



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Θερμότητας
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής**

Ακαδημαϊκό έτος 2009 - 2010

Διπλωματική Εργασία με θέμα
*«Πειραματική και Τεχνική Αξιολόγηση
Διατάξεων Εξατμιστικής Ψύξης»*

Επιμέλεια

Ιωάννης Θ. Μωραΐτης (Α.Μ. 021 04054)

Επίβλεψη

Καθηγητής Εμμανουήλ Ρογδάκης

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής κατά το εαρινό εξάμηνο του ακαδημαϊκού έτους 2009 – 2010.

Για την εκπόνηση και παρουσίαση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω λογισμικό:

- Microsoft Word
- Microsoft Excel
- Microsoft Powerpoint
- PTC Mathcad
- SUPCO Logger Interface

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή: Κλιματισμός & Εξοικονόμηση ενέργειας.....5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Εξατμιστική Ψύξη.....9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Κύκλος του Maisotsenko.....25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Εφαρμογές της εξατμιστικής ψύξης.....31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Πειραματικές μετρήσεις στην ψυκτική μονάδα.....37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Υπολογιστική επίλυση του κύκλου του Maisotsenko.....63

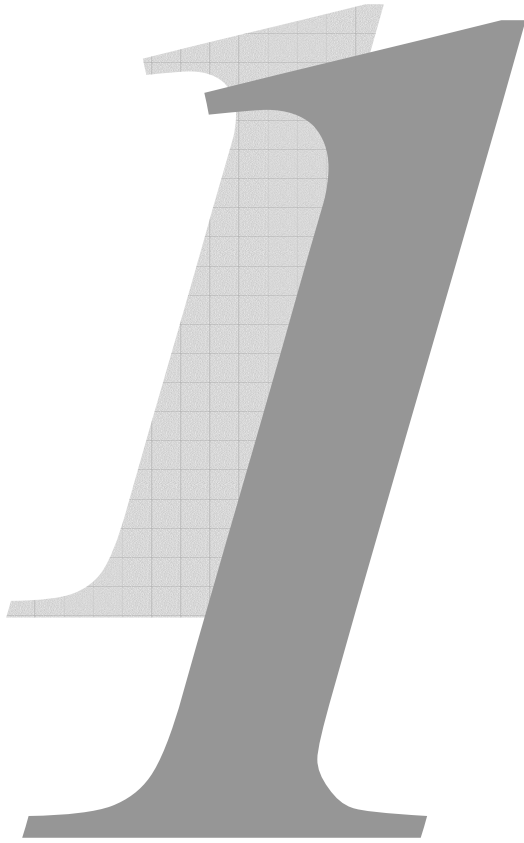
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

Συμπεράσματα - Σχόλια.....77

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αρχεία Υπολογιστικής Επίλυσης.....81

Βιβλιογραφικές Αναφορές.....125



Εισαγωγή:
Κλιματισμός & Εξοικονόμηση ενέργειας
Κλιματισμός & Εξοικονόμηση ενέργειας

Στην Ελλάδα, χώρα μεσογειακή με μικρές σχετικά απαιτήσεις σε θέρμανση, οι ανάγκες για θέρμανση των κατοικιών ανέρχονται περίπου στο 70% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Η κατανάλωση ενέργειας για τις οικιακές συσκευές, το φωτισμό και τον κλιματισμό ανέρχεται στο **18%** του συνολικού ενεργειακού ισοζυγίου. Οι κατοικίες με κεντρικό σύστημα θέρμανσης, το οποίο χρησιμοποιεί ως καύσιμο αποκλειστικά το πετρέλαιο αντιστοιχούν στο **35,5%** του συνόλου. Το υπόλοιπο **64%** είναι αυτόνομα θερμαινόμενες κατοικίες που χρησιμοποιούν σε ποσοστό **25%** πετρέλαιο, **12%** ηλεκτρισμό και **18%** καυσόξυλα.

Στην εποχή της κλιματικής αλλαγής και της υπερθέρμανσης του πλανήτη που οι συμβατικοί τρόποι κατασκευής αποδεδειγμένα συμβάλλουν κατά 40% στην παραγωγή των αερίων του θερμοκηπίου, το νερό λιγοστεύει και τα μετεωρολογικά φαινόμενα γίνονται όλο και πιο ακραία, ο κόσμος ψάχνει τόσο για εναλλακτικές μεθόδους εφαρμογής συμβατικών συστημάτων, καθώς και για νέους τρόπους σύνθεσης και εφαρμογής πηγών εξοικονόμησης ενέργειας, οικολογικών υλικών και νέων τεχνολογιών ώστε να μπει φρένο στη ραγδαία περιβαλλοντική φθορά του πλανήτη μας.

Η Ευρώπη έχει θέσει ορισμένους στόχους για τα επόμενα χρόνια προκειμένου να βελτιώσει τις ενεργειακές της επιδόσεις και να συμβάλει ταυτόχρονα στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Για την επίτευξή τους έχουν εκδοθεί συγκεκριμένες οδηγίες, τις οποίες οι χώρες - μέλη της ΕΕ οφείλουν να ενσωματώσουν στο εθνικό τους δίκαιο.

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, ως το 2010 έχει επιτευχθεί εξοικονόμηση της τάξης του 22% στην ενέργεια που χρησιμοποιείται για θέρμανση, κλιματισμό, ζεστό νερό και φωτισμό. Η χρήση της ενέργειας για κλιματισμό αναμένεται να διπλασιαστεί ως το 2020, μπορεί όμως να επιτευχθεί **25%** εξοικονόμηση από τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων κλιματισμού. Ο φωτισμός καταναλώνει το **14%** της συνολικής ενέργειας του κτιριακού τομέα. Με τη χρήση πιο αποδοτικών εξαρτημάτων και συστημάτων ελέγχου και με την ενσωμάτωση τεχνικών φυσικού φωτισμού και άλλων τεχνολογιών μπορεί να έχουμε εξοικονόμηση **30-50%**. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός, τα παθητικά και ενεργητικά ηλιακά συστήματα, ο φυσικός φωτισμός και ο φυσικός δροσισμός μπορούν να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση κατά **60%** σε ένα μέσο Ευρωπαϊκό κτίριο. Παράλληλα, 10 εκατομμύρια οικιακοί λέβητες στην ΕΕ είναι παλαιότεροι των 20 ετών. Η αντικατάστασή τους μπορεί να εξοικονομήσει **5-10%** της ενέργειας θέρμανσης. Τέλος, οι τοπικά διαθέσιμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η συμπαραγωγή θερμότητας/ηλεκτρισμού, η τηλεθέρμανση και οι αντλίες θερμότητας έχουν επιπρόσθετο δυναμικό εξοικονόμησης.

