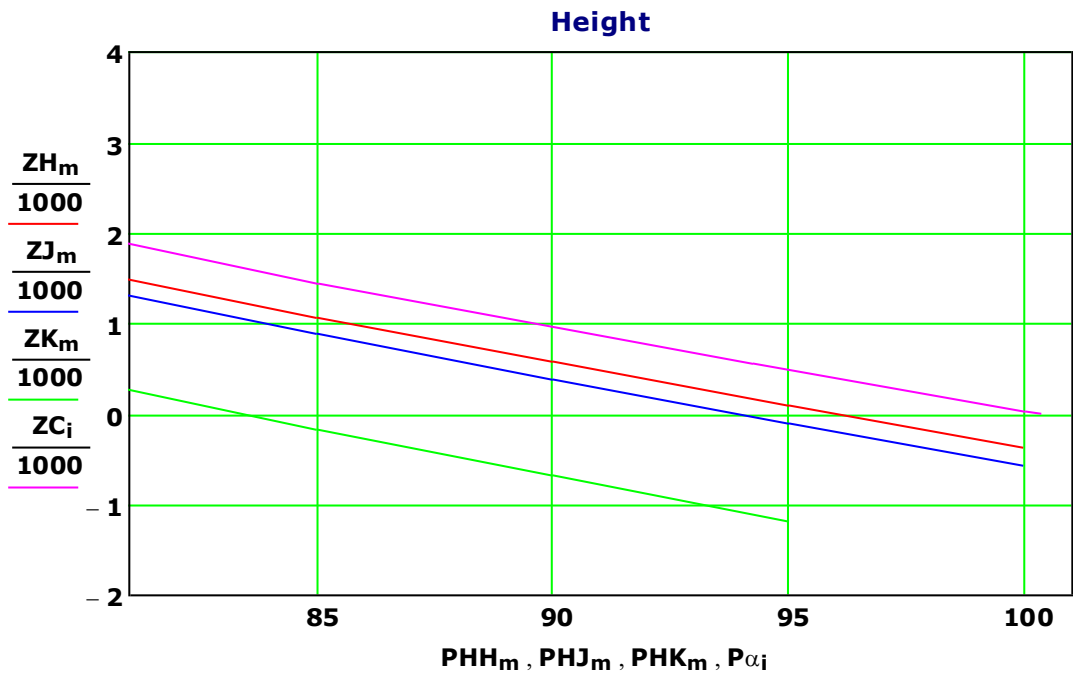
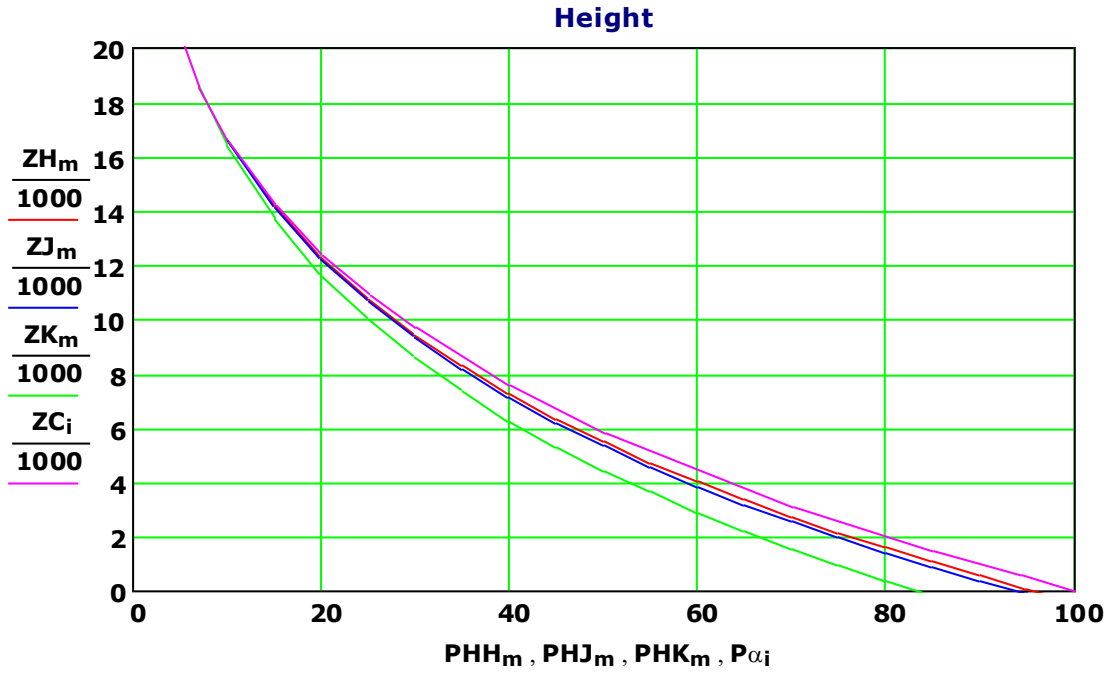
$$\text{TVK}_{16} = 304.96$$

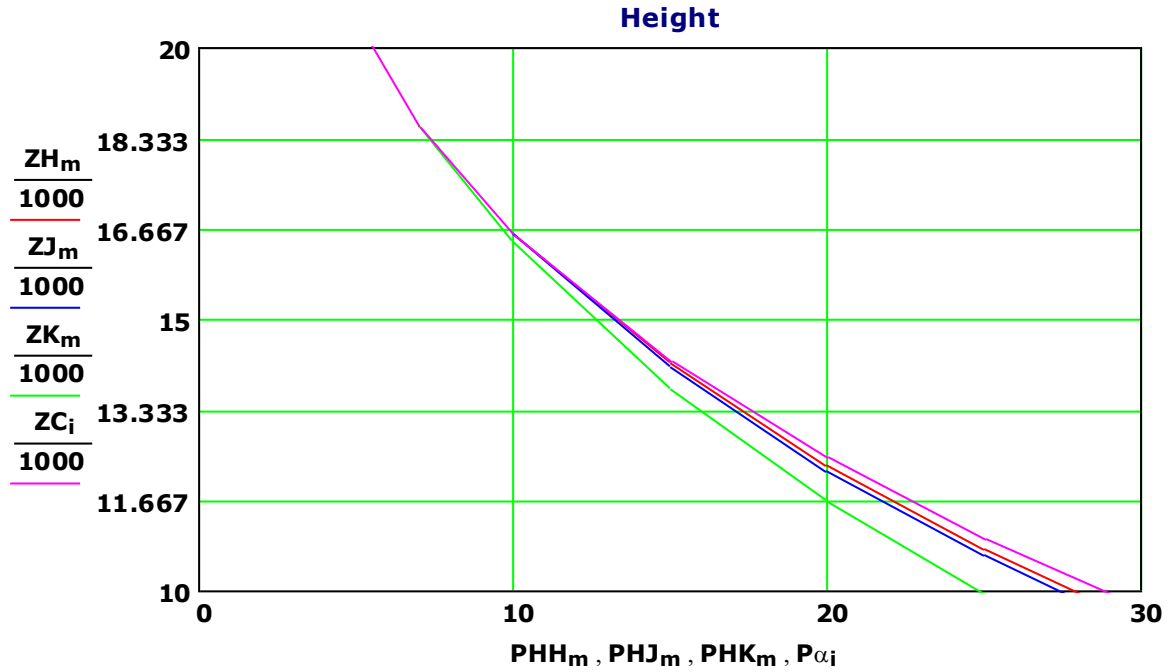
$$\text{TVK}_0 := \text{TVK}_{16} + \text{ZK}_{16} \cdot \frac{G}{\text{CPA}}$$

$$\text{TVH}_0 = 302.52$$

$$\text{PKO} = \bullet$$

$$\text{PKO} := \text{PHK}_{16} \cdot \left(\frac{\text{TVK}_0}{\text{TVK}_{16}} \right)^{\frac{1}{f_{\text{KA}}(\text{MJ})}}$$





SUMMARY:

CASE	MPI	HI
	Maximum Potential Intensity (kPa)	Hurricane Intensity(kPa)
Reversible	MPI_A = 95.96	HI_A = 4.34
Irreversible	MPI_B = 93.77	HI_B = 6.53
Air-Sea Interaction	MPI_C = 83.15	HI_C = 17.15

Write data array for use by a plotting program

$$\begin{aligned} \text{ZPLOT}^{\langle 1 \rangle} &:= \frac{\text{ZC}}{1000}, \text{ZPLOT}^{\langle 2 \rangle} := P_{\alpha}, \text{ZPLOT}^{\langle 3 \rangle} := \frac{\text{ZH}}{1000}, \text{ZPLOT}^{\langle 4 \rangle} := \text{PHH}, \\ \text{ZPLOT}^{\langle 5 \rangle} &:= \frac{\text{ZJ}}{1000}, \text{ZPLOT}^{\langle 6 \rangle} := \text{PHJ}, \text{ZPLOT}^{\langle 7 \rangle} := \frac{\text{ZK}}{1000}, \text{ZPLOT}^{\langle 8 \rangle} := \text{PHK} \end{aligned}$$

P3 = 7

ZPPLOT =

0	100.3	16.58	10	16.58	10	18.58	7
0.03	100	14.18	15	14.13	15	16.42	10
0.56	94.2	12.3	20	12.22	20	13.71	15
1.45	85	10.75	25	10.65	25	11.65	20
3.11	70	9.43	30	9.31	30	9.97	25
5.84	50	8.28	35	8.15	35	8.57	30
7.57	40	7.25	40	7.11	40	7.36	35
9.69	30	6.33	45	6.19	45	6.29	40
10.97	25	5.5	50	5.34	50	5.32	45
12.45	20	4.73	55	4.57	55	4.45	50
14.24	15	4.02	60	3.85	60	3.65	55
16.58	10	3.36	65	3.18	65	2.9	60
18.58	7	2.73	70	2.55	70	2.21	65
20.54	5	2.15	75	1.97	75	1.57	70
0	0	1.6	80	1.41	80	0.96	75
0	0	1.07	85	0.88	85	0.38	80
0	0	0.57	90	0.38	90	-0.16	85
0	0	0.1	95	-0.11	95	-0.68	90
0	0	-0.36	100	-0.57	100	-1.19	95
0	0	-0.8	105	-1.02	105	-1.67	100

Συμπεράσματα

Ο προσδιορισμός των μεταβλητών που διατηρούνται σταθερές είναι βασικός παράγοντας για την εφαρμογή της εξίσωσης συνολικής ενέργειας (Total Energy Equation). Μόλις οι μεταβλητές που θα διατηρηθούν έχουν προσδιοριστεί, οι μεταβλητές που λείπουν μπορούν εύκολα να βρεθούν. Στην αναστρέψιμη περίπτωση A, η εντροπία και η αναλογία ανάμιξης είναι αυτές που διατηρούνται σταθερές κατά τη διαδικασία 1-2 στη μη αναστρέψιμη περίπτωση B, η ενθαλπία (h) και η ανάμιξη διατηρούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας 1-2. Η εντροπία (s), η στατική ενέργεια (μ) και ο λόγος αναμίξεως (r) είναι αμετάβλητες κατά τη διαδικασία 2-3 και στις τρεις περιπτώσεις. Η P₂ στην περίπτωση A μπορεί να προσδιοριστεί επειδή η αναλογία ανάμιξης και η εντροπία στην κατάσταση 2 είναι γνωστές. Η P₂ στην περίπτωση B μπορεί να προσδιοριστεί επειδή η αναλογία ανάμιξης και η ενθαλπία στην κατάσταση 2 είναι γνωστές. Τέλος η P₂ στην περίπτωση C μπορεί να προσδιοριστεί επειδή η σχετική υγρασίας και η θερμοκρασίας στην κατάσταση 2 είναι γνωστές. Η ευαισθησία του MPI στη θερμοκρασία του αέρα επιφάνειας και την υγρασία υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση συνολικής ενέργειας και τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκρίθηκαν με τις παρατηρήσεις και με άλλες μοντέλα. Η ένταση των τροπικών κυκλώνων φαίνεται να είναι κυρίως συνάρτηση της SST, διότι ο ανερχόμενος αέρας προσεγγίζει την ισορροπία με το νερό και επειδή η ανύψωση των γεωδυναμικών επιφανειών στην κορυφή της τροπόσφαιρας σε υποτροπικά γεωγραφικά πλάτη είναι

ουσιαστικά σταθερή. Δεν είναι δύσκολο να εκτιμήσουμε την ευαισθησία του MPI στο SST επειδή τα εύρη πίεσης και θερμοκρασίας είναι πολύ περιορισμένη. Η ευαισθησία πρέπει να είναι κοντά 2kPa/K επειδή το MPI κυμαίνεται από 98 έως 86kPa, ενώ η SST κυμαίνεται από 26 έως 31°C. Η μέθοδος της εξίσωσης συνολικής ενέργειας χρησιμοποιεί τις αρχές της θερμοδυναμικής για να δείξει ότι η ευαισθησία της έντασης στο eyewall στη SAT είναι περίπου 2,9kPa/K. Η ευαισθησία της έντασης στο eyewall στη SST είναι 1,5 με 2.5kPa/K επειδή η SAC αυξάνει με την ένταση και η ευαισθησία της έντασης στο μάτι του κυκλώνα στη SST πριν από την καταιγίδα είναι 1,0 με 2,0kPa/K λόγω της μείωσης SST κατά τη διάρκεια της καταιγίδας. Η μέθοδος της εξίσωσης συνολικής ενέργειας δεν προβλέπει μόνο την ένταση, αλλά παρέχει και μια εξήγηση για την ενέργεια του ανέμου και για το μείωση της επιφανειακής πίεσης. Η μηχανική ενέργεια που παράγεται όταν η θερμότητα μεταφέρονται προς τα πάνω με συναγωγή από τη θάλασσα (θερμή πηγή), στην ανώτερη τροπόσφαιρα (κρύα πηγή). Η κινητική ενέργεια που απελευθερώνεται σε τυφώνες είναι κατά προσέγγιση 20% της θερμότητας που απομακρύνεται από τη θάλασσα, επειδή η απόδοσης είναι ουσιαστικά σταθερή. Η απόδοσης παραμένει ουσιαστικά σταθερή, διότι οι θερμοκρασίες της θερμής και ψυχρής πηγής είναι ουσιαστικά σταθερές. Οι διαφορές μεταξύ των διάφορων εκτιμήσεις της ενέργειας που παράγεται σε τυφώνες πρέπει να επιλυθούν. Η εξίσωση συνολικής ενέργειας μαζί με ιδανικές διεργασίες σταθερής κατάστασης, όπως εκείνες στο Σχήμα 7, θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην επίλυση του προβλήματος της απόκλισης μεταξύ των εκτιμήσεων, της απόδοσης για τη διαδικασία του τυφώνα. Η μέθοδος της εξίσωσης συνολικής ενέργειας για τον υπολογισμό της έντασης των τυφώνων είναι πολύ απλούστερη από ό,τι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συνήθως και μπορεί να μας βοηθήσει να κατανοήσουν τη διαδικασία μετατροπής της ενέργειας. [25]

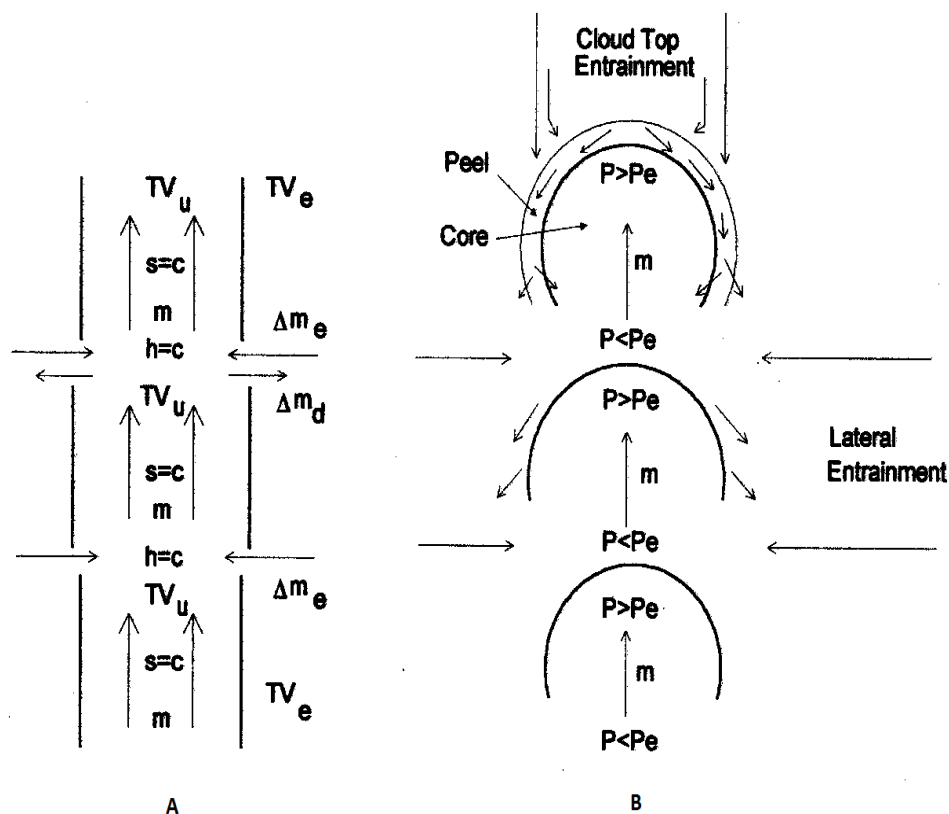
Εισροή και Παράσυρση στο Ανοδικό Ρεύμα Αέρα και στη Διάχυση του Έργου