Στην Ελλάδα η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια παρουσιάζει αυξητική τάση, λόγω της αύξησης της χρήσης κλιματιστικών και μικροσυσκευών. Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι σημαντική παράμετρος στη διαμόρφωση της εθνικής ενεργειακής πολιτικής, η

οποία περιλαμβάνει ως στόχο, μεταξύ άλλων, και τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα από τον κτιριακό τομέα.^[9]

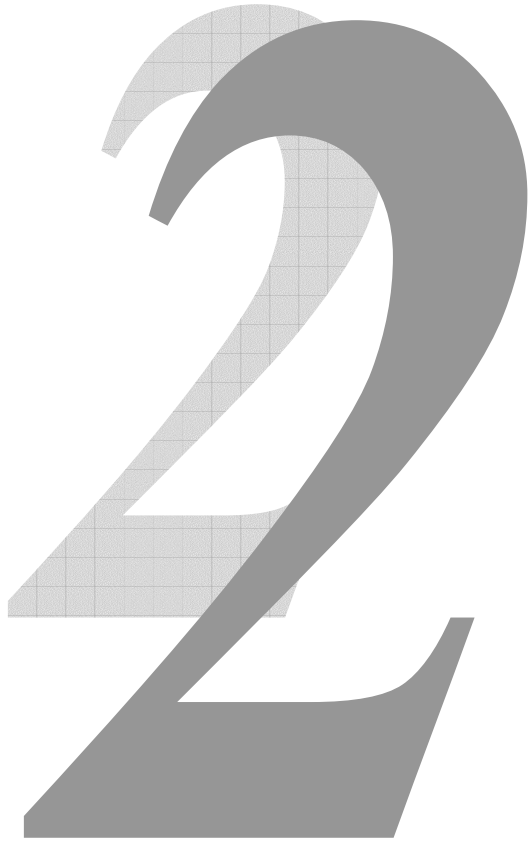
Όσον αφορά τον κλιματισμό που είναι το αντικείμενο που εξετάζουμε, τα συμβατικά κλιματιστικά καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας και μάλιστα στις ώρες αιχμής κοστίζουν ακριβά στη λειτουργία τους. Επί πλέον, ρυπαίνουν, αλλά και θερμαίνουν το περιβάλλον. Υπάρχουν παραπλανητικές διαφημίσεις που παρουσιάζουν τα κλιματιστικά ως πανάκεια και ιδιαίτερα κάποιες τα παρουσιάζουν ως «εξοικονομητές» ενέργειας και χρημάτων. Απλά ορισμένα είναι λιγότερο ενεργοβόρα από άλλα.

Στην Ελλάδα είναι ήδη εγκατεστημένα 3 εκατομμύρια κλιματιστικά, ενώ κάθε χρόνο προστίθενται 350.000 νέα. Για να εξυπηρετηθούν τα 350.000 νέα κλιματιστικά, απαιτείται από δω και στο εξής η κατασκευή κάθε χρόνο ενός νέου σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ισχύος **400MW** περίπου. Η κατασκευή ενός τέτοιου σταθμού κοστίζει **200-300 εκατ.€**, δηλαδή τα διπλάσια απ' όσο ξοδεύουν αθροιστικά οι καταναλωτές για την απόκτηση των κλιματιστικών. Με άλλα λόγια, για κάθε ευρώ που ξοδεύεται για την αγορά κλιματιστικών, χρειάζονται 2 επιπλέον ευρώ για την κατασκευή νέων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής για την εξυπηρέτηση αυτών των κλιματιστικών και μόνο.

Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, τα κλιματιστικά επιβαρύνουν σημαντικά το κλίμα του πλανήτη, καθώς διαθέτουν ψυκτικά μέσα, τα οποία είναι ισχυρότατα αέρια του θερμοκηπίου. Επίσης, όσο αυξάνεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο αυξάνονται και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, από ρυπογόνες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, που λειτουργούν με λιγνίτη, όπως στη Μεγαλόπολη και την Πτολεμαΐδα ή με πετρέλαιο, όπως στο σύνολο των νησιών του Αιγαίου.

Σε κοινωνικοοικονομικό επίπεδο, η χρήση κλιματιστικών ευθύνεται για τους εξαιρετικά αυξημένους λογαριασμούς του ρεύματος που καλείται ο καταναλωτής να πληρώσει στη ΔΕΗ. Επίσης, η μαζική και υπερβολική χρήση κλιματιστικών κατά τις πιο ζεστές μέρες του καλοκαιριού, ενισχύει την πιθανότητα να βρεθεί το σύστημα εκτός λειτουργίας με καταστροφικές οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες.^[10]

Μία σημαντική λύση στο ενεργειακό πρόβλημα που προκύπτει, λόγω της ανάγκης του κλιματισμού και της θερμικής άνεσης στους εσωτερικούς χώρους ή γενικότερα της ψύξης του αέρα για ποικίλες εφαρμογές, είναι η εξατμιστική ψύξη. Η μέθοδος αυτή και τα πλεονεκτήματά της αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια.



Εξοτιοτική Ψύξη

Όταν το υγρό εξατμίζεται και μετατρέπεται σε υδρατμό, η θερμότητα που χρησιμοποιείται για την διαδικασία της εξάτμισης αφαιρείται από τον αέρα με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία του.

Οι εξατμιστικοί ψύκτες είναι γενικά αποτελεσματικοί σε κλίματα χαμηλής υγρασίας και καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια σε σχέση με τους άλλους τύπους κλιματιστικών συσκευών. Τα πλεονεκτήματά τους είναι τα εξής:

- ◆ Εξοικονόμηση ενέργειας
- ◆ Μείωση της αιχμής του φορτίου ζήτησης
- ◆ Βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα
- ◆ Σχετικά εύκολη τοποθέτηση των συστημάτων
- ◆ Ευρεία ποικιλία πακέτων είναι διαθέσιμα
- ◆ Παρέχουν ύγρανση και αφύγρανση όταν χρειάζεται
- ◆ Εύκολα στην χρήση με άμεσο ψηφιακό έλεγχο.
- ◆ Μείωση των ρυπογόνων εκπομπών
- ◆ Αποφυγή της χρήσης χλωροφθορανθράκων (CFC).

Οι εξατμιστικοί ψύκτες μπορούν να είναι άλλοτε άμεσοι και άλλοτε έμμεσοι. Παρακάτω γίνεται η ανάλυση των δύο ειδών ψύξης αλλά και του συνδυασμού τους.

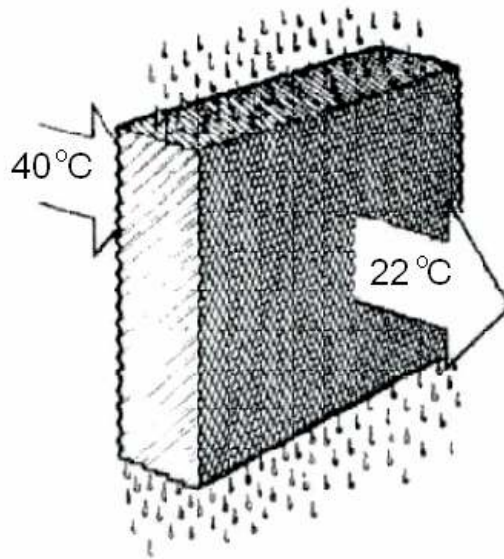
2.1 Άμεση εξατμιστική ψύξη

Στην άμεση εξατμιστική ψύξη το νερό εξατμίζεται απ' ευθείας σ' ένα τροφοδοτούμενο ρεύμα αέρος, μειώνοντας την θερμοκρασία ξηρής σφαίρας του αέρα και αυξάνοντας την υγρασία του. Η λανθάνουσα θερμότητα του αέρα χρησιμοποιείται για να εξατμιστεί το νερό, έτσι η εξάτμιση ψύχει τον αέρα ενώ αυξάνεται η σχετική υγρασία του.

Η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια με τον ιδρώτα του δέρματός μας, όπου το σώμα μας κρυώνει μέσω της εξάτμισης της υγρασίας (ιδρώτα). Σε υγρά περιβάλλοντα η διαδικασία της άμεσης εξατμιστικής ψύξης δεν λειτουργεί καλά για την ανθρώπινη άνεση, διότι ο αέρας είναι πολύ κοντά στο κορεσμό του. Οπότε προσθέτοντας υγρασία δεν χαμηλώνει σημαντικά η θερμοκρασία του αέρα. Παρόμοια όταν το σώμα ιδρώνει τις ζεστές και υγρές μέρες, δεν νιώθουμε να δροσιζόμαστε επειδή η υγρασία από το δέρμα μας δεν εξατμίζεται γρήγορα.

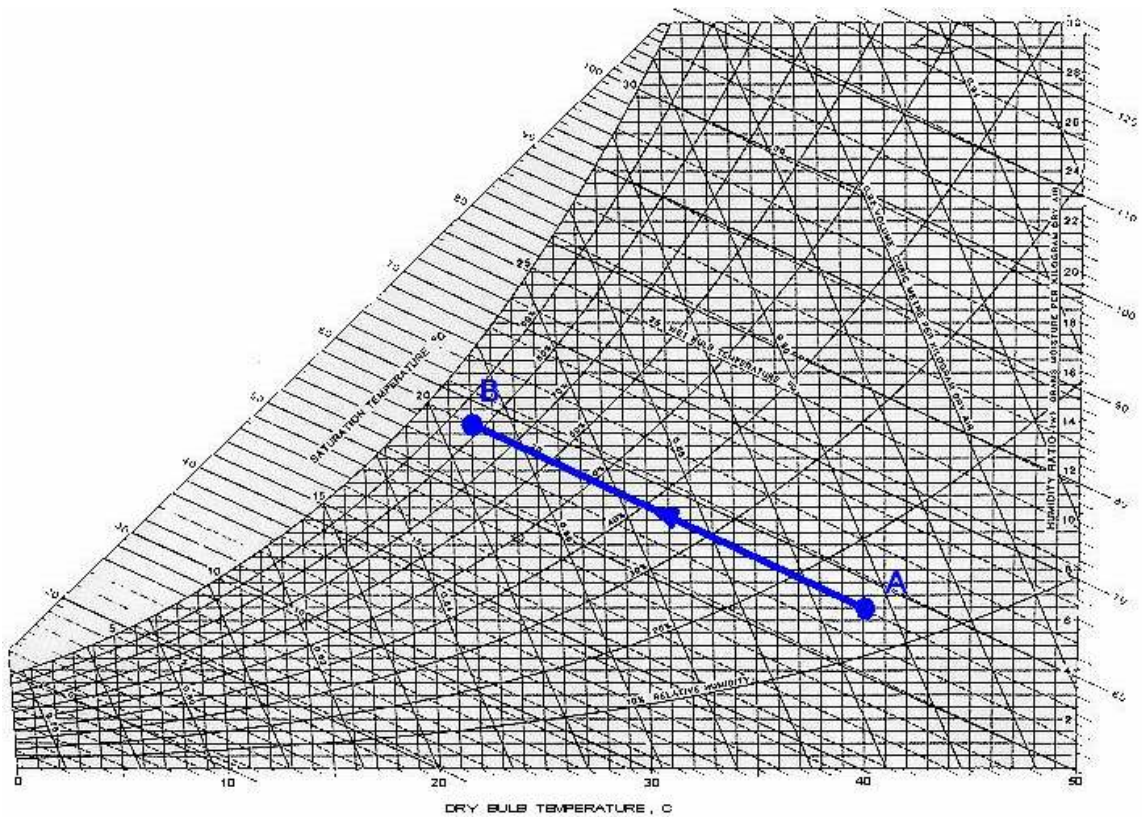
Στους άμεσους εξατμιστικούς ψύκτες το ρεύμα αέρος είναι σε άμεση επαφή με το νερό μέσω του ψεκάσμού του ή με κάποιο εμποτισμένο υλικό όπως υαλοβάμβακας, ύφασμα ή σφουγγάρι.^[3]

Στο παρακάτω **σχήμα 1** φαίνεται πως το ρεύμα αέρος διαπερνά ένα υγρό μέσο και η θερμοκρασία του πέφτει από τους 40 °C στους 22 °C.