Εισαγωγή

Το πρόγραμμα "ED_US.mcd" χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του έργου που παράγεται όταν ο αέρας, με δεδομένα χαρακτηριστικά βάσης (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία κ.τ.λ.), ανυψώνεται με καθορισμένους παράγοντες την εισροή, την παράσυρση (entrainment, detrainment) και το διαχωρισμένο συμπύκνωμα νερού, που ανυψώνεται αναστρέψιμα. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του Πίνακα 1 στο άρθρο "Entrainment and Detrainment required to explain updraft properties and work dissipation" του Michaud. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ατμοσφαιρικά δεδομένα από τις 18 Δεκεμβρίου 1992, από το Kavieng, μια πόλη της Παπούασίας-Νέας Γουινέας, ένα νησιωτικό κράτος της Ωκεανίας που βρίσκεται βόρεια της Αυστραλίας και περιλαμβάνει το ανατολικό άκρο της νήσου της Νέας Γουινέας και μερικά συμπλέγματα νησιών. Τα δεδομένα αποκτήθηκαν από το INDOEX. Πρόκειται για μια διεθνή ομάδα πάνω από 150 επιστημόνων η οποία διεξάγει ένα πείραμα πεδίου για να μελετήσουν πώς η ατμοσφαιρική ρύπανση επηρεάζει τις διαδικασίες του κλίματος πάνω από το τροπικό Ινδικό Ωκεανό. Το Indian Ocean Experiment (INDOEX) ερευνά πώς οι ρύποι μεταφέρονται μέσω της ατμόσφαιρας και πώς επηρεάζουν τη σύνθεση της ατμόσφαιρας και τις διαδικασίες της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από τον ωκεανό.

Παρουσίαση

Η αντίσταση στην κίνηση του αέρα είναι υπεύθυνη για την διαχυση του έργου που παράγεται στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα το 60% του έργου διαχέεται για να υπερνικηθούν οι αντιστάσεις κατά την ανοδική ροή, το 30% κατά την καθοδική και το υπόλοιπο 10% για να υπερνικηθούν οι αντιστάσεις κατά την οριζόντια κυκλοφορία του αέρα. Θα εστιάσουμε στην διαχυση του έργου στην ανοδική κίνηση. Δείξαμε παραπάνω ότι το έργο που διαχέεται είναι ίσο με την εντροπία που παράγεται επί τη θερμοκρασία στην οποία γίνεται η διάχυση. Μια αέρια μάζα που θερμαίνεται κοντά στην επιφάνεια της Γής γίνεται ελαφρύτερη από τον αέρα που την περιβάλλει δημιουργώντας έτσι ένα ανοδικό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό, ανεβαίνοντας στην ατμόσφαιρα αναμιγνύεται με τον αέρα περιβαλλοντος. Η ανάμιξη του ατμοσφαιρικού αέρα με το ανοδικό ρεύμα καλείται εισροή.



Σχήμα 9: Μοντέλα εισροής και εκροής Α) Μοντέλο σωλήνα, Β) Μοντέλο μπαλονιού. [22]

Στο Σχήμα 9Α βλέπουμε ένα κατακόρυφο σωλήνα με ανοίγματα στα τοιχώματά του, μεσω των οποίων ο αέρας περιβάλλοντος μπορεί να εισέρχεται στο ανοδικό ρεύμα αέρα. Η ροή μέσα από τα ανοίγματα είναι μια συνάρτηση της διαφοράς πίεσης. Στο Σχήμα 9Β φαίνεται το μοντέλο του μπαλονιού. Στο μπαλόνι, η εσωτερική πίεση στο πάνω μέρος είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική, ενώ στο κάτω συμβαίνει το αντίθετο. Η πτώση πίεσης στη βάση ενός ανοδικού ρεύματος, και κατά συνέπεια και η εισροή, είναι επομένως, συνάρτηση της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ του ανωρεύματος και του περιβάλλοντος.

Δεδομένου ότι δεν μπορούν να υπάρξουν μεγάλες οριζόντιες διαφορές πίεσης, χωρίς τη χρήση αγωγών, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η ανοδική ροή, στη φύση, προσομοιάζεται καλύτερα με το παράδειγμα της ροής φυσαλλίδας παρά με αυτό της συνεχούς ροής. Η σχέση που εκφράζει την εισροή του αέρα περιβάλλοντος στο ανοδικό ρεύμα είναι:

$$e = \frac{1}{m} \cdot \frac{dm}{dp} = f(\Delta p) = f(\Delta T_V) \quad (1)$$

όπου e η κλασματική εισροή, η οποία δίνεται με ποσοστό επί της εκατό, m είναι η μάζα του ανοδικού ρεύματος και p η πίεση. Η εικονική θερμοκρασία T_V αντικαθιστά την πυκνότητα

ρ και ορίζεται ως:

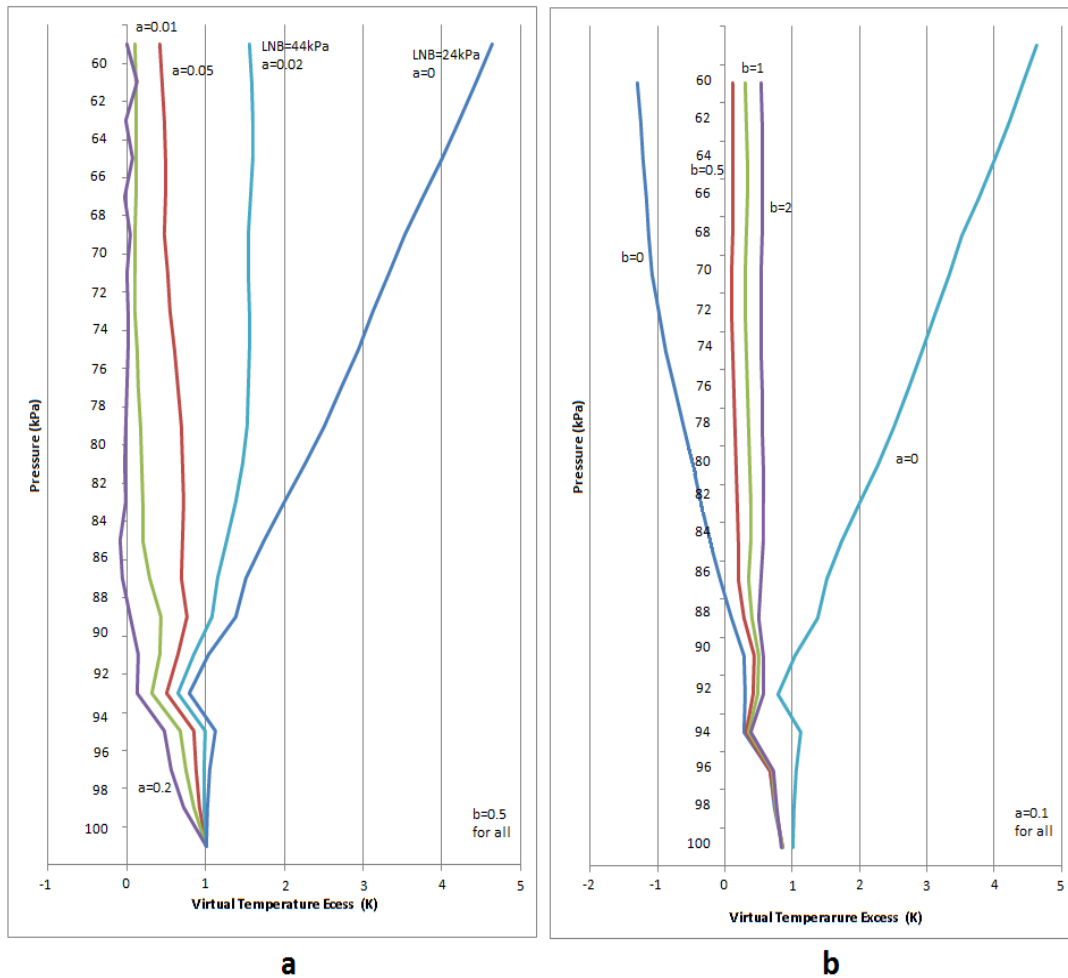
$$T_V = T \cdot \left[\frac{1+r_V/\varepsilon}{1+r_V} \right] \cdot \left[\frac{1+r_S}{1+r_S+r_1} \right] \quad (2)$$

όπου r_V , r_1 , r_S οι λόγοι ανάμιξης του νερού στη φάση του ατμού, την υγρή φάση και την κατάσταση κορεσμού αντίστοιχα. Το $\varepsilon=Ra/Rv=0.622$ είναι ο λόγος της σταθεράς των αερίων για τον αέρα προς τη σταθερά των αερίων για τον ατμό.

Η (1) γράφεται και:

$$e = \frac{\Delta m_e}{m} = a \cdot i \cdot (\Delta T_V)^b = a \cdot i \cdot (T_{VU} - T_{VE})^b \quad (3)$$

όπου i είναι το διάστημα ανάμιξης σε kPa. Η σταθερά a ονομάζεται συντελεστής εισροής και η b εκθέτης εισροής. Οι δείκτες a και b των θερμοκρασιών αναφέρονται στο ανοδικό ρεύμα και το περιβάλλον αντίστοιχα. Για τιμές $a=0.1$ και $b=0.5$, 10% του αέρα περιβάλλοντος εισέρχεται στο ρεύμα για κάθε kPa όταν η διαφορά της εικονικής θερμοκρασίας είναι 1K, ενώ για διαφορά θερμοκρασίας είναι 0,5K η εισροή είναι 7% ανά kPa. Για τιμές $a=0.1$ και $b=2$ το e γίνεται 10% για διαφορά θερμοκρασίας 1K και 2,5% για διαφορά θερμοκρασίας 0,5K. Οι δύο σταθερές a και b , του εμπειρικού μοντέλου υπολογισμού της εισροής, προσφέρουν ευελιξία στη ρύθμισή του. Η επιρροή των σταθερών a και b φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Καθώς μειώνεται ο συντελεστής εισροής η διαφορά εικονικής θερμοκρασίας προσεγγίζει την περίπτωση χωρίς εισροή, ενώ αυξάνοντας τον εκθέτη εισροής η διαφορά εικονικής θερμοκρασίας τείνει να γίνει ευθεία.



Σχήμα 10: Επίδραση διαφορετικών τιμών του συντελεστή (a) και του εκθέτη εισροής (b) στη διαφορά εικονικής θερμοκρασίας.

Το μοντέλο ολοκληρώνει τους υπολογισμούς όταν το ανοδικό ρεύμα φτάσει στο επίπεδο ουδέτερης άνωσης (Level of Neutral Buoyancy), όταν δηλαδή η εικονική θερμοκρασία του γίνει αρνητική. Το μοντέλο μας τροφοδοτεί, γενικά, με πληθώρα πληροφοριών για το ανοδικό ρεύμα αέρα, επιλέγουμε να εστιάσουμε όμως στη πληροφορία που προκύπτει για το επίπεδο ουδέτερης άνωσης.

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει τα αρχικά ατμοσφαιρικά δεδομένα του ανοδικού ρεύματος αέρα και τα αποτελέσματα των υπολογισμών του προγράμματος για την εισροή. Ο υπολογισμός γίνεται για $a=0.1$, $b=0.5$ και $c=0.01$ για διαστήματα των 2kPa.

Environmet							Updraft before mixing					Entrainment			
P (kPa)	T _e (K)	U _e (%)	r _e (g/kg)	s _e (J/K*kg)	h _e (KJ/kg)	T _{ve} (K)	T _u (K)	r _u (g/kg)	s _u (J/K*kg)	h _u (KJ/kg)	ΔT _{vu} (K)	e (%)	m	Δm _e	f (%)
100	301.15	81.0	19.76	276.70	78.56	304.70	302.15	19.76	280.15	79.60	1.01	0	1	1	0
98	299.75	84.4	19.31	274.04	75.97	303.20	300.42	19.76	280.15	77.80	0.75	17.37	1.17	0.17	14.80
96	298.33	87.8	18.82	270.94	73.23	301.68	298.56	19.69	279.25	75.70	0.39	12.50	1.32	0.15	11.11
94	296.88	91.2	18.28	267.44	70.35	300.12	296.75	19.59	278.33	73.57	0.10	6.33	1.40	0.08	5.95
93	296.15	93.0													
92	295.61	92.0	17.39	261.68	66.78	298.68	295.81	19.51	277.68	71.49	0.40	12.72	1.58	0.18	11.28
90	294.50	90.0	16.24	254.27	62.70	297.36	293.93	19.28	275.88	69.04	0.61	15.63	1.83	0.25	13.52
88	293.38	88.0	15.13	247.31	58.73	296.03	293.94	18.86	272.97	66.23	0.73	17.08	2.14	0.31	14.59
86	292.23	86.0	14.07	240.78	54.86	294.69	292.86	18.32	269.23	63.15	0.78	17.65	2.52	0.38	15.00
84	291.06	84.0	13.06	234.69	51.10	293.34	291.71	17.68	264.98	59.88	0.78	17.61	2.96	0.44	14.98
82	289.87	82.0	12.10	229.04	47.43	291.97	290.50	16.99	260.47	56.50	0.74	17.17	3.47	0.51	14.65
80	288.65	80.0	11.18	223.83	43.86	290.59	289.25	16.28	255.89	53.07	0.67	16.42	4.04	0.57	14.10
78	287.54	80.0	10.67	222.72	41.43	289.39	287.95	15.56	251.39	49.63	0.40	12.63	4.55	0.51	11.22
76	286.41	80.0	10.17	221.76	38.99	288.16	286.72	15.01	248.19	46.52	0.21	9.23	4.97	0.42	8.45
74	285.25	80.0	9.67	220.95	36.55	286.91	285.54	14.60	245.97	43.65	0.09	5.99	5.27	0.30	5.56
40	259.81	80.0													

Πίνακας 11: Πίνακας υπολογισμών εισροής. [22]

Στον Πίνακα 11 βλέπουμε ότι για να μηδενιστεί η άνωση του ρεύματος απαιτείται συνολική εισροή 5,27. Γενικά οι ιδιότητες του ανοδικού ρεύματος δεν είναι πολύ ευαίσθητες στις σταθερές του μοντέλου γιατί αν έχουμε χαμηλή εισροή σε ένα βήμα η διαφορά εικονικής θερμοκρασίας μεγαλώνει δίνοντας περισσότερη εισροή στο επόμενο βήμα. Μείωση στο συντελεστή εισροής από 0,1 σε 0,05, θα προκαλέσει μείωση στο LNB από τα 74 στα 62kPa, ενώ η συνολική εισροή μειώνεται από 5,27 σε 4,54 (-14%). Αύξηση του εκθέτη εισροής από 0,5 σε 1, μειώνει το LNB από τα 74 στα 64kPa και η συνολική εισροή υπολογίζεται από 5,27 σε 4,63 (-12%). Ανίθετα, στην περίπτωση που αυξήσουμε την διαφορά θερμοκρασίας από 1 σε 2K η συνολική εισροή αυξάνεται από 5,27 σε 6,95 ενώ το LNB παραμένει σχεδόν

σταθερό. Το επίπεδο ουδέτερης άνωσης μας δίνει μια πληροφορία για το δυνατό ύψος που μπορεί να φτάσει το ανοδικό ρεύμα στις δεδομένες συνθήκες που επικρατούν. Η μείωσή του συνεπάγεται και τη μείωση στο δυνατό έργο που μπορεί να προσφέρει το ανοδικό ρεύμα και ταυτόχρονα αύξηση στο έργο που θα διαχυθεί κατά την άνοδο του αέρα στην ατμόσφαιρα.

Στο παράδειγμα του Σχήματος 9B το ανοδικό ρεύμα αέρα προσομοιώνεται με ένα σφαιρικό μπαλόνι. Το έργο που απαιτείται για να μεταφέρει μια σφαίρα είναι: $F_d \cdot v$. Το έργο ανα μονάδα μάζας που απαιτείται προκύπτει για την μεταφορά μιας σφαίρας είναι:

$$W_d = \frac{3}{4} \cdot \frac{C_d \cdot L}{d \cdot v} \quad (4)$$

όπου C_d ο συντελεστής αντίστασης, L το μήκος, d η διάμετρος της σφαίρας και v η ταχύτητά της. Με τις τυπικές, για την ατμόσφαιρα, τιμές διαμέτρου 400m και ταχύτητας 5m/s το έργο υπολογίζεται 250J/Kg.

Το έργο, ανα μονάδα μάζας, που απαιτείται για να παράγει ανοδική ροή σε ένα σωλήνα είναι:

$$W_f = \frac{1}{2} \cdot \frac{F \cdot L}{d \cdot v^2} \quad (5)$$

όπου F ο συντελεστής τριβής Darcy, που είναι της τάξης του 0,01 για τυρβώδη ροή, L το μήκος, d η διάμετρος του σωλήνα και v η ταχύτητα της ροής. Για τις ίδιες τιμές διαμέτρου και ταχύτητας με παραπάνω το έργο υπολογίζεται 2,5J/Kg. Το έργο που διαχέεται, κατά τη μεταφορά θερμότητας, σε σφαιρική ανοδική ροή είναι 100 φορές μεγαλύτερο από αυτό της συνεχούς ροής. Η συνεχής συναγωγική ροή σε ένα αγωγό, επομένως, θα μείωνε κατά πολύ το διαχεόμενο έργο που απαιτείται για την ανοδική μεταφορά θερμότητας, επιτρέποντας έτσι την εκμετάλλευσή του. Ανεξάρτητα από τη διαφορά της εικονικής θερμοκρασίας και τη διάμετρο του ανερχόμενου ρεύματος αέρα η ανοδική ταχύτητα αυξάνεται μέχρι το διαχεόμενο, από την τριβή, έργο να ισούται με το έργο της άνωσης. Αν δεν υπήρχε καθόλου εισροή το ($a=0$, $b=0$) η μέγιστη ταχύτητα ανόδου θα έφτανε τα 30m/s και η μέγιστη κινητική ενέργεια θα ήταν 450J/Kg. Σε αυτή την περίπτωση το συνολικό διαχεόμενο έργο ισούται με το CAPE.

Η παράσυρση είναι στοχαστική διεργασία. Για μέση εισροή 10%/kPa, η εισροή στα διάφορα σημεία του ανοδικού ρεύματος μπορεί να πάρει τιμές από 0%/kPa, μέχρι και πάνω από 20%/kPa. Η ελάττωση της άνωσης λόγω εισροής μεγαλώνει όσο μεγαλώνει η ποσότητα του αέρα περιβάλλοντος που εισέρχεται στο ανοδικό ρεύμα αέρα. Μπορεί επομένως, κάποια τμήματα του ανοδικού ρεύματος να γίνουν αρνητικά ανωστικά με αποτέλεσμα να κατακαθίσουν και να παρασυρθούν.

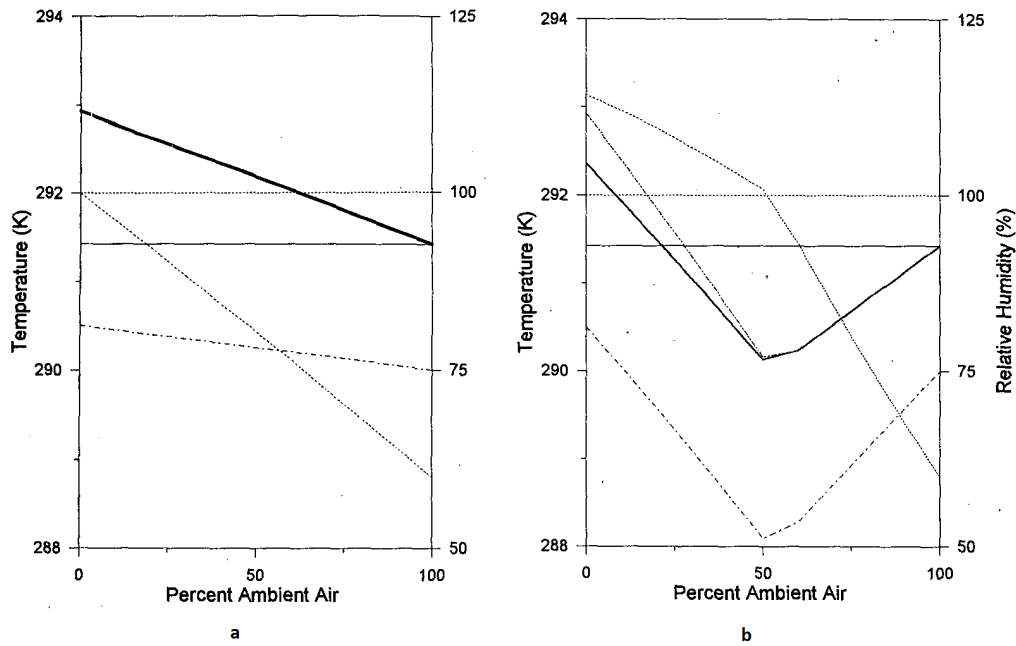
Ένα ομογενές, μη στοχαστικό ανοδικό ρεύμα αέρα, θα παρέμενε στο σύνολό του ανωστικό έως ότου φτάσει στο επίπεδο ουδέτερης άνωσης (LNB), όπου θα εμφανιζόταν και η

παράσυρση. Στην πραγματικότητα όμως η τυχαία διαδικασία ανάμιξης προκαλεί τμήματα του ανοδικού ρεύματος να γίνουν αρνητικά ανωστικά σε χαμηλότερο ύψος από το LNB.

Η παράσυρση εκφράζεται από την συνάρτηση:

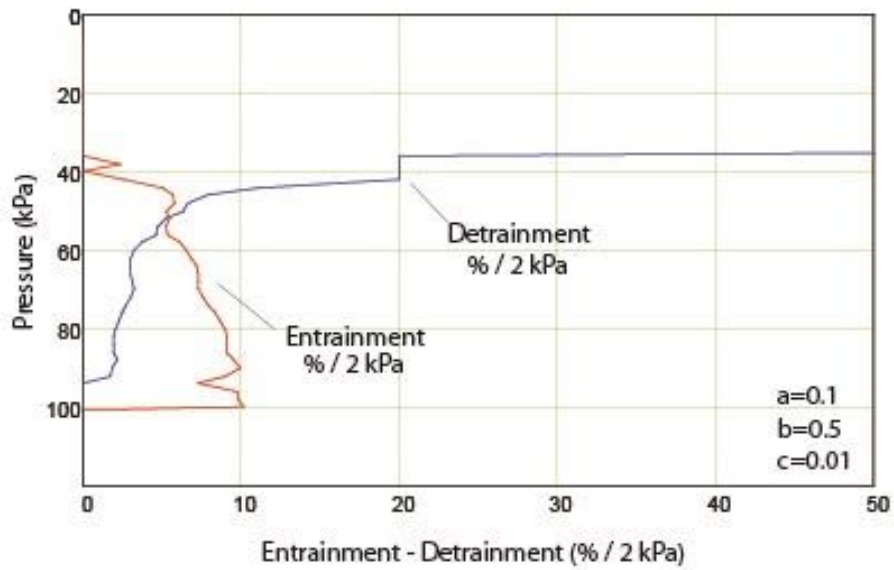
$$\gamma = \frac{\Delta m_d}{m} = c \cdot i \cdot \left(\frac{dT_v / df}{\Delta T_v} + 1 \right) = c \cdot i \cdot \left(-\frac{1}{f_0} + 1 \right) \quad (6)$$

Όπου γ η κλασματική παράσυρση, c ο συντελεστής παράσυρσης για τον οποίο χρησιμοποιείται η βασική τιμή 0,01, ΔT_v είναι η διαφορά εικονικής θερμοκρασίας του ανοδικού ρεύματος, f είναι το κλάσμα του αέρα περιβάλλοντος που αναμιγνύεται στο ανοδικό ρεύμα αέρα, dT_v / df είναι ο ρυθμός μεταβολής της εικονικής θερμοκρασίας προς την ποσότητα του αέρα περιβάλλοντος και τέλος f_0 είναι η ποσότητα αέρα περιβάλλοντος που απαιτείται για να μειώσει τη διαφορά εικονικής θερμοκρασίας του ανοδικού ρεύματος στο μηδέν. Ο όρος +1 κάνει την παράσυρση μηδέν όταν δεν υπάρχει συμπύκνωμα νερού. Στο πάνω μέρος του σχήματος 9A φαίνεται η διαδικασία της παράσυρσης. Η συνάρτηση (6) δεν περιορίζει την παράσυρση μεταξύ του 0 και του -1, που είναι τα φυσικά της όρια, αλλά ορίζεται ίση με -1 όταν βρίσκεται εκτός ορίων. Στη βασική υπόθεση αυτό συμβαίνει μόνο στο τελευταίο επίπεδο των 74kPa. Η Εικόνα 24 δείχνει δύο διαγράμματα ισηθαλικής ανάμιξης αέρα, συνθηκών θερμοκρασίας 290,5K και σχετικής υγρασίας 100%, με αέρα περιβάλλοντος, σε συνθήκες 290K και σχετική υγρασία 60%. Η έντονη συνεχής γραμμή δείχνει την εικονική θερμοκρασία του μίγματος, η ελαφριά συνεχής οριζόντια δίνει την εικονική θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος και η “αξονική” γραμμή δείχνει την πραγματική θερμοκρασία του μίγματος. Τέλος με τις διακεκομμένες γραμμές φαίνεται η σχετική υγρασία. Στην Εικόνα 24a, όπου δεν υπάρχει συμπύκνωμα νερού, αύξηση του ατμοσφαιρικού αέρα κατά 1% μειώνει τη διαφορά εικονικής θερμότητας επίσης κατά 1%. Η μείωση της διαφοράς εικονικής θερμότητας στο 0 επιβάλλει το μίγμα να αποτελείται κατά 100% από αέρα περιβάλλοντος και έτσι μηδενίζεται η παράσυρση. Στην Εικόνα 24b, όπου το ανοδικό ρεύμα περιέχει συμπύκνωμα νερού, η αντίστοιχη αύξηση του ατμοσφαιρικού αέρα κατά 1% μειώνει τη διαφορά εικονικής θερμότητας επίσης κατά 5%, ενώ για 20% αύξηση του αέρα περιβάλλοντος η διαφορά εικονικής θερμοκρασίας μηδενίζεται. Έτσι η παράσυρση είναι 4%/kPa και 8%/2kPa αντίστοιχα.

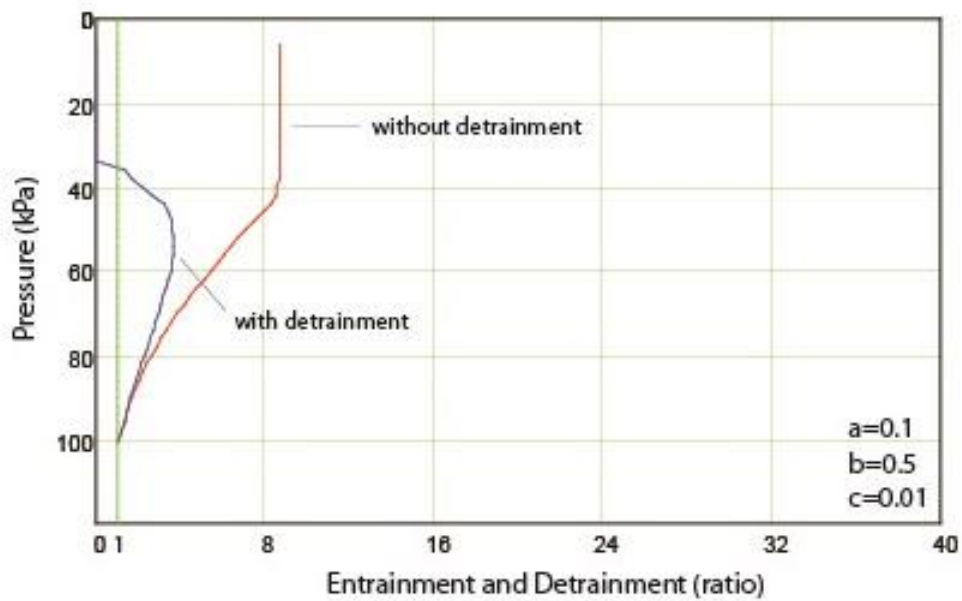


Εικόνα 24: Ισενθαλπική ανάμιξη αέρα με αέρα περιβάλλοντος στα 90kPa. α) Αέρας χωρίς συμπύκνωση νερού β) Αέρας με 2g/kg συμπύκνωση νερού. [34]

Η συνάρτηση της παράσυρσης είναι απλά ένας τρόπος να ποσοτικοποιηθεί η πιθανότητα ο αέρας να παρασυρθεί και να διαχωριστεί από το ανοδικό ρεύμα. Η παράσυρση είναι μεγάλη όταν η διαφορά εικονικής θερμοκρασίας του ανοδικού ρεύματος είναι μικρή και όταν ο αέρας που βρίσκεται ψηλότερα είναι ξηρός. Η χρήση του παραπάνω μοντέλου της παράσυρσης γίνεται για να έχουμε μια εκτίμηση της απώλειας μάζας του ανοδικού ρεύματος και όχι για να υπολογιστούν οι ιδιότητες του παρασυρόμενου αέρα. Το Σχήμα 11 δείχνει την κλασματική εισροή και παράσυρση. Στο Σχήμα 12 βλέπουμε τη συνολική εισροή και παράσυρση. Ενώ η εισροή μειώνει την άνωση του ανοδικού ρεύματος αέρα στο LNB, η παράσυρση μειώνει τη μάζα του στο LNB. [22]



Σχήμα 11: Εισροή και Παράσυρση στη μορφή ποσοστού της μάζας του ανοδικού ρεύματος για κάθε επίπεδο.



Σχήμα 12: Εισροή και Παράσυρση στη μορφή λόγου προς την αρχική μάζα του ανοδικού ρεύματος.

ED_US

[STANDARD FUNCTIONS]

by: L.Michaud, Aug 2000.

Sounding analysis with entrainment and detrainment

Fetch and display sounding data.

Sounding data must be pre-edited at 2 kPa interval.

Sounding data can be obtained either from Codiac or from the University of Wyoming Web Sites.

Ending α denotes property of the sounding.

$$P_{\alpha} := \frac{KDAT^{(1)}}{10}, \quad TG_{\alpha} := KDAT^{(2)}, \quad TD_{\alpha} := KDAT^{(3)}, \quad U_{\alpha} := KDAT^{(4)}, \quad Z_{\alpha} := KDAT^{(5)}$$

$$T_{\alpha} := TG_{\alpha} + T0$$

$$i m := \text{last}(P_{\alpha})$$

$$i m = 49$$

$$i := 1 .. i n$$

$$j m := i m - 1$$

$$j := 1 .. j n$$

$$j m = 48$$

	1		1		1		1				
$P\alpha =$	1	100.6	$T\alpha =$	1	28.52	$T\alpha =$	1	301.67	$TD\alpha =$	1	24.62
	2	100		2	28		2	301.15		2	24.5
	3	98		3	26.26		3	299.41		3	24.02
	4	96		4	24.5		4	297.65		4	23.41
	5	94		5	23.26		5	296.41		5	21.94
	6	92		6	22.19		6	295.34		6	20.16
	7	90		7	21.12		7	294.27		7	18.47
	8	88		8	20.12		8	293.27		8	17.36
	9	86		9	19.09		9	292.24		9	16.24
	10	84		10	18.04		10	291.19		10	15.1
	11	82		11	16.97		11	290.12		11	13.93
	12	80		12	15.89		12	289.04		12	12.76
	13	78		13	14.8		13	287.95		13	11.59
	14	76		14	13.69		14	286.84		14	10.39
	15	74		15	12.56		15	285.71		15	9.17
	16	...		16	...		16	...		16	...