Σχήμα 1: Διαδικασία άμεσης εξατμιστικής ψύξης

Στο **σχήμα 2** υπάρχει η ψυχομετρική ανάλυση της διαδικασίας της εξατμιστικής ψύξης.



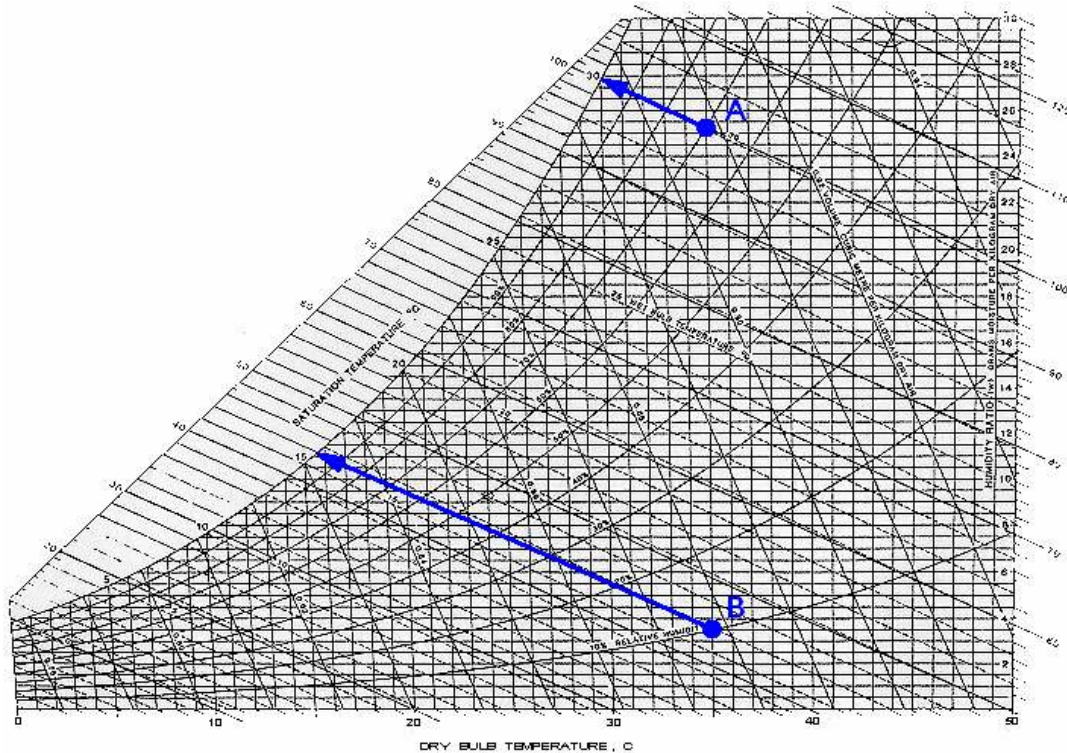
Σχήμα 2: Η μεταβολή της άμεσης εξατμιστικής ψύξης στον ψυχομετρικό χάρτη

Όπως βλέπουμε από τον παραπάνω ψυχομετρικό χάρτη ο εισερχόμενος αέρας στο υγρό μέσο έχει θερμοκρασία ξηρής σφαίρας $T_{DB} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, υγρής σφαίρας $T_{WB} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ και σχετική υγρασία $RH = 15\%$. Θεωρητικά μπορεί να μειωθεί η θερμοκρασία του ρεύματος αέρα κατά $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ μέσω της πρόσθεσης νερού σ' αυτό. Όμως στην περίπτωση αυτή ο εξερχόμενος αέρας έχει $T_{DB} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $RH = 83\%$, δηλαδή η μείωση είναι $18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Έτσι η αποτελεσματικότητα της ψύξης είναι:^[1]

$$\varepsilon = 100 \frac{T_{db}^A - T_{db}^B}{T_{db}^A - T_{wb}^A} = 90\%$$

της θερμοκρασίας υγρής σφαίρας. Συχνά με την άμεση εξατμιστική ψύξη μπορεί να επιτευχθεί ποσοστό από 90% μέχρι 95%.

Με τον ψυχομετρικό χάρτη μπορούμε να καταλάβουμε γιατί η άμεση εξατμιστική ψύξη λειτουργεί καλύτερα σε περιοχές με ξηρό κλίμα και χειρότερα σε υγρό περιβάλλον. Ας εξετάσουμε τον παρακάτω ψυχομετρικό χάρτη του **σχήματος 3**.



Σχήμα 3: Μεταβολές άμεσης εξατμιστικής ψύξης στον ψυχομετρικό χάρτη

Αν αρχίσουμε από το σημείο A όπου ο αέρας έχει θερμοκρασία ξηρής σφαίρας $T_{DB} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ και σχετική υγρασία $RH = 70\%$, τότε ο αέρας αυτός μπορεί να ψυχθεί μόνο $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ πριν φτάσει στον κορεσμό του στην θερμοκρασία υγρής σφαίρας $T_{WB} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αντιθέτως αρχίζοντας από το σημείο B με θερμοκρασία ξηρής σφαίρας πάλι $T_{DB} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ αλλά σχετική υγρασία $RH = 10\%$, ο αέρας μπορεί να ψυχθεί στους $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, δηλαδή μείωση

της θερμοκρασίας κατά $19,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αυτό μας αποδεικνύει ότι υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα ψύξης του αέρα εκεί που επικρατεί χαμηλή σχετική υγρασία.

Οι άμεσοι εξατμιστικοί ψύκτες έχουν πολλά ενεργειακά και οικονομικά πλεονεκτήματα σε σχέση με συστήματα κλιματισμού με συμπιεστή. Δηλαδή έχουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης και καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια. Επίσης δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον με χλωροφθοράνθρακες (CFC) και με άλλες ρυπογόνες εκπομπές σωματιδίων.