	1		1		1			
$P\alpha =$	1	100.6	$U\alpha =$	1	78.85	$Z\alpha =$	1	0
	2	100		2	80.77		2	53.43
	3	98		3	87.14		3	233.2
	4	96		4	93.51		4	415.6
	5	94		5	92.13		5	600.8
	6	92		6	87.99		6	789.1
	7	90		7	84.45		7	980.6
	8	88		8	83.82		8	1176
	9	86		9	83.19		9	1374
	10	84		10	82.57		10	1577
	11	82		11	81.94		11	1784
	12	80		12	81.32		12	1995
	13	78		13	80.72		13	2210
	14	76		14	80.13		14	2430
	15	74		15	79.53		15	2655
	16	...		16	...		16	...

The following section is provided to permit modifying the sounding temperature and relative humidity for sensitivity analysis.

Ending β denotes property of the modified sounding.

$$P\beta := P\alpha$$

$$U\beta := U\alpha$$

$$T\beta := T\alpha$$

$$k_1 := 6$$

$$k_2 := 44$$

$$kk := k_1.. k_2$$

$$P\beta_{k_1} = 92$$

$$P\beta_{k_2} = 16$$

Vary the constant in the next to equations to see the effect of sounding humidity and humidity.

$$U\beta_{kk} := U\beta_{kk} + 0$$

$$T\beta_{kk} := T\beta_{kk} - 0$$

Calculate modified sounding properties:

$$MS\beta := f_{MVS}(P\beta, T\beta)$$

$$M\beta := \left[MS\beta \cdot \left(\frac{U\beta}{100} \right) \right]$$

$$TV\beta := f_{TV}(T\beta, M\beta)$$

Calculate lapse rate and heights:

$$\alpha_1 := 0$$

$$\alpha_{j+1} := f_{\alpha}(P\beta_j, P\beta_{j+1}, TV\beta_j, TV\beta_{j+1})$$

$$ZD_{j+1} := -f_Z(P\beta_j, P\beta_{j+1}, TV\beta_j, TV\beta_{j+1})$$

$$Z\beta_1 := Z\alpha_1$$

$$Z\beta_{j+1} := ZD_{j+1} + Z\beta_j$$

$$\alpha \cdot (1000) =$$

	1
1	0
2	9.92
3	9.96
4	10.06
5	7.99
6	7.17
7	6.86
8	5.79
9	5.83
10	5.8
11	5.76
12	5.67
13	5.57
14	5.53
15	5.48
16	...

$$ZD =$$

	1
1	0
2	53.43
3	179.77
4	182.38
5	185.2
6	188.29
7	191.57
8	195.07
9	198.79
10	202.66
11	206.71
12	210.95
13	215.4
14	220.08
15	224.99
16	...

$$Z\beta =$$

	1
1	0
2	53.43
3	233.2
4	415.58
5	600.78
6	789.07
7	980.64
8	1175.71
9	1374.5
10	1577.16
11	1783.87
12	1994.82
13	2210.22
14	2430.3
15	2655.29
16	...

$$Z\alpha =$$

	1
1	0
2	53.43
3	233.2
4	415.6
5	600.8
6	789.1
7	980.6
8	1176
9	1374
10	1577
11	1784
12	1995
13	2210
14	2430
15	2655
16	...

$$P\beta =$$

	1
1	100.6
2	100
3	98
4	96
5	94
6	92
7	90
8	88
9	86
10	84
11	82
12	80
13	78
14	76
15	74
16	...

$$\text{del TV} := \overrightarrow{(TV\omega - TV\alpha)}$$

$$S\beta := \overrightarrow{(f \text{ ST3}(P\beta, T\beta, M\beta))}$$

$$H\beta := \overrightarrow{(f \text{ HT3}(P\beta, T\beta, M\beta))}$$

$$\mu\beta := \overrightarrow{f \mu 4(P\beta, T\beta, M\beta, Z\beta)}$$

$$P\beta =$$

	1
1	100.6
2	100
3	98
4	96
5	94
6	92
7	90
8	88
9	86
10	84
11	82
12	80
13	78
14	76
15	74
16	...

$$MS\beta \cdot 1000 =$$

	1
1	25.01
2	24.39
3	22.41
4	20.55
5	19.44
6	18.59
7	17.78
8	17.08
9	16.38
10	15.69
11	15
12	14.34
13	13.7
14	13.07
15	12.46
16	...

$$M\beta \cdot 1000 =$$

	1
1	19.72
2	19.7
3	19.53
4	19.21
5	17.91
6	16.36
7	15.02
8	14.32
9	13.63
10	12.95
11	12.29
12	11.66
13	11.06
14	10.48
15	9.91
16	...

$$TV\beta =$$

	1
1	305.22
2	304.69
3	302.9
4	301.06
5	299.58
6	298.23
7	296.92
8	295.79
9	294.63
10	293.45
11	292.26
12	291.07
13	289.86
14	288.65
15	287.41
16	...

$$P\beta =$$

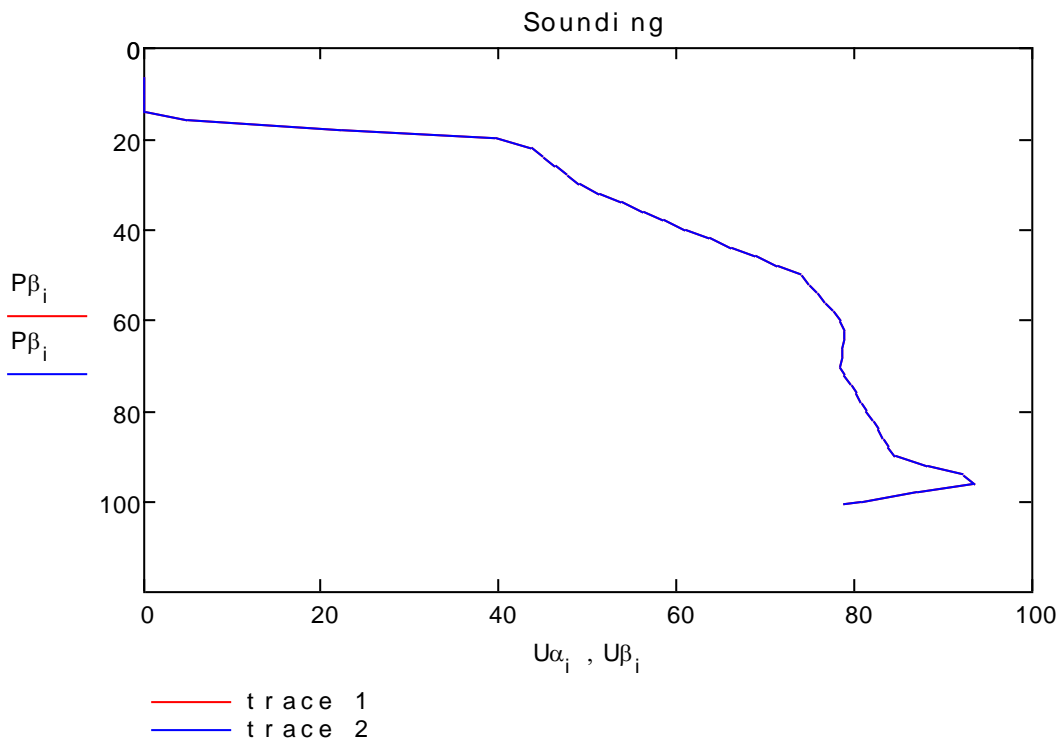
	1
1	100.6
2	100
3	98
4	96
5	94
6	92
7	90
8	88
9	86
10	84
11	82
12	80
13	78
14	76
15	74
16	...

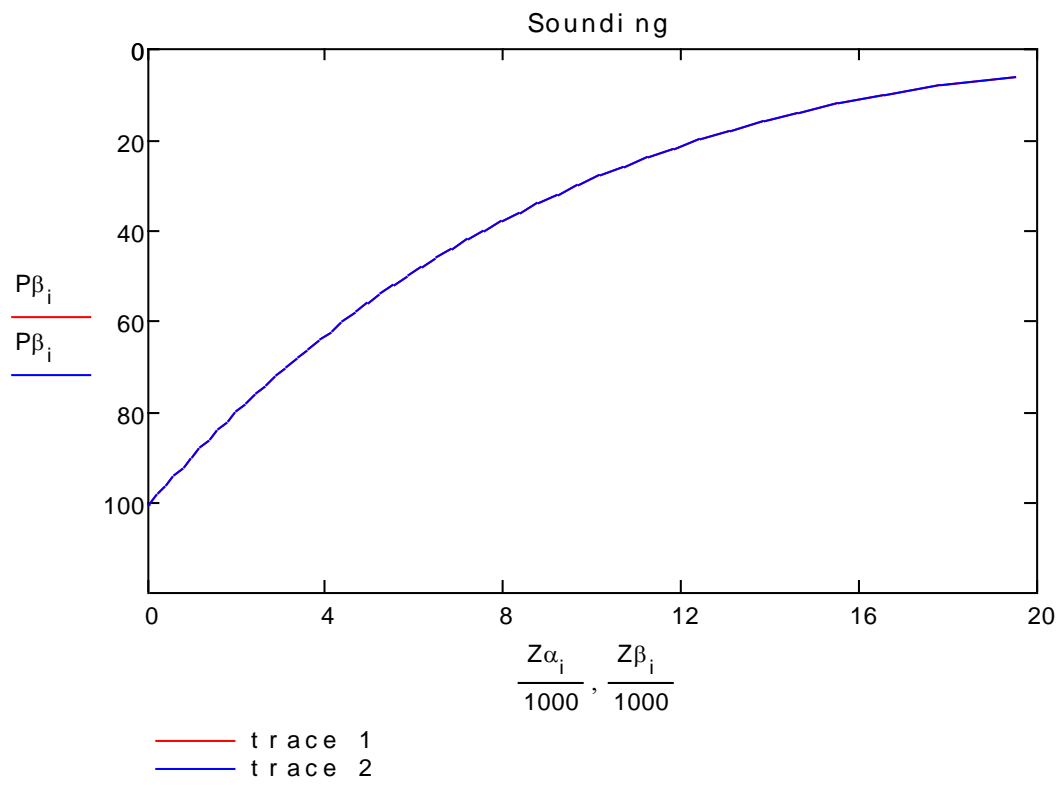
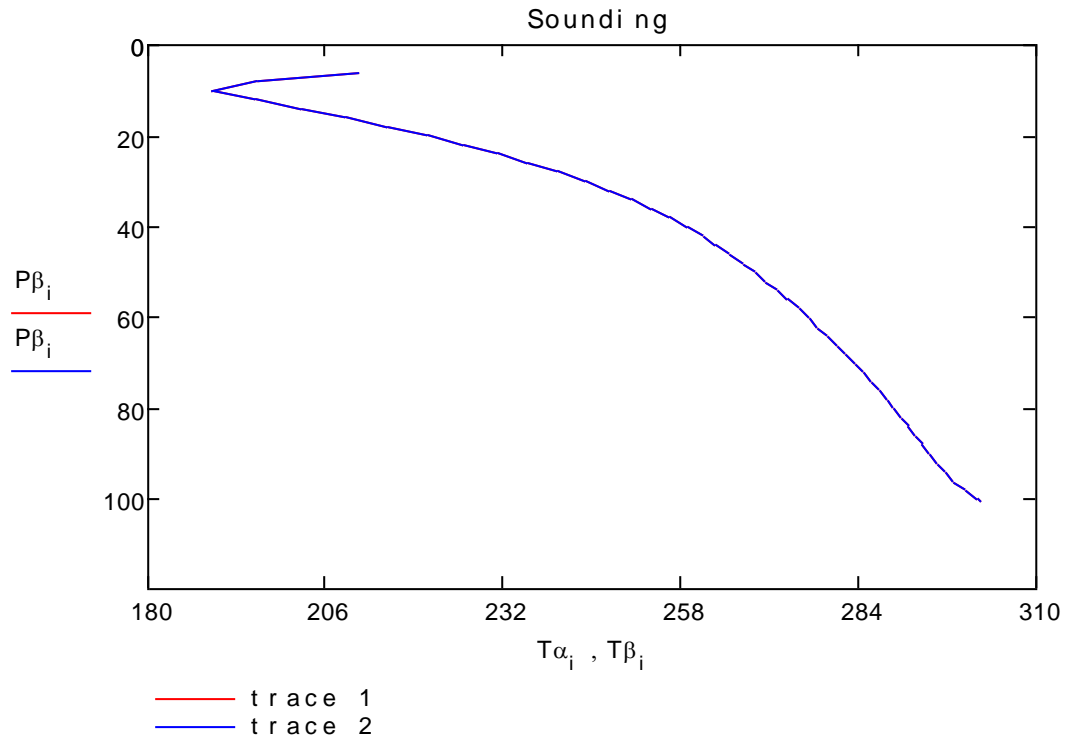
$$H\beta =$$

	1
1	79011.44
2	78413.91
3	76159
4	73528.85
5	68935.74
6	63880.78
7	59360.01
8	56552.7
9	53734.14
10	50944.68
11	48177.99
12	45472.96
13	42831.23
14	40219.37
15	37631.77
16	...

$S\beta = \blacksquare$

	1
1	79011.44
2	78947.87
3	78489.01
4	77679.8
5	74928.86
6	71740.19
7	69114.62
$\mu\beta =$ 8	68239.68
9	67387.79
10	66601.04
11	65874.83
12	65250.19
13	64730.98
14	64285.85
15	63911.5
16	...





Set initial Updraft properties.

Index n designates sounding level starting from the sounding base.

Suffix ω designates properties of parcel rising isentropically without entrainment or separation.

Suffix τ designates properties of parcel rising at constant static-energy without entrainment or separation.

Suffix μ designates updraft property before entrainment.

Suffix ε designates updraft property after entrainment.

Modify the constant in the following equations to investigate sensitivity to initial parcel properties.

$$n := 1$$

$$T_{\mu_n} := T_{\beta_n} + 1$$

$$M_{\mu_n} := M_{\beta_n} + 0.000$$

$$S_{\mu_n} := f_{ST3}(P_{\beta_n}, T_{\mu_n}, M_{\mu_n})$$

$$S_{\mu_n} = 279.88$$

$$S_{\varepsilon_n} := S_{\mu_n}$$

$$T_{\varepsilon_n} := T_{\mu_n}$$

$$M_{\varepsilon_n} := M_{\mu_n}$$

$$T_{\varepsilon_n} = 302.67$$

$$TV_{\mu_n} := f_{TV}(T_{\mu_n}, M_{\mu_n})$$

$$TV_{\varepsilon_n} := TV_{\mu_n}$$

$$M_{\varepsilon_n} \cdot 1000 = 19.72$$

$$H_{\mu_n} := f_{HT3}(P_{\beta_n}, T_{\mu_n}, M_{\mu_n})$$

$$H_{\varepsilon_n} := H_{\mu_n}$$

$$H_{\varepsilon_n} = 80052.52$$

$$\mu_{\mu_n} := f_{\mu4}(P_{\beta_n}, T_{\mu_n}, M_{\mu_n}, Z_{\beta_n})$$

$$\mu\mu_n = 80052.52$$

Calculate Properties of parcel rising isentropically without entrainment or separation:

$$T\omega_i := f \overrightarrow{\text{TSOL}}(S\mu_1, P\beta_i, M\mu_1)$$

$$TV\omega_i := f \overrightarrow{\text{TV3}}(P\beta_i, T\omega_i, M\mu_1)$$

$$dTV\omega := TV\omega - TV\beta$$

$$\mu\omega_i := f \overrightarrow{\mu 4}(P\beta_i, T\omega_i, M\mu_1, Z\beta_i)$$

Calculate work of buoyancy, potential energy of condensed water and total work:

$$WK_i := (\mu\mu_1 - \mu\omega_i)$$

$$WP_i := (f \overrightarrow{\text{MC3}}(P\beta_i, T\omega_i, M\mu_1) \cdot G \cdot Z\beta_i)$$

$$WT := WK + WF$$

Calculate Properties of parcel rising at constant static-energy without entrainment or separation:

$$H\tau_i := H\mu_1 - G \cdot (Z\beta_i - Z\beta_1) \cdot (1 + M\beta_1)$$

$$T\tau_i := f \overrightarrow{\text{THOL}}(H\tau_i, P\beta_i, M\mu_1)$$

$$S\tau_i := f \overrightarrow{\text{ST3}}(P\beta_i, T\tau_i, M\mu_1)$$

$$TV\tau_i := f \overrightarrow{\text{TV3}}(P\beta_i, T\tau_i, M\mu_1)$$

$$dTV\tau := TV\tau - TV\beta$$

Calculate CAPE:

$$\text{CAPE}_j := \left[\text{RA} \cdot \sum_{j=1}^j [(TV\omega_j - TV\beta_j) \cdot [\ln(P\beta_j) - \ln(P\beta_{(j+1)})]] \right]$$

$$H\tau =$$

	1
1	80052.52
2	79518.55
3	77722.07
4	75899.5
5	74048.76
6	72167.12
7	70252.7
8	68303.29
9	66316.76
10	64291.53
11	62225.83
12	60117.75
13	57965.17
14	55765.87
15	53517.48
16	...

$$T\omega =$$

	1
1	302.67
2	302.16
3	300.42
4	298.67
5	296.88
6	295.97
7	295.22
8	294.45
9	293.66
10	292.85
11	292.01
12	291.15
13	290.27
14	289.36
15	288.42
16	...

$$\mu\omega =$$

	1
1	80052.52
2	80050.74
3	80044.59
4	80038.02
5	80032.13
6	80026.75
7	80018.97
8	80009.47
9	79998.84
10	79987.02
11	79974
12	79959.84
13	79944.64
14	79928.47
15	79911.4
16	...

$$T\tau =$$

	1
1	302.67
2	302.16
3	300.43
4	298.68
5	296.9
6	295.97
7	295.23
8	294.46
9	293.67
10	292.86
11	292.03
12	291.18
13	290.3
14	289.4
15	288.46
16	...

$$VK =$$

	1
1	0
2	1.78
3	7.93
4	14.51
5	20.39
6	25.78
7	33.55
8	43.05
9	53.69
10	65.51
11	78.52
12	92.68
13	107.88
14	124.05
15	141.12
16	...

$$CAPE =$$

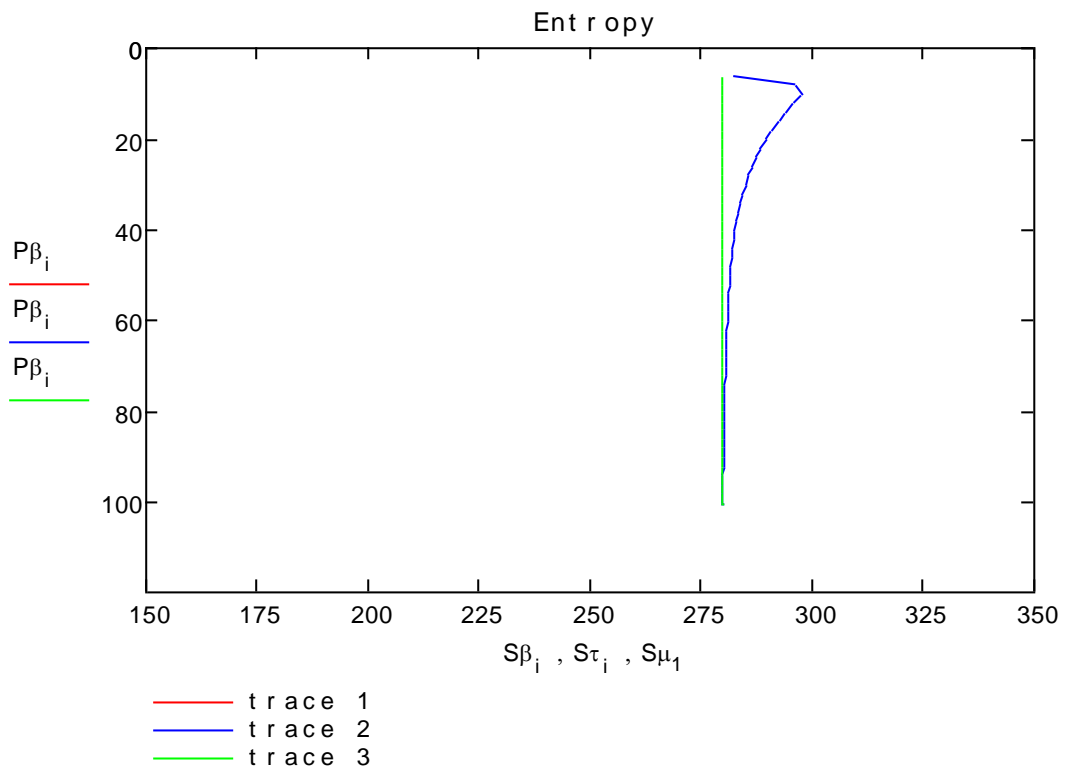
	1
1	1.74
2	7.66
3	13.93
4	20.69
5	25.58
6	32.14
7	41.02
8	50.99
9	62.13
10	74.45
11	87.97
12	102.57
13	118.17
14	134.7
15	152.11
16	...

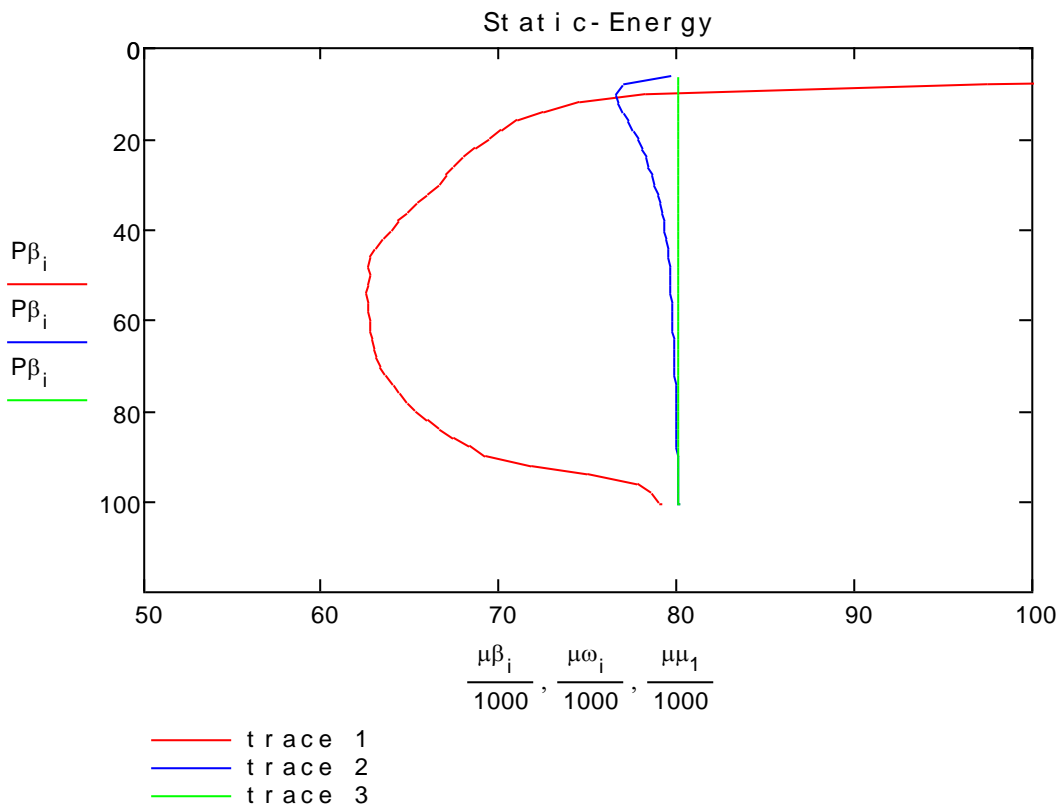
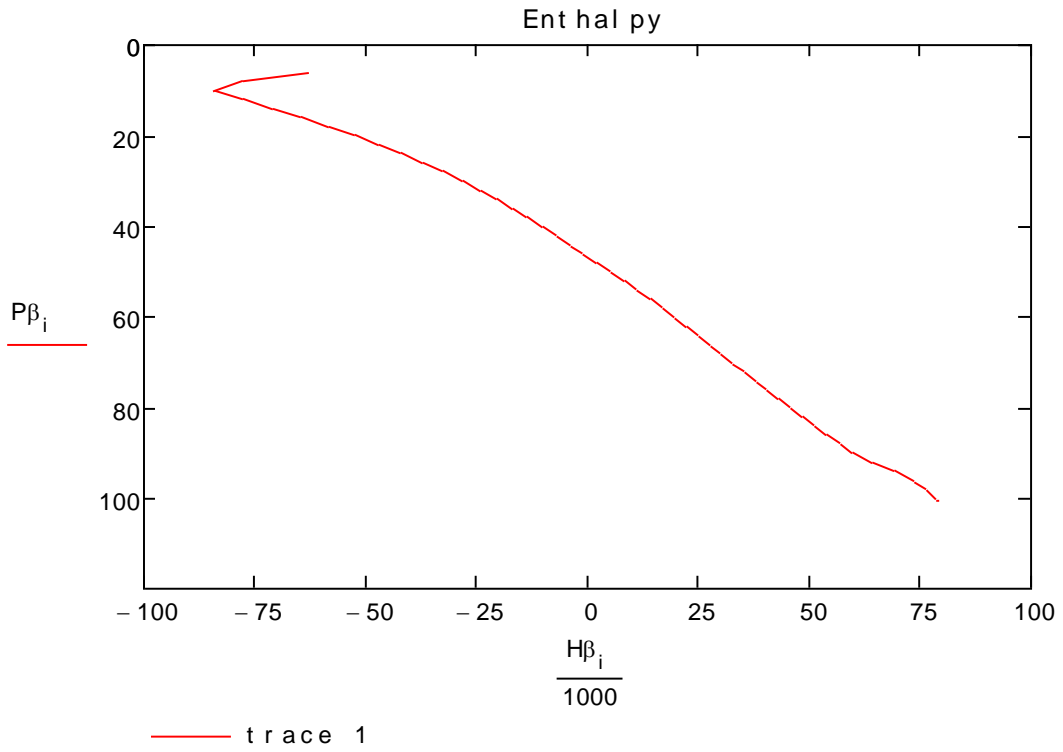
WP =

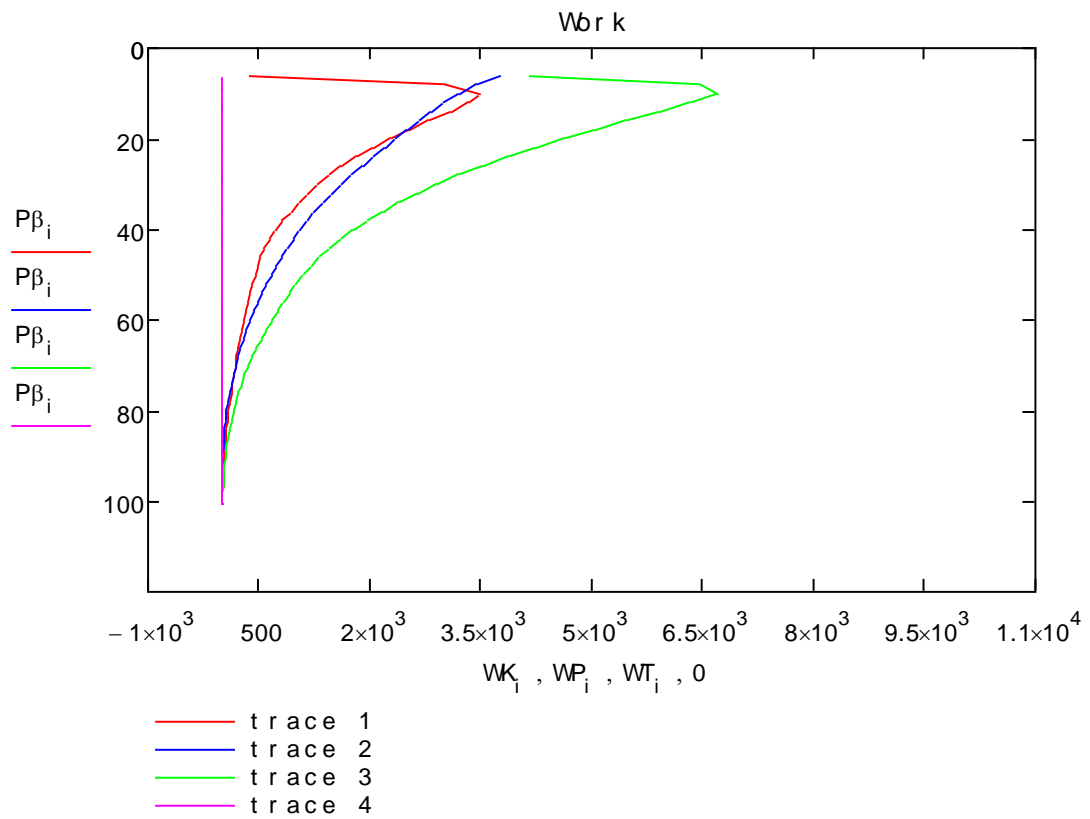
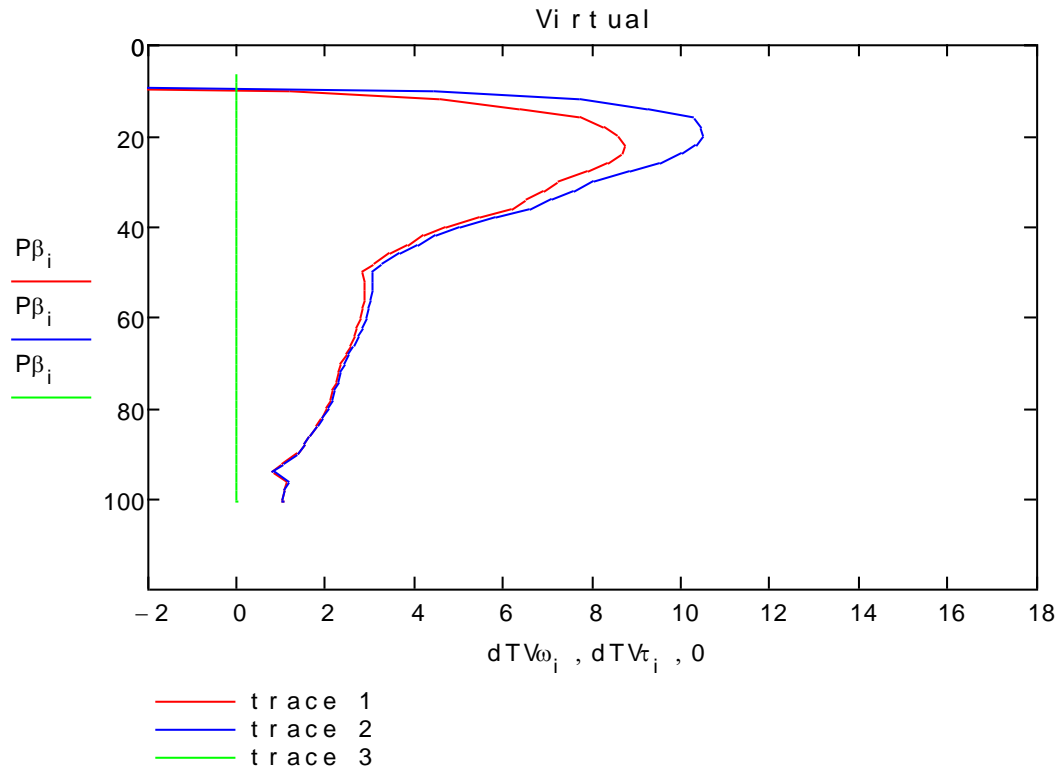
	1
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	2.95
7	8.14
8	15.19
9	24.2
10	35.25
11	48.45
12	63.91
13	81.75
14	102.07
15	125.02
16	...