2.2 Εξοπλισμός άμεσων εξατμιστικών ψυκτών

➤ Ψύκτες αέρα τυχαίου μέσου

Αυτοί οι ψύκτες εμπεριέχουν εξατμιστικά «πανιά», συνήθως από ινώδες ξύλο ή απορροφητικό αφρώδες πλαστικό. Μια αντλία επανακυκλοφορίας του νερού ανυψώνει το νερό από το κάρτερ στον διασκορπιστή και αυτό ρέει προς τα κάτω μέσω του πανιού ξανά στο κάρτερ. Ένας ανεμιστήρας μέσα στον ψύκτη οδηγεί τον αέρα στο εξατμιστικό πανί και τον παραδίδει στο χώρο έχοντας ψυχθεί.

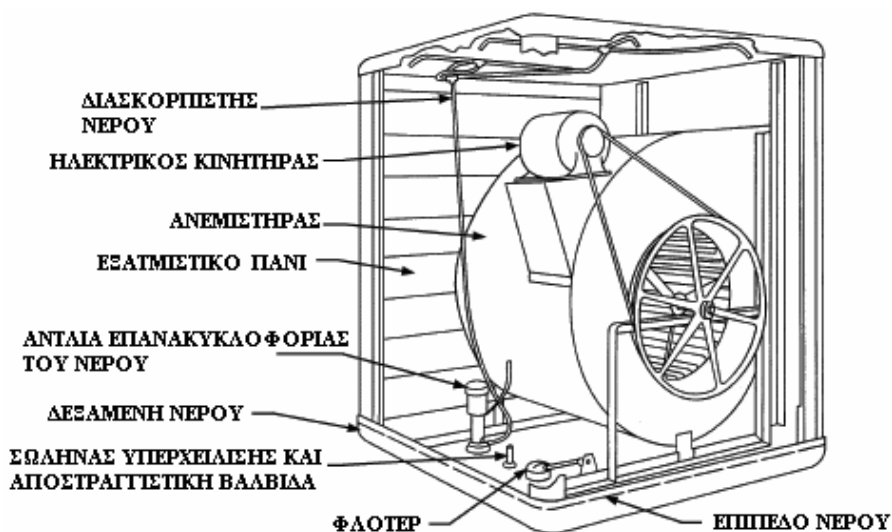
Όταν είναι καθαροί και καλοδιατηρημένοι, οι εμπορικοί ψύκτες αέρα τυχαίου μέσου λειτουργούν κατά προσέγγιση με αποτελεσματικότητα **80%**, ενώ απομακρύνουν σωματίδια των 10μm και άνω από τον αέρα. Σε ορισμένες μονάδες συμπληρωματικά φίλτρα πριν ή μετά τα εξατμιστικά πανιά κρατάνε τα σωματίδια ώστε να μην εισέρχονται στον χώρο, ακόμα και όταν δεν ψύχεται ο αέρας μέσω του νερού, απλά και μόνο για να ανακυκλώνεται φρέσκος αέρας. Τα εξατμιστικά «πανιά» μπορούν να κατασκευαστούν με πρόσθετα χημικά υλικά ώστε να προβάλλουν αντίσταση στην προσβολή από βακτήρια, μύκητες και άλλους μικροοργανισμούς.

Οι ψύκτες αέρα τυχαίου μέσου είναι συνήθως σχεδιασμένοι για μετωπικές ταχύτητες από **0,5** έως **1,3m/s** με μία πτώση πίεσης των **25Pa**. Τα εξατμιστικά πανιά που έχουν πάχος περίπου **50mm** τοποθετούνται σε ένα πλαίσιο με περσίδες κατασκευασμένο από βαμμένο γαλβανισμένο χάλυβα ή φορμαρισμένο πλαστικό. Οι αντλίες είναι θερμικά προστατευμένες. Η δεξαμενή ύδατος έχει σύνδεση συμπλήρωσης του νερού, φλοτέρ, σωλήνα υπερχειλίσης και αποστραγγιστική βαλβίδα. Οι παροχές ενσωματώνονται χαρακτηριστικά στο σχέδιο ώστε να εξαερώνεται το νερό και να αποτρέψουν τη συγκέντρωση των μεταλλικών στοιχείων, του ρύπου, αλλά και την μικροβιακή αύξηση.

Ο ανεμιστήρας είναι συνήθως ένας μπροστινός-καμπύλος, φυγοκεντρικός που συμπληρώνεται με τη μηχανή και το σύστημα για τη μετάδοση κίνησης. Η κίνηση των ιμάντων τύπου V μπορεί να περιλαμβάνει χειροκίνητα διευθετήσιμα γρανάζια μηχανής για να επιτρέπει στην ταχύτητα ανεμιστήρων να αυξάνεται για να χρησιμοποιεί την

πλήρη μηχανική ικανότητα στην υψηλότερη αντίσταση ροής αέρος. Το κάλυμμα της μηχανής μπορεί να είναι αδιάβροχο, ολικά εσώκλειστο, ή ημιανοικτού τύπου συγκεκριμένα σχεδιασμένο για τους εξατμιστικούς ψύκτες.^[4]

Στο παρακάτω **σχήμα 4** φαίνεται ένας τυπικός ψύκτης αέρα τυχαίου μέσου.