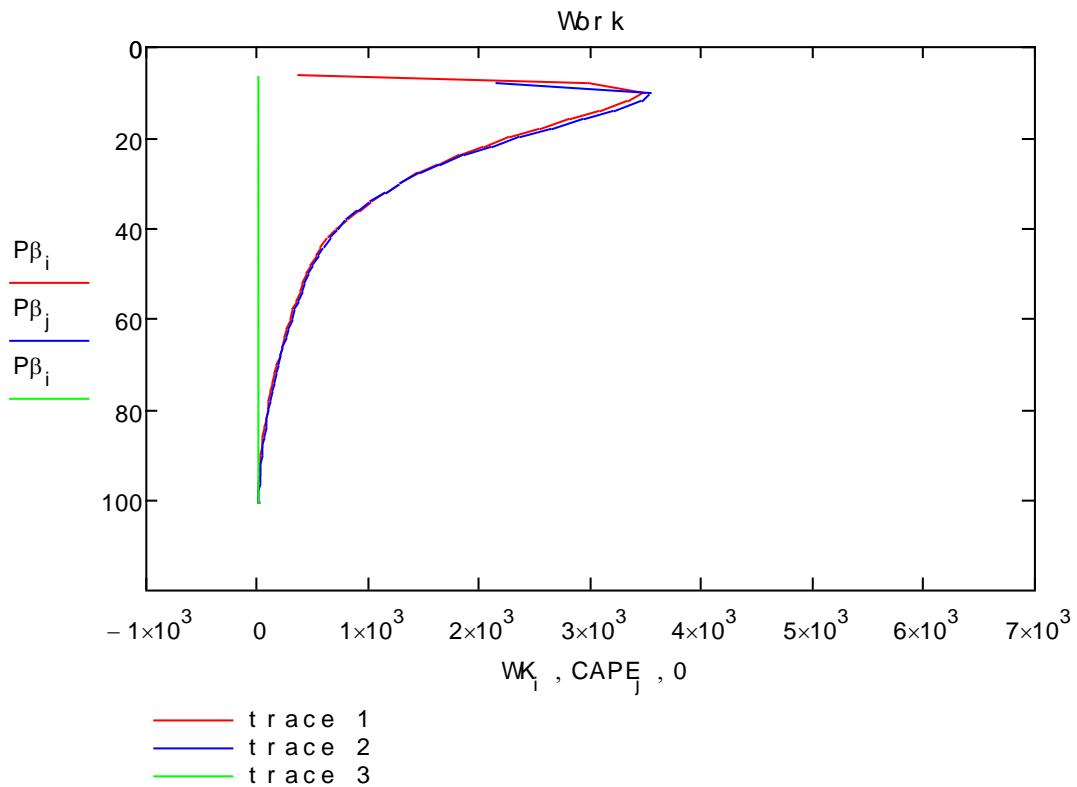
WT =

	1
1	0
2	1.78
3	7.93
4	14.51
5	20.39
6	28.73
7	41.69
8	58.24
9	77.88
10	100.76
11	126.97
12	156.6
13	189.63
14	226.12
15	266.15
16	...









ENTRAINMENT CALCULATIONS

Set the model constants: A entrainment coefficient, B entrainment exponent, C detrainment coefficient, D maximum liquid content, E constant entrainment rate

True Adiabatic: A=0, B=0.5, C=0, D=0.05, E=0

Pseudo Adiabatic: A=0, B=0.5, C=0, D=0, E=0

Constant Entrainment A=0.05, B=0, C=0, D=0, E=0 or A=0, B=0.5, C=0, D=0, E=0.05

Michaud 1999 A=0.1, B=0.5, C=0.01, D=0.05, E=0

Mapes 2000 A=0, B=0.5, C=0, D=0.003, E=0.1

Michaud Rev-2000 A=0.05, B=0.5, C=0.005, D=0.001, E=0

A := 0.05

B := 0.5

C := 0.005

D := 0.001

E := 0.0

pdel := 2

$$\underline{n} := n + 1$$

$$n = 2$$

$$P\beta_n = 100$$

$$T\mu_n := f \text{TSOL}[S\varepsilon_{(n-1)}, P\beta_n, M\varepsilon_{(n-1)}]$$

$$T\mu_n = 302.16$$

$$H\mu_n := f \text{HT3}[P\beta_n, T\mu_n, M\varepsilon_{(n-1)}]$$

$$H\mu_n = 79516.77$$

$$U_n := f \text{U3}[P\beta_n, T\mu_n, M\varepsilon_{(n-1)}]$$

$$U_n = 76.1$$

$$TV\mu_n := f \text{TV3}[P\beta_n, T\mu_n, M\varepsilon_{(n-1)}]$$

$$TV\mu_n = 305.71$$

$$dTV_n := TV\mu_n - TV\beta_n$$

$$dTV_n = 1.02$$

$$dTVP_n := i \cdot f(dTV_n > 0, dTV_n, 0)$$

$$dTVP_n = 1.02$$

$$\underline{e}_n := \text{pdel} \cdot [A \cdot (dTVP_n)^B + E]$$

$$e_n \cdot 100 = 10.1$$

$$f_n := \frac{e_n}{1 + e_n}$$

$$f_n \cdot 100 = 9.18$$

$$M\varepsilon_n := (1 - f_n) \cdot M\varepsilon_{(n-1)} + f_n \cdot M\beta_n$$

$$M\varepsilon_n \cdot 1000 = 19.72$$

$$H\varepsilon_n := (1 - f_n) \cdot H\mu_n + f_n \cdot H\beta_n$$

$$H\varepsilon_n = 79415.55$$

$$T_{\varepsilon_n} := f \text{ THQ}(H_{\varepsilon_n}, P_{\beta_n}, M_{\varepsilon_n})$$

$$T_{\varepsilon_n} = 302.06$$

Remove condensed water in excess of maximum amount:

$$MC_{\varepsilon_n} := f \text{ MC3}(P_{\beta_n}, T_{\varepsilon_n}, M_{\varepsilon_n})$$

$$MC_{\varepsilon_n} \cdot 1000 = 0$$

$$M_{\varepsilon_n} := i f (MC_{\varepsilon_n} > D, M_{\varepsilon_n} + D - MC_{\varepsilon_n}, M_{\varepsilon_n})$$

$$M_{\varepsilon_n} \cdot 1000 = 19.72$$

$$S_{\varepsilon_n} := f \text{ ST3}(P_{\beta_n}, T_{\varepsilon_n}, M_{\varepsilon_n})$$

$$S_{\varepsilon_n} = 279.54$$

$$TV_{\varepsilon_n} := f \text{ TV3}(P_{\beta_n}, T_{\varepsilon_n}, M_{\varepsilon_n})$$

$$TV_{\varepsilon_n} - TV_{\beta_n} = 0.93$$

Repeat entrainment calculation at 2 kPa interval:

$$n := n + 1$$

$$n = 3$$

$$P_{\beta_n} = 98$$

$$T_{\mu_n} := f \text{ TSOL}[S_{\varepsilon_{(n-1)}}, P_{\beta_n}, M_{\varepsilon_{(n-1)}}]$$

$$T_{\mu_n} = 300.33$$

$$H_{\mu_n} := f \text{ HT3}[P_{\beta_n}, T_{\mu_n}, M_{\varepsilon_{(n-1)}}]$$

$$H_{\mu_n} = 77613.48$$

$$U_n := f \text{ U3}[P_{\beta_n}, T_{\mu_n}, M_{\varepsilon_{(n-1)}}]$$

$$U_n = 83.2$$

$$TV_{\mu_n} := f \text{ TV3}[P_{\beta_n}, T_{\mu_n}, M_{\varepsilon_{(n-1)}}]$$

$$TV_{\mu_n} = 303.86$$

$$dTV_n := TV_{\mu_n} - TV_{\beta_n}$$

$$dTV_n = 0.97$$

$$dTVP_n := i \cdot f(dTV_n > 0, dTV_n, 0)$$

$$dTVP_n = 0.97$$

$$e_n := p_{del} \cdot [A \cdot (dTVP_n)^B + E]$$

$$e_n \cdot 100 = 9.83$$

$$f_n := \frac{e_n}{1 + e_n}$$

$$f_n \cdot 100 = 8.95$$

$$M_{\varepsilon_n} := (1 - f_n) \cdot M_{\varepsilon_{(n-1)}} + f_n \cdot M_{\beta_n}$$

$$M_{\varepsilon_n} \cdot 1000 = 19.7$$

$$H_{\varepsilon_n} := (1 - f_n) \cdot H_{\mu_n} + f_n \cdot H_{\beta_n}$$

$$H_{\varepsilon_n} = 77483.26$$

$$T_{\varepsilon_n} := f \cdot THQ(H_{\varepsilon_n}, P_{\beta_n}, M_{\varepsilon_n})$$

$$T_{\varepsilon_n} = 300.25$$

Remove condensed water in excess of maximum amount:

$$MC_{\varepsilon_n} := f \cdot MC3(P_{\beta_n}, T_{\varepsilon_n}, M_{\varepsilon_n})$$

$$MC_{\varepsilon_n} \cdot 1000 = 0$$

$$M_{\varepsilon_n} := i \cdot f(MC_{\varepsilon_n} > D, M_{\varepsilon_n} + D - MC_{\varepsilon_n}, M_{\varepsilon_n})$$

$$M_{\varepsilon_n} \cdot 1000 = 19.7$$

$$S_{\varepsilon_n} := f \cdot ST3(P_{\beta_n}, T_{\varepsilon_n}, M_{\varepsilon_n})$$

$$S_{\varepsilon_n} = 279.11$$

$$TV_{\varepsilon_n} := f \cdot TV3(P_{\beta_n}, T_{\varepsilon_n}, M_{\varepsilon_n})$$

$$TV_{\varepsilon_n} - TV_{\beta_n} = 0.88$$

CONTINUATION OF ENTRAINMENT CALCULATION

The iterative method for calculating entrainment for 2kPa intervals of pressure is omitted for the sake of brevity.

Tabulation of updraft properties:

$$n = 49$$

$$i \ m = 49$$

$$q := 1 \dots i \ n$$

$$TV_{\mu del} q := \overrightarrow{(TV_{\mu q} - TV_{\beta q})}$$

$$TV_{\varepsilon del} q := \overrightarrow{(TV_{\varepsilon q} - TV_{\beta q})}$$

$$M_{\mu(q+1)} := M_{\varepsilon q}$$

$$S_{\mu(q+1)} := S_{\varepsilon q}$$

$$M_{p q} := \text{if} (MC_{\varepsilon q} > D, M_{\varepsilon q} - D + MC_{\varepsilon q}, M_{\varepsilon q})$$

$$TV_{\rho q} := f \ TV3(P_{\beta q}, T_{\varepsilon q}, M_{p q})$$

$$TV_{\rho del} q := \overrightarrow{(TV_{\rho q} - TV_{\beta q})}$$

Condensed water content of the updraft:

$$MC_{\mu q} := f \ MC3(P_{\beta q}, T_{\mu q}, M_{\mu q})$$

$$MC_{\varepsilon q} := f \ MC3(P_{\beta q}, T_{\varepsilon q}, M_{\varepsilon q})$$

Properties of the updraft before entrainment

$$P\beta =$$

	1
1	100.6
2	100
3	98
4	96
5	94
6	92
7	90
8	88
9	86
10	84
11	82
12	80
13	78
14	76
15	74
16	...

$$T\mu =$$

	1
1	302.67
2	302.16
3	300.33
4	298.49
5	296.64
6	295.79
7	294.88
8	293.89
9	292.88
10	291.85
11	290.79
12	289.7
13	288.57
14	287.42
15	286.25
16	...

$$M\mu \cdot 1000 =$$

	1
1	19.72
2	19.72
3	19.72
4	19.7
5	19.66
6	19.54
7	19.28
8	18.89
9	18.5
10	17.84
11	17.15
12	16.45
13	15.76
14	15.08
15	14.42
16	...

$$H\mu =$$

	1
1	80052.52
2	79516.77
3	77613.48
4	75655.23
5	73612.49
6	71409.12
7	68868.45
8	66056.21
9	63244.41
10	60404.47
11	57526.74
12	54618.86
13	51697.81
14	48777.02
15	45859.37
16	...

$$S\mu =$$

	1
1	279.88
2	279.88
3	279.54
4	279.11
5	278.48
6	277.4
7	275.3
8	272.38
9	269.57
10	266.79
11	264
12	261.24
13	258.57
14	256.05
15	253.69
16	...

$$TV\mu_{del} =$$

	1
1	1.01
2	1.02
3	0.97
4	0.94
5	0.53
6	0.81
7	0.99
8	0.9
9	0.83
10	0.83
11	0.83
12	0.8
13	0.75
14	0.69
15	0.63
16	...

	1
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0.42
7	0.8
8	1.12
9	1.43
10	1.48
11	1.48
12	1.48
13	1.49
14	1.49
15	1.5
16	...

$M_{\beta i} \cdot 1000 =$

Properties of the updraft after entrainment:

	1
1	100.6
2	100
3	98
4	96
5	94
6	92
7	90
8	88
9	86
10	84
11	82
12	80
13	78
14	76
15	74
16	...

$P_{\beta} =$

	1
1	302.67
2	302.06
3	300.25
4	298.42
5	296.62
6	295.64
7	294.67
8	293.68
9	292.68
10	291.64
11	290.58
12	289.48
13	288.37
14	287.23
15	286.06
16	...

$T_{\varepsilon} =$

	1
1	19.72
2	19.72
3	19.7
4	19.66
5	19.54
6	19.28
7	18.89
8	18.5
9	17.84
10	17.15
11	16.45
12	15.76
13	15.08
14	14.42
15	13.76
16	...

$M_{\varepsilon} \cdot 1000 =$

$S_{\varepsilon} =$

	1
1	279.88
2	279.54
3	279.11
4	278.48
5	277.4
6	275.3
7	272.38
8	269.57
9	266.79
10	264
11	261.24
12	258.57
13	256.05
14	253.69
15	251.52
16	...

$H_{\varepsilon} =$

	1
1	80052.52
2	79415.55
3	77483.26
4	75467.39
5	73294.31
6	70787.31
7	68009.52
8	65233.67
9	62451.47
10	59614.88
11	56746.81
12	53867.62
13	50990.85
14	48119.43
15	45255.34
16	...

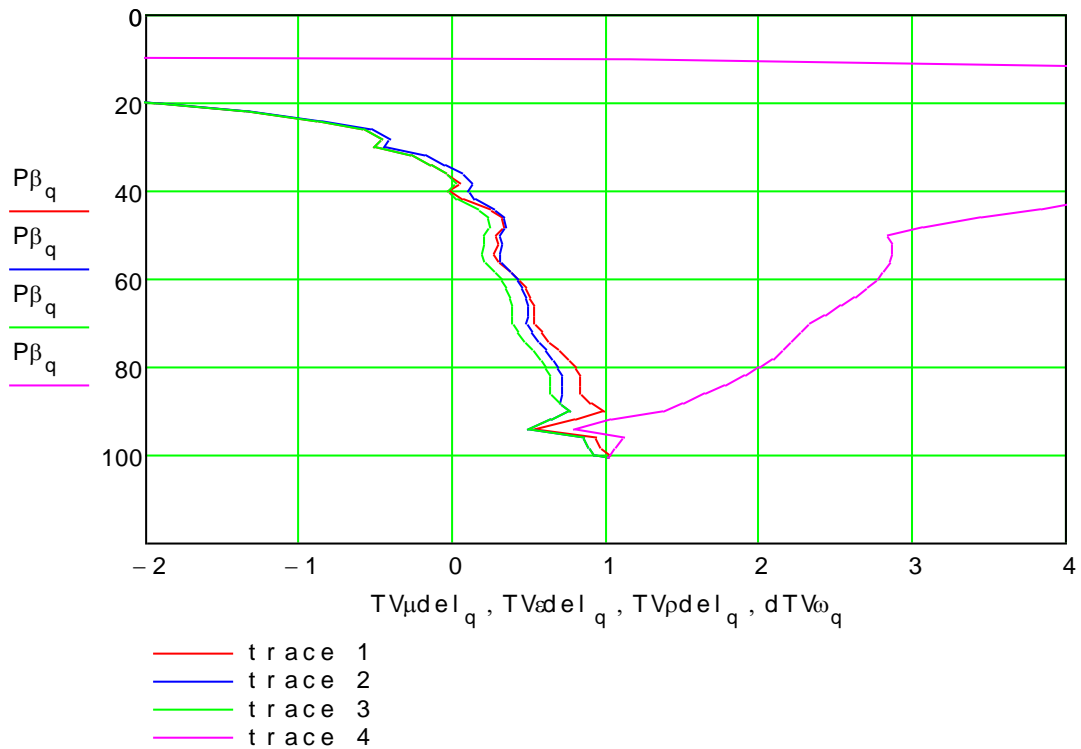
$TV_{\varepsilon del} =$

	1
1	1.01
2	0.93
3	0.88
4	0.86
5	0.5
6	0.65
7	0.77
8	0.69
9	0.71
10	0.72
11	0.71
12	0.69
13	0.65
14	0.61
15	0.55
16	...

$MC_{\varepsilon} \cdot 1000 =$

	1
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0.33
7	0.66
8	0.96
9	1
10	1
11	1
12	1
13	1
14	1
15	1
16	...

VIRTUAL TEMPERATURE EXCESS OF UPDRAFT



DETRAINMENT CALCULATION

Calculate effect of 1% entrainment on updraft properties.

Calculate detrainment.

Suffix λ designates property of mixed updraft with 1% additional entrainment λ is the detrainment.

$$M_{\lambda q} := \overline{[(0.95) \cdot M_{\epsilon q} + 0.05 \cdot M_{\beta q}]}$$

$$H_{\lambda q} := \overline{[(0.95 \cdot H_{\epsilon})_q + 0.05 \cdot H_{\beta q}]}$$

$$T_{\lambda q} := f_{THO} (H_{\lambda q}, P_{\beta q}, M_{\lambda q})$$

$$TV_{\lambda q} := f_{TV3} (P_{\beta q}, T_{\lambda q}, M_{\lambda q})$$

$$C = 0.01$$

$$TV_{\lambda dd} := TV_{\epsilon} - TV_{\lambda}$$

$$\gamma := \overline{\left[\left(-20 \cdot \frac{TV_{\lambda dd}}{TV_{\epsilon del}} + 1.0 \right) \cdot C \cdot p_{del} \right]}$$

If the above equation yields positive detrainment or detrainment greater than 20% set detrainment at -100%.

$$\gamma\gamma_q := \text{if}(\gamma_q < -0.2, -0.2, \gamma_q)$$

$$\gamma\gamma_q := \text{if}(TV\&del_q < 0, -1, \gamma\gamma_q)$$

$$\gamma\gamma_q := \text{if}(\gamma\gamma_q > 0.0, 0, \gamma\gamma_q)$$

	1		1		1			
TV ϵ =	1	306.23	TV λ =	1	306.18	TV $\&del$ =	1	1.01
	2	305.61		2	305.57		2	0.93
	3	303.78		3	303.73		3	0.88
	4	301.92		4	301.87		4	0.86
	5	300.08		5	300.05		5	0.5
	6	298.88		6	298.79		6	0.65
	7	297.69		7	297.58		7	0.77
	8	296.48		8	296.37		8	0.69
	9	295.33		9	295.23		9	0.71
	10	294.17		10	294.07		10	0.72
	11	292.98		11	292.87		11	0.71
	12	291.76		12	291.65		12	0.69
	13	290.52		13	290.41		13	0.65
	14	289.25		14	289.15		14	0.61
	15	287.97		15	287.87		15	0.55
	16	...		16	...		16	...
TV λ dd =	1	0.05	$\gamma \cdot 100 =$	1	0	$\gamma\gamma \cdot 100 =$	1	0
	2	0.05		2	0		2	0
	3	0.04		3	0		3	0
	4	0.04		4	0		4	0
	5	0.02		5	0		5	0
	6	0.09		6	-1.73		6	-1.73
	7	0.11		7	-1.86		7	-1.86
	8	0.11		8	-2.1		8	-2.1
	9	0.1		9	-1.89		9	-1.89
	10	0.1		10	-1.88		10	-1.88
	11	0.1		11	-1.93		11	-1.93
	12	0.11		12	-2.04		12	-2.04
	13	0.1		13	-2.21		13	-2.21
	14	0.1		14	-2.42		14	-2.42
	15	0.1		15	-2.69		15	-2.69
	16	...		16	...		16	...

$m := 2.. i n$

$f a c := \overrightarrow{(e + 1)}$

$f c u m := 1$

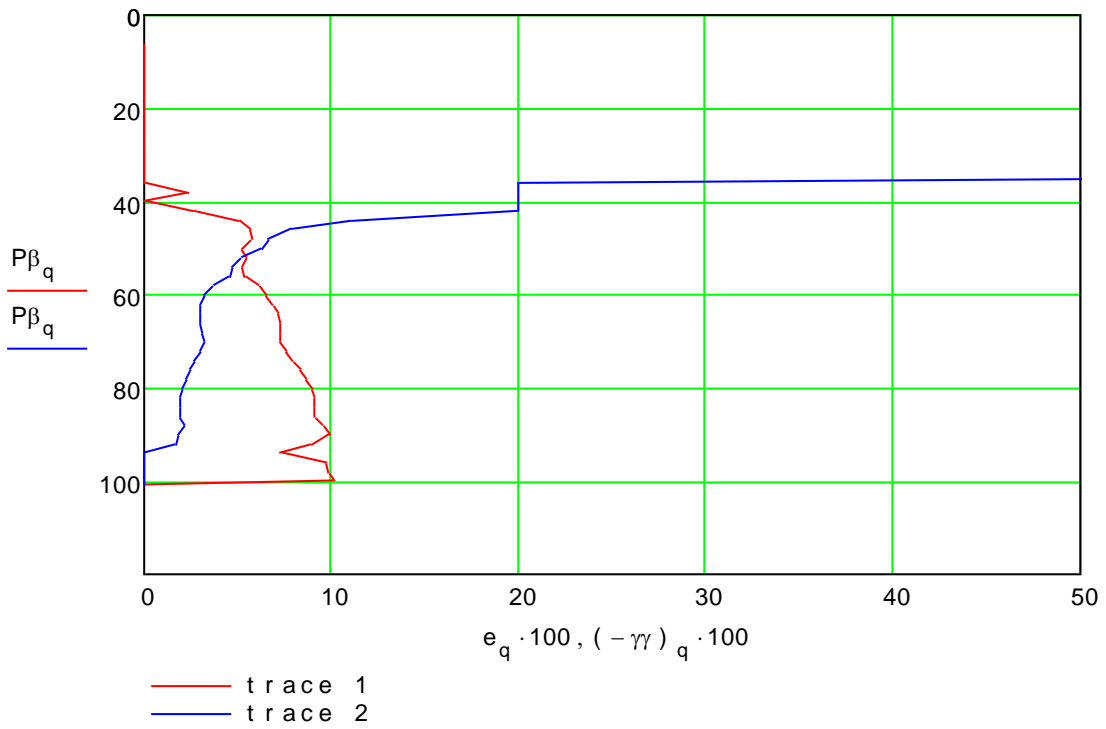
$f c u m_{(m)} := f c u m_{(m-1)} \cdot f a c_{(m)}$

$\gamma a c := (1 + \gamma)$

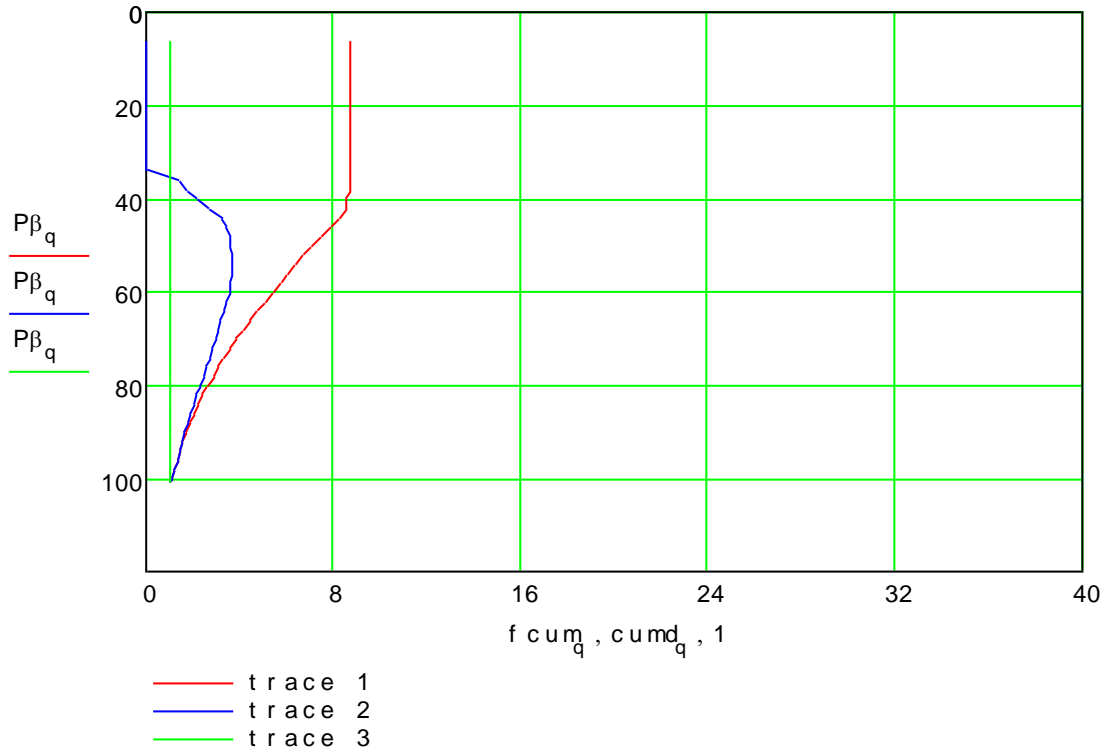
$c u m d_1 := 1$

$c u m d_m := c u m d_{(m-1)} \cdot f a c_m \cdot \gamma a c_r$

PERCENT ENTRAINMENT AND DETRAINMENT



CUMMULATIVE UPDRAFT MASS



	1
1	1
2	1.1
3	1.1
4	1.1
5	1.07
6	1.09
7	1.1
8	1.09
9	1.09
10	1.09
11	1.09
12	1.09
13	1.09
14	1.08
15	1.08
16	...

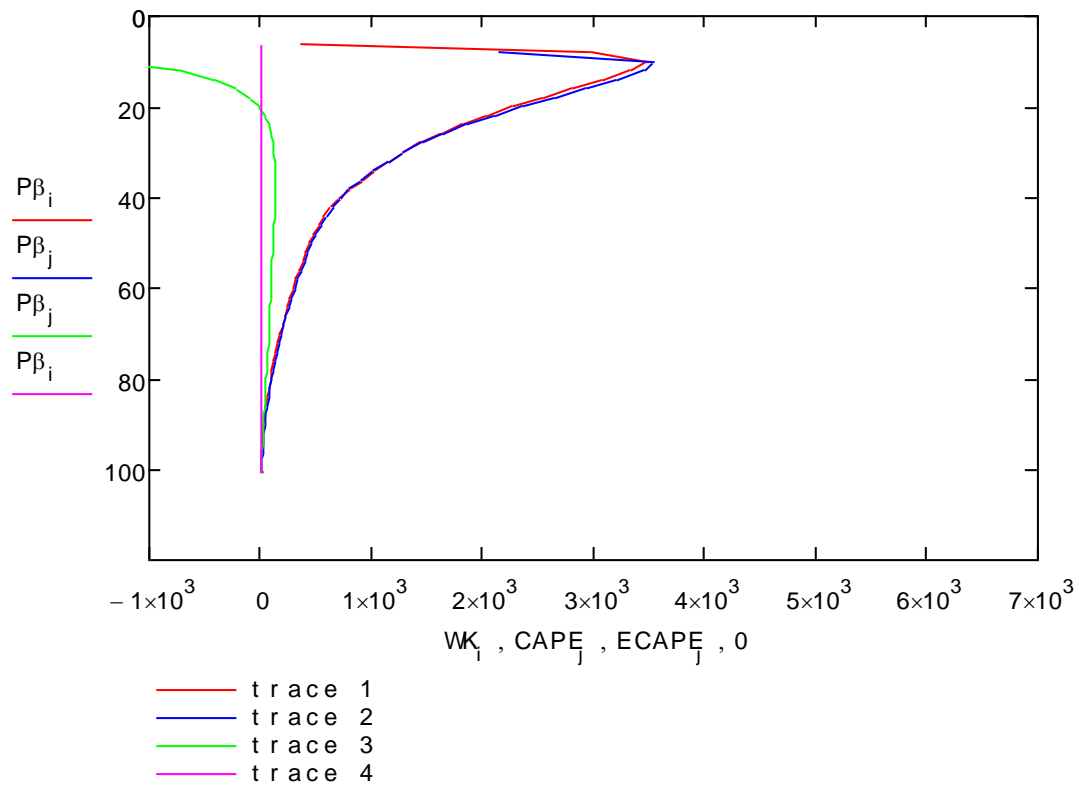
	1
1	1
2	1.1
3	1.21
4	1.33
5	1.42
6	1.55
7	1.71
8	1.87
9	2.04
10	2.22
11	2.42
12	2.64
13	2.87
14	3.11
15	3.36
16	...

	1
1	1
2	1.1
3	1.21
4	1.33
5	1.42
6	1.52
7	1.64
8	1.76
9	1.89
10	2.02
11	2.16
12	2.31
13	2.45
14	2.59
15	2.72
16	...

	1
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	0.98
7	0.98
8	0.98
9	0.98
10	0.98
11	0.98
12	0.98
13	0.98
14	0.98
15	0.97
16	...

$$ECAPE_j := \left[RA \cdot \sum_{j=1}^j \left[(TV_{del_j}) \cdot \left[\ln(P\beta_j) - \ln(P\beta_{(j+1)}) \right] \right] \right]$$

	1
1	1.74
2	7.12
3	12.33
4	17.5
5	20.57
6	24.67
7	29.64
ECAPE=	8 34.22
	9 38.99
	10 43.95
	11 49.02
	12 54.05
	13 58.91
	14 63.55
	15 67.91
	16 ...



Συμπεράσματα

Οι σταθερές της βασικής υπόθεσης $a=0.1$, $b=0.5$ και $c=0.01$ δίνουν λογικά αποτελέσματα και είναι επαρκείς για να εξηγήσουν γιατί η ταχύτητα και η διάμετρος είναι υψηλότερες στα ηπειρωτικά από ότι στα ωκεανικά ανοδικά ρεύματα. Το αποτέλεσμα μιας αλλαγής στα δεδομένα εισόδου ή στις σταθερές του μοντέλου είναι εύκολα προβλέψιμο. Μια αλλαγή της τάξης του 10% σε μια σταθερά, έχει μικρό αντίκτυπο στις ιδιότητες του ανοδικού ρεύματος. Το μοντέλο είναι αρκετά απλό ώστε να επιτρέπει την εκτίμηση της επίδρασης για διεργασίες, που δεν είναι κατανοητές σε βάθος από το μοντέλο, όπως είναι η εισροή κορυφής σύννεφου, τα κατακρημνίσματα, η διάχυση του έργου, η εξατμιστική ψύξη και η ύγρανση του περιβάλλοντος. Οι επαναληπτικοί προσθετικοί υπολογισμοί είναι ισχυροί γιατί μικρή εισροή σε ένα βήμα οδηγεί σε μεγαλύτερη εισροή στον επόμενο.

Το μοντέλο προβλέπει σωστά τη διαφορά εικονικής θερμοκρασίας, το ύψος κορυφής σύννεφων (LNB), το προφίλ της σχετικής μάζας του ανοδικού ρεύματος και το περιεχόμενο σε υγρό νερό. Η σχέση μεταξύ της διαμέτρου και της ταχύτητας του ανοδικού ρεύματος συμφωνεί με τις παρατηρήσεις. Οι βασικές σταθερές του μοντέλου θα πρέπει να υποβληθούν σε εφαρμογή για πολλά δεδομένα και τα αποτελέσματα να συγκριθούν με παρατηρήσεις και άλλα μοντέλα συμπεριλαμβανομένων των μοντέλων επίλυσης σύννεφων (Cloud Resolving Models). Δεδομένα όπως αυτά των Rennó και Williams (1995) ή των Perry και Hobbs (1996) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση των σταθερών του μοντέλου. Οι σταθερές του μοντέλου δε θα έπρεπε να αλλαχθούν πολύ εύκολα γιατί υπάρχουν πολλές ιδιότητες του ανοδικού ρεύματος που θα πρέπει να αντιστοιχιστούν και θα ήταν ίσως πιο σωστό να ενσωματωθούν επιπλέον συντελεστές από το να αλλάξουν οι σταθερές.