Σχήμα 4: Τυπικός ψύκτης αέρος τυχαίου μέσου

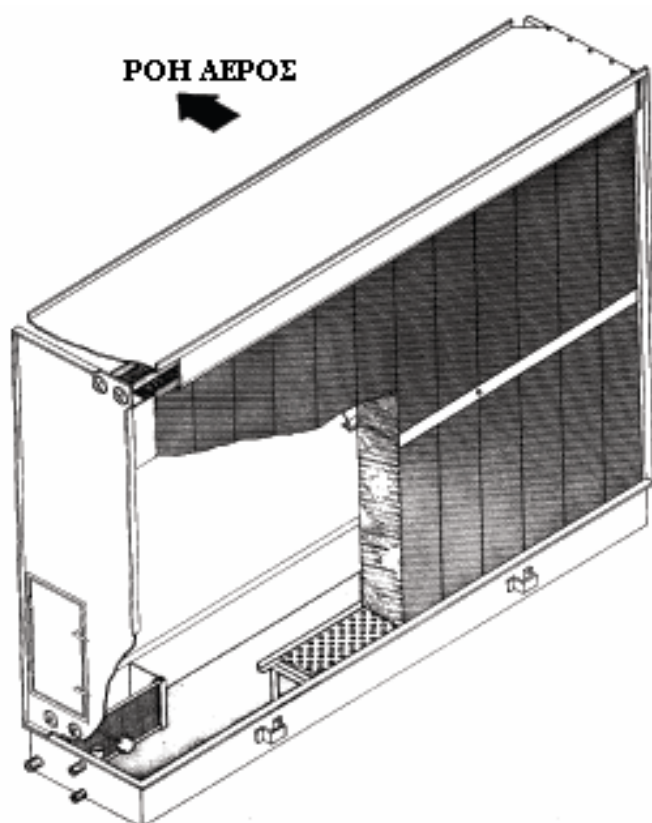
➤ Ψύκτες αέρα άκαμπτου μέσου

Συγκροτήματα πτυχωτού υλικού αποτελούν τη βρεγμένη επιφάνεια των άμεσων εξατμιστικών ψυκτών αέρος άκαμπτου-μέσου (**σχήμα 5**). Στα υλικά περιλαμβάνεται η κυτταρίνη, το πλαστικό, και ο υαλοβάμβακας που μπορεί να απορροφήσει το νερό και αντέχει στην διάβρωση. Το μέσο είναι πτυχωτό σταυρωτά για να μεγιστοποιεί τη μίξη του αέρα και του νερού. Στην κατεύθυνση της ροής του αέρος, το πάχος του μέσου είναι συνήθως **300mm**, αλλά μπορεί να είναι μεταξύ **100** και **600mm**. Το μέσο έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της χαμηλής αντίστασης στη ροή αέρος, υψηλή αποτελεσματικότητα κορεσμού και είναι αυτοκαθαριζόμενο με την πλύση της μπροστινής επιφάνειάς του. Το άκαμπτο μέσο σχεδιάζεται συνήθως για μια μετωπική ταχύτητα **2** έως **3m/s**.

Οι άμεσοι εξατμιστικοί ψύκτες αέρος που χρησιμοποιούν αυτό το υλικό φτιάχνονται για να χειρίζονται τουλάχιστον **280m³/s** αέρα με ή χωρίς ανεμιστήρες. Η αποτελεσματικότητα κορεσμού ποικίλλει από **70** έως πάνω από **95%**, ανάλογα με το πάχος των μέσων και την ταχύτητα αέρα. Ο αέρας ρέει οριζόντια ενώ το νερό ανακυκλοφορεί ρέει κάθετα πάνω στις επιφάνειες του υλικού μέσω της βαρύτητας από τον διασκορπιστή νερού στο κάρτερ. Ο προσαγωγός μπορεί να συνδεθεί άμεσα με μια παροχή νερού ρυθμιζόμενης πίεσης π.χ. στους αεροστρόβιλους, ή μια αντλία μπορεί να ανακυκλοφορεί το νερό από μια χαμηλότερη δεξαμενή που κατασκευάζεται από αντιδιαβρωτικό υλικό. Στην δεξαμενή προσαρμόζονται ο υπερχειλιστής και οι συνδέσεις

αγωγών. Το πάνω κάλυμμα του μέσου είναι από τον ενισχυμένο γαλβανισμένο χάλυβα ή άλλο αντιδιαβρωτικό μεταλλικό έλασμα, ή από πλαστικό.

Οι φλάντζες στις επιφάνειες εισόδου και εξόδου επιτρέπουν στη μονάδα να συνδέεται με τον αγωγό. Στην ανακυκλοφορία των συστημάτων νερού, ένα φλοτέρ διατηρεί την κατάλληλη στάθμη νερού στη δεξαμενή, αναπληρώνει το νερό που έχει εξατμιστεί, και παρέχει φρέσκο νερό για αραίωση ώστε να αποτραπεί η μεγάλη συγκέντρωση των στερεών και των μεταλλικών στοιχείων. Επειδή το ποσοστό επανακυκλοφορίας νερού είναι χαμηλό και επειδή τα υψηλής πίεσης ακροφύσια δεν επαρκούν για να διαποτίσουν το μέσο, η δύναμη άντλησης είναι χαμηλή σε σχέση με τους καθαριστές αέρα ψεκασμού με ισοδύναμη την αποτελεσματικότητα εξατμιστικής ψύξης.^[4]