Η εργασία προτείνει ένα πολλά υποσχόμενο και ταυτόχρονα απλό μοντέλο, που φαίνεται να επιβεβαιώνει ότι ο λόγος για τον οποίο τα ηπειρωτικά ανοδικά ρεύματα είναι ισχυρότερα, είναι η χαμηλή επιφανειακή υγρασία που έχει σαν αποτελέσματα πρώτων το μεγαλύτερο επίπεδο ανύψωσης συμπυκνώματος, σε ένα βαθύ οριακό στρώμα και δεύτερων την απουσία εξατμιστικής ψύξης για μεγαλύτερο βάθος. Τα ανοδικά ρεύματα είναι ένα από τα πολλά στοιχεία που συνεισφέρουν στην μεταφορά θερμότητας προς τα πάνω στην τροπόσφαιρα. Τα ανοδικά ρεύματα ζεσταίνουν τον περιβάλλοντα αέρα που υποχωρεί αλλά το μεγαλύτερο μέρος της καθίζησης και της θέρμανσης λαμβάνουν χώρα πολύ μακριά από το ανοδικό ρεύμα. Στην κοντινή περιοχή γύρω από το ανοδικό ρεύμα η εξατμιστική ψύξη μάλλον υπερिशύει της θέρμανσης του αέρα που κατακάθεται. [22]

8. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέση ανοδική συναγωγή θερμότητας στο κάτω μέρος της ατμόσφαιρας υπολογίστηκε περίπου στα 150W/m^2 και ο μέσος όρος του έργου που παράγεται στην ατμόσφαιρα είναι 25W/m^2 . Η συνολική μηχανική ενέργεια που παράγεται στην ατμόσφαιρα είναι 12000TWh (25W/m^2), ενώ το συνολικό έργο που παράγεται από τον άνθρωπο είναι 2TWh . Η μηχανική ενέργεια ανά μονάδα μάζας που παράγεται με την άνοδο του αέρα με ένα σύστημα CAPE της τάξης των 1500J/kg , είναι περίπου η ίδια με τη μηχανική ενέργεια που παράγεται από την καταβίβαση ενός χιλιόγραμμου νερού 150m και αυτή η μηχανική ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί προς τα κάτω στην επιφάνεια της Γής. Το έργο που υπολογίστηκε παραπάνω από τεχνικές της επιστήμης της ατμόσφαιρας, όπως το CAPE και η μείωση της συνολικής ενθαλπίας, συμπίπτει με το υπολογιζόμενο έργο από θερμοδυναμικές μεθόδους, όπως είναι η εξίσωση συνολικής ενέργειας και η αρχή του χαμένου έργου. Ειδικότερα η μέθοδος της εξίσωσης συνολικής ενέργειας δεν προβλέπει μόνο την ένταση, αλλά παρέχει και μια εξήγηση για την ενέργεια του ανέμου και για τη μείωση της επιφανειακής πίεσης. Η μηχανική ενέργεια παράγεται όταν η θερμότητα μεταφέρεται προς τα πάνω, με συναγωγή, από τη θάλασσα (θερμή πηγή), στην ανώτερη τροπόσφαιρα (κρύα πηγή). Η κινητική ενέργεια που απελευθερώνεται σε τυφώνες είναι κατά προσέγγιση 20% της θερμότητας που απομακρύνεται από τη θάλασσα, επειδή η απόδοση είναι ουσιαστικά σταθερή. Η απόδοση παραμένει σταθερή, διότι οι θερμοκρασίες της θερμής και της ψυχρής πηγής είναι πρακτικά σταθερές. Η μέθοδος της εξίσωσης συνολικής ενέργειας για τον υπολογισμό της έντασης των τυφώνων είναι πολύ απλούστερη από ό,τι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συνήθως και μας βοηθάει να κατανοήσουμε τη διαδικασία μετατροπής της ενέργειας. Για το λόγο αυτό και η εξίσωση συνολική ενέργειας αποτελεί μια πολύ βασική εξίσωση για τα υπολογιστικά προγράμματα του Michaud.

Είναι προφανές ότι η εκδήλωση των ανεμοστρόβιλοι αποδεικνύει ότι η ηλιακή ακτινοβολία χαμηλής έντασης μπορεί να παράγει πηγές μηχανικής ενέργειας υψηλής συγκέντρωσης. Αυτή η φυσικώς απαντώμενη διαδικασία παραγωγής ενέργειας θα πρέπει, λοιπόν, να είναι δυνατό να ελεγχθεί. Η εκμετάλλευση τόσο σημαντικών πηγών ενέργειας θα μπορούσε να συνεισφέρει αποφασιστικά στην κάλυψη των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών. Η μηχανή ατμοσφαιρικής δίνης είναι μια τέτοια εφαρμογή και η χρήση της σε θερμικά εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής θα αλλάξει άρδην τον παγκόσμιο ενεργειακό χάρτη. Σε ιδανικές συνθήκες, η παραγωγή μιας δίνης μεγέθους dust devil, δεν θα είναι δύσκολη. Ο έλεγχος ισχυρότερων δινών όμως, μεγέθους αντίστοιχου ενός μικρού ανεμοστρόβιλου, θα είναι πιο απαιτητικός. Ο έλεγχος μεγαλύτερων δινών κάτω από όλο και λιγότερο ιδανικές συνθήκες θα αποτελέσει και τη μεγαλύτερη πρόκληση για την εφαρμογή των εγκαταστάσεων δίνης. Η ανάπτυξη της διαδικασίας θα απαιτήσει αποφασιστικότητα και συνεργασία μεταξύ της μηχανικής και διάφορων κλάδων της επιστήμης της ατμόσφαιρας. Θα υπάρξουν σίγουρα δυσκολίες που θα πρέπει να ξεπεραστούν, αλλά δε θα να είναι μεγαλύτερες από ό,τι σε παρόμοιες τεχνικές επιχειρήσεις αντίστοιχου μεγέθους.

Η θεωρητική μελέτη του Michaud για τη μηχανή ατμοσφαιρικής δίνης, όπως παρουσιάζεται και στην παρούσα εργασία, αποδεικνύει ότι η συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να πραγματοποιηθεί. Στην κατεύθυνση της ενίσχυσης του συμπεράσματος αυτού κινούνται

και άλλες μελέτες με σημαντικότερη ίσως αυτή της AVEtec Energy Corporation και του Πανεπιστημίου του Δυτικού Οντάριο (UWO) – Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory (BLWTL). Η μελέτη Computational Fluid Dynamics (CFD) για την AVE αποτελεί τμήμα της εργασίας του μεταπτυχιακού φοιτητή Natarajan Diwakar υπό την επίβλεψη του καθηγητή Horia Hangan (2007). Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με την υποστήριξη της κυβέρνησης του Οντάριο, στον Καναδά, υπό την αιγίδα του Ontario Centers of Excellence (OCE) στα πλαίσια της έρευνας για την εμπορευματοποίηση του προγράμματος της AVE. Η συγκεκριμένη CFD μελέτη υποστηρίζει ότι η τεχνητή δίνη, που παράγεται, δεν θα επηρεάζεται σημαντικά από πλευρικούς ανέμους καθώς η πτώση πίεσης στη βάση της AVE, η οποία είναι υπεύθυνη για την αναρρόφηση του αέρα στο εσωτερικό της AVE και την ηλεκτροπαραγωγή από τα ζεύγη στροβίλου-γεννήτριας που βρίσκονται στις εισόδους, παραμένει σταθερή. Συνεπώς ακόμη και αν ο πλευρικός άνεμος είναι αρκετά ισχυρός ώστε η δίνη να γέρνει, δεν επηρεάζει σημαντικά την ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της AVE.

Συμπληρωματικά των θεωρητικών μελετών, λειτουργούν τα πειραματικά μοντέλα κλίμακας. Οι πειραματικές διατάξεις κλίμακας που έχουν δημιουργηθεί και παρουσιάζονται στο site της AVE (<http://vortexengine.ca/index.shtml>), δείχνουν ότι η κατασκευή και η διαχείριση τεχνικών δινών είναι εφικτή.

Τα υπολογιστικά προγράμματα Mathcad VPS και MPI, όπως τα παρουσιάσαμε προηγουμένως, δείχνουν ότι η απόδοση της AVE ανεβαίνει κατακόρυφα όσο αυξάνουμε τη θερμοκρασία και την υγρασία του εργαζόμενου αέρα. Καταλήγουμε, λοιπόν, ότι ευνοϊκές θέσεις, για την εγκατάσταση σταθμών παραγωγής ενέργειας με δίνη, είναι πιθανότατα περιοχές όπου επικρατούν ελαφριοί άνεμοι και υψηλή ηλιοφάνεια. Αυτές οι συνθήκες θα διευκολύνουν την παραγωγή της δίνης καθώς ο ατμοσφαιρικός αέρας στις περιοχές αυτές έχει υψηλό θερμοδυναμικό φορτίο. Τέτοιες συνθήκες είναι συνήθεις σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη (0°-30°).

Εκτός από τα ενεργειακά οφέλη, η διαδικασία της ελεγχόμενης δίνης έχει τη δυνατότητα να παράγει βροχοπτώσεις στην ευρύτερη περιοχή γύρω από την οποία θα εγκατασταθεί. Παράλληλα θα καθαρίσει την ατμόσφαιρα καθώς έχει τη δυνατότητα να ανακυκλώνει τον ατμοσφαιρικό αέρα. Υπάρχει απροθυμία να προσπαθήσουμε να αναπαράγουμε ένα φαινόμενο τόσο καταστροφικό όσο ο ανεμοστρόβιλος, αλλά η παραγωγή ελεγχόμενων δινών θα μπορούσε στην πραγματικότητα να μειώσει τους κινδύνους εκδήλωσης ακραίων καιφικών φαινομένων, ανακουφίζοντας την ατμοσφαιρική αστάθεια. Η διαδικασία της δίνης θα δεσμεύσει το έργο που διασκορπίζεται λόγω της τριβής από τα ανοδικά ρεύματα και όχι μόνο από τους οριζόντιους ανέμους. Πέρα από το θετικό αντίκτυπο της AVE στο μικροκλίμα της περιοχής, όπου εγκαθίσταται, πρέπει να σταθούμε και στα μακροσκοπικά περιβαλλοντικά οφέλη που αποκομίζουμε από τη λειτουργία μιας εφαρμογής δίνης. Το σημαντικότερο είναι η μείωση της καύσης ορυκτών καυσίμων με άμεση συνέπεια τη μείωση της εκπομπής των λεγόμενων αερίων του θερμοκηπίου. Η μηχανή ατμοσφαιρικής δίνης, λοιπόν, θα βοηθούσε αποφασιστικά στην αναστολή της αύξησης της θερμοκρασίας της Γής, το σημαντικότερο ίσως περιβαλλοντικό πρόβλημα των ημερών μας.

Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους η ατμοσφαιρικής δίνης είναι μια πολλά υποσχόμενη, “πράσινη” εφαρμογή παραγωγής ενέργεια που παραμένει όμως σε θεωρητικό και πειραματικό στάδιο. Κρίνουμε, επομένως, ότι μια επένδυση για την κατασκευή εγκαταστάσεων δίνης θα ήταν το επόμενο βήμα για την καθιέρωση αυτής της ενεργειακής τεχνολογίας, καθώς οι πιθανότητες επιτυχίας ενός τέτοιου εγχειρήματος είναι εξαιρετικά υψηλές.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Edward Aguado and James E. Burt, Understanding Weather and Climate, 5th Edition
- [2] Hisashi Ozawa, Atsumu Ohmura, Ralph D. Lorenz and Toni Pujol, The Second Law of Thermodynamics and The Global Climate System: A Review of The Maximum Entropy Production Principle
- [3] Olivier Pauluis and Isaac M. Held, Entropy Budget of an Atmosphere in Radiative–Convective Equilibrium. Part I: Maximum Work and Frictional Dissipation, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 59, No 2
- [4] Olivier Pauluis and Isaac M. Held, Entropy Budget of an Atmosphere in Radiative–Convective Equilibrium. Part II: Latent Heat Transport and Moist Processes, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 59
- [5] Nilton O. Renno and Andrew P. Ingersoll, Natural Convection as a Heat Engine: A Theory for CAPE, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 53, No 4
- [6] Lloyd L. Schulman, A Theoretical Study of the Efficiency of the General Circulation, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 34, No 4
- [7] J. M. Fritsch, J. D. Murphy and J. S. Kain, Warm Core Vortex Amplification over Land, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 51, No 13
- [8] J. Li, Petr Chylek and G. B. Lesins, Entropy in Climate Models. Part I: Vertical Structure of Atmospheric Entropy Production
- [9] J. Parks Camp and Michael T. Montgomery, Hurricane Maximum Intensity: Past and Present, Monthly Weather Review, Vol. 129
- [10] Valery Shikhirin, Synergy of Atmosphere and Tornado as Natural Self-torus Mechanisms
- [11] Brian H. Fiedler and Richard Rotunno, A Theory for the Maximum Windspeeds in Tornado-like Vortices, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 43, No 21
- [12] Greg J. Holland, The Maximum Potential Intensity of Tropical Cyclones
- [13] Diwakar Natarajan, Numerical Simulation of Tornado-like Vortices, 2011, University of Western Ontario - Electronic Thesis and Dissertation Repository, Paper 89
- [14] Kerry A. Emanuel and Marja Bister, Moist Convective Velocity and Buoyancy Scales, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 53, No 22

- [15] M. Bister and K. A. Emanuel, Dissipative Heating and Hurricane Intensity, *Meteorology and Atmospheric Physics* 65, 1998
- [16] Richard Rotunno and Kerry A. Emanuel, An Air-Sea Interaction Theory for Tropical Cyclones. Part II: Evolutionary Study Using a Nonhydrostatic Axisymmetric Numerical Model, *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 44, No 3
- [17] Kerry A. Emanuel, The Maximum Intensity of Hurricanes
- [18] Edgar L. Andreas and Kerry A. Emanuel, Effects of Sea Spray on Tropical Cyclone Intensity
- [19] Brian Tang and Kerry Emanuel, Midlevel Ventilation's Constraint on Tropical Cyclone Intensity
- [20] R. Jeffrey Trapp and Robert Davies-Jones, Tornadogenesis with and without a Dynamic Pipe Effect
- [21] Michaud L.M., Proposal for the use of a controlled tornado-like vortex to capture the mechanical energy produced in the atmosphere from solar energy, *BAMS* 1975, vol. 56, 536.
- [22] Michaud L.M., Entrainment and Detrainment required to explain updraft properties and work dissipation, *Tellus* 1978, vol. 50A, pp. 241-251
- [23] Michaud L.M., Vortex process for capturing mechanical energy during upward heat convection in the atmosphere, *Applied Energy*, 1999, vol. 62/4, pp. 241-251
- [24] Michaud L.M., Thermodynamic cycle of the atmospheric upward heat convection process, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2000, vol. 72, pp. 29-46
- [25] Michaud L.M., Total energy equation method for calculating hurricane intensity, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2001, vol. 78, issue 1/2 pp. 35-43
- [26] Michaud L.M., Heat to work conversion during upward heat convection. Part I: Carnot engine method. *Atmospheric Research*, Vol. 39, Pg. 157-178, 1995.
- [27] Michaud L.M., Heat to work conversion during upward heat convection. Part II: Internally generated entropy method. *Atmospheric Research*, Vol. 41, Pg. 93-108, 1996.
- [28] Byram G.M. and Martin R.E., Fire whirls in the laboratory, *Fire Control Notes*, 1962, US Fire Service
- [29] Mullett L.B., The solar chimney overall efficiency, design and performance, *International journal of Ambient Energy*, 1987, vol. 8(1), pp. 35-40
- [30] Ξενοφών Κακάτσιος, Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης, Αθήνα 2006
- Μαλλιωτάκης Ευάγγελος, Συστήματα ανοικτού κύκλου με υγρό αφυγραντικό υλικό, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π. Αθήνα 2011

[31] Michaud L.M., Vortex Engine web site <http://vortexengine.ca/>

[32] Lucas C, Zipser EJ, LeMone MA., Convective available energy in the environment of oceanic and continental clouds, J Atmos Sci, 1994.

[33] McBride JL, Frank WM., Relationships between stability and monsoon convection. J Atmos Sci, 1999.

[34] Michaud L.M., Comments on "Convective Available Potential Energy in the Environment of Oceanic and Continental Clouds". American Meteorological Society, 1996.

[35] Michaud L.M., Atmospheric Vortex Engine, Patent Number: US 7086823 B2, August 8 2006.

[36] Lawrence E. Cornwell, Jr., Splash bar for cooling tower, Patent Number: US 5454987 A, October 3 1995.

Marley Cooling Tower Publications <http://www.marleyct.com/publications.asp>

Cooling tower Glossary <http://www.cti.org/whatis/glossary.shtml>

www.wikipedia.org