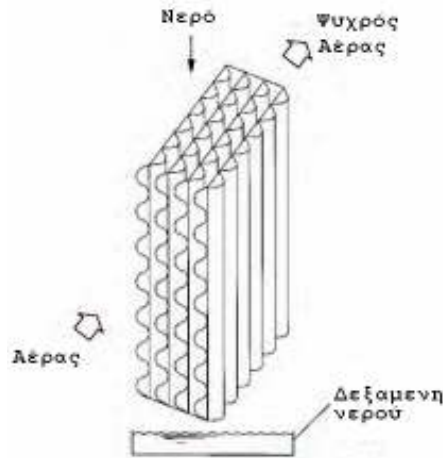


Σχήμα 5: Ψύκτες αέρα άκαμπτου μέσου

2.3 Έμμεση εξατμιστική ψύξη

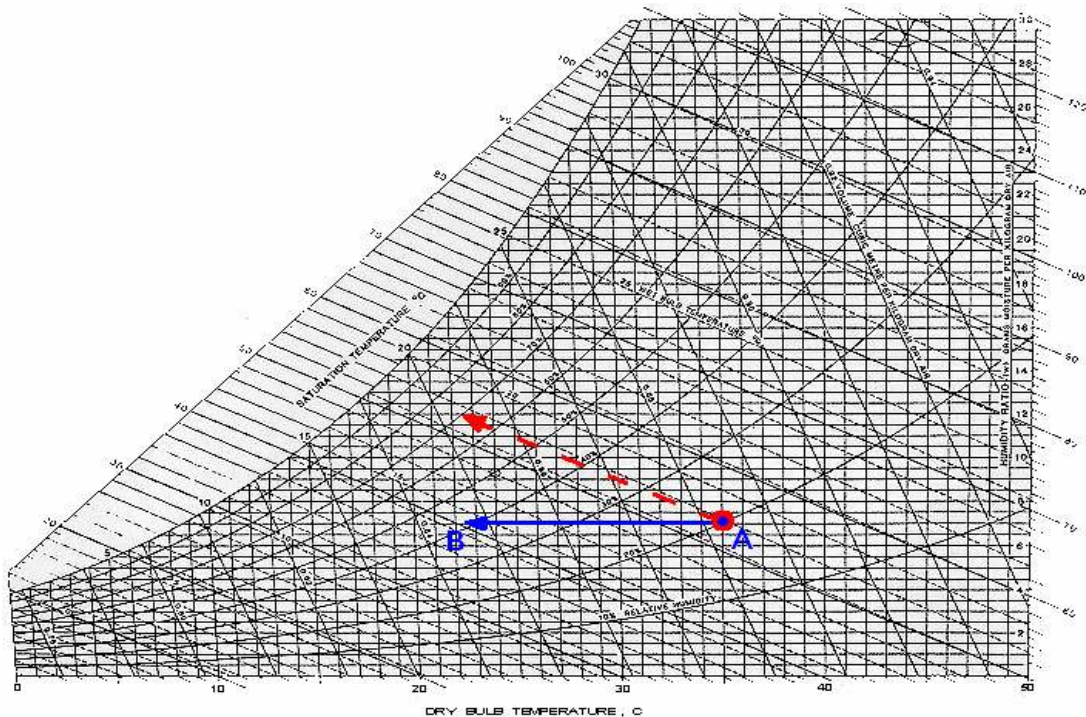
Η διαδικασία της έμμεσης εξατμιστικής ψύξης του αέρα περιλαμβάνει δύο ρεύματα αέρος: ένα πρωτεύον ή παραγωγής και ένα δευτερεύον ή εργαζόμενο ρεύμα. Το νερό εξατμίζεται και αφαιρείται θερμότητα από το εργαζόμενο ρεύμα αέρος, ενώ δεν

προστίθεται υγρασία στο ρεύμα παραγωγής. Μια μεμβράνη εναλλαγής θερμότητας βρίσκεται ανάμεσα στα δύο ρεύματα. Η ικανότητα της μεμβράνης να μεταφέρει θερμότητα και η παροχή του αέρα καθορίζουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Στο παρακάτω **σχήμα 6** φαίνεται ένας έμμεσος εξατμιστικός ψύκτης του αέρα.



Σχήμα 6: Έμμεσος εξατμιστικός ψύκτης

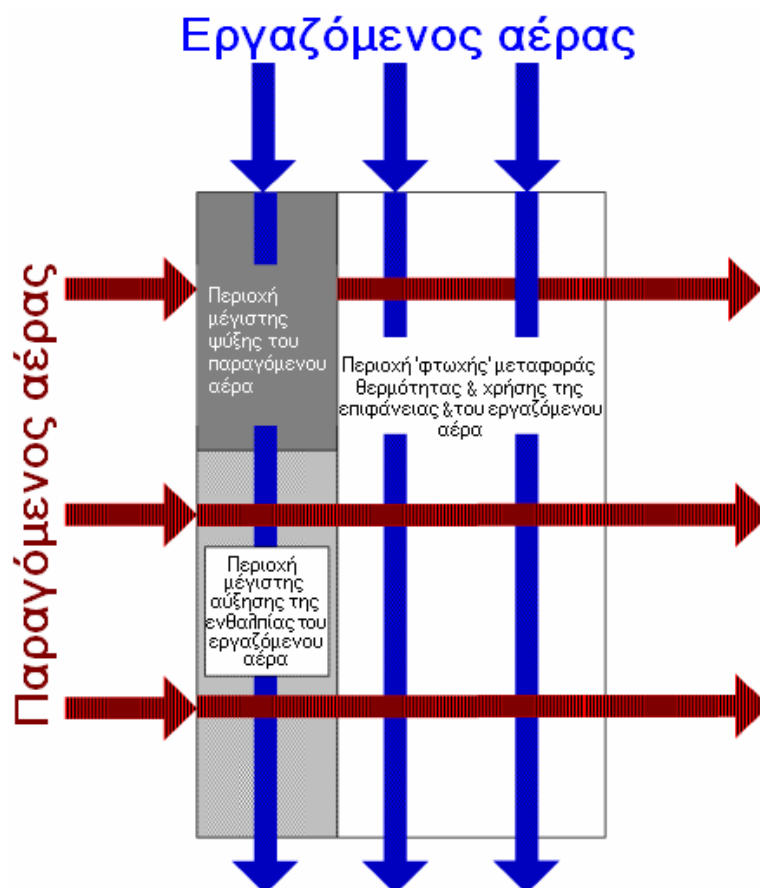
Όσον αφορά την ψυχομετρία κατά την διαδικασία αυτή κινούμαστε οριζόντια προς τα αριστερά παράλληλα με τον άξονα της θερμοκρασίας ξηρής σφαίρας χωρίς να προστίθεται υγρασία όπως φαίνεται στο **σχήμα 7**. Θεωρητικά ο αέρας μπορεί να ψυχθεί στην ίδια θερμοκρασία υγρής σφαίρας όπως και στην άμεση εξατμιστική ψύξη. Στην πράξη η αποτελεσματικότητα σ' αυτούς τους ψύκτες μπορεί να αγγίξει το 54% της θερμοκρασίας υγρής σφαίρας του εισερχόμενου αέρα. Εξαρτάται από τα γεωμετρικά όρια της κατασκευής.^[4]



Σχήμα 7: Μεταβολή έμμεσης εξατμιστικής ψύξης

Η επίτευξη της θερμοκρασία υγρής σφαίρας είναι συχνά ο στόχος και των άμεσων και των έμμεσων τεχνολογιών εξατμιστικής ψύξης. Θεωρείται ως η χαμηλότερη θερμοκρασία που είναι εφικτή με θερμοδυναμικές διαδικασίες χωρίς την ανάγκη πρόσθετης ενέργειας.

Στο *σχήμα 8* παρακάτω φαίνεται μια τυπική κάθετη ροή ενός έμμεσου εξατμιστικού ψύκτη. Αν εξετάσουμε τον ψύκτη κατά μήκος της μιας πλάκας θα δούμε ότι η μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας συμβαίνει εκεί που διασταυρώνονται η είσοδος του ξηρού καναλιού με την είσοδο του υγρού. Αυτό οφείλεται στο ότι ο εργαζόμενος αέρας του υγρού καναλιού έχει την χαμηλότερη θερμοκρασία υγρής σφαίρας, ενώ ο αέρας του ξηρού καναλιού έχει την υψηλότερη θερμοκρασία σ' αυτό το σημείο του εναλλάκτη. Η μεγαλύτερη ενθαλπία του εργαζόμενου αέρα που φεύγει από τον εναλλάκτη θα είναι εκεί που ο παραγόμενος αέρας του ξηρού καναλιού εισέρχεται και είναι θερμότερος. Ο εργαζόμενος αέρας φεύγει ενώ έχει φτάσει στην υψηλότερη θερμοκρασία και υγρασία του. Αυτό σημαίνει πως η ψύξη κατά μήκος της εισόδου των ξηρών καναλιών του παραγόμενου αέρα είναι η πιο αποτελεσματική σ' όλο τον εναλλάκτη θερμότητας.^[4]



Σχήμα 8: Μια τυπική κάθετη ροή ενός έμμεσου εξατμιστικού ψύκτη διασταυρούμενης ροής

2.4 Εξοπλισμός άμεσων εξατμιστικών ψυκτών

➤ Συσκευασμένοι έμμεσοι εξατμιστικοί ψύκτες αέρα

Ένας έμμεσος εναλλάκτης θερμότητας εξατμιστικής ψύξης διακρίνεται στο *σχήμα 9*. Μ' αυτή τη διασταυρούμενη ροή, ο εναλλάκτης θερμότητας τύπου πλάκας χρησιμοποιεί μια υδραντλία επανακυκλοφορίας για να υγράνει το εσωτερικό των σωλήνων εναλλάκτη. Είτε η επιστροφή αέρα του εσωτερικού χώρου είτε ο εξωτερικός αέρας μπορεί να κατευθυνθεί ανάμεσα στο εσωτερικό των σωλήνων από έναν δευτερεύον ανεμιστήρα αέρα. Ο εξωτερικός αέρας που εισάγεται στο κτήριο ψύχεται αισθητά από την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων, οι οποίοι ψύχονται από το νερό που εξατμίζεται στην εσωτερική επιφάνειά τους. Η λανθάνουσα ψύξη μπορεί επίσης να εμφανιστεί εάν η θερμοκρασία υγρού βολβού του δευτερεύοντος αέρα είναι κάτω από το σημείο δρόσου του εξωτερικού αέρα.

Αυτοί οι εναλλάκτες θερμότητας είναι ικανοί να προσεγγίσουν κατά **60** με **80%** τη θερμοκρασία ξηρού βολβού του περιβάλλοντος στη θερμοκρασία υγρού βολβού της δευτερεύουσας ροής αέρος που εισάγεται. Αυτό καλείται αποδοτικότητα υγρού-βολβού (WBDE), και υπολογίζεται ως εξής:^[4]

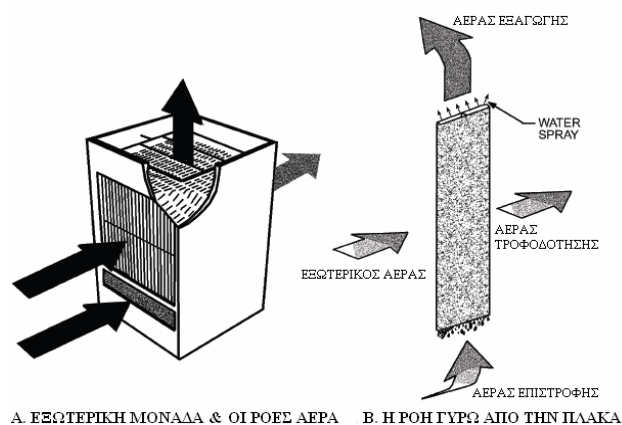
$$WBDE = 100 \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T'_s} \%$$

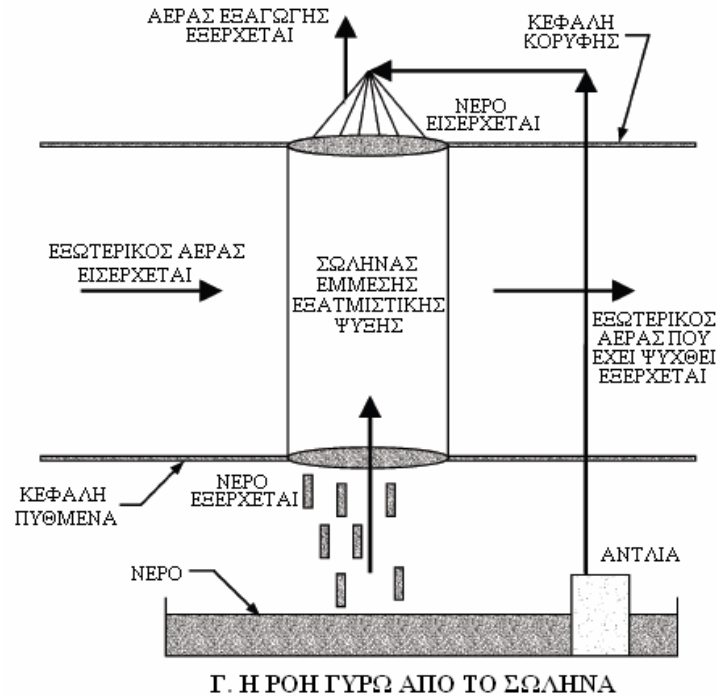
όπου T_1 = θερμοκρασία ξηρής σφαίρας του εισερχόμενου πρωτεύον αέρα (°C)

T_2 = θερμοκρασία ξηρής σφαίρας του εξερχόμενου πρωτεύον αέρα (°C)

T'_s = θερμοκρασία υγρής σφαίρας του εισερχόμενου δευτερεύον αέρα (°C)

Οι απώλειες στατικής πίεσης στην πλευρά του αέρα ανεφοδιασμού για αυτούς τους εναλλάκτες θερμότητας κυμαίνονται από **60** έως **185 Pa**, ενώ αντίστοιχα για την ροή αέρα στην υγρή πλευρά κυμαίνονται από **200** έως **225 Pa**. Οι παροχές της ροής αέρος επιλέγονται στο χαμηλό **0,5L/s** του εξωτερικού αέρα και σε **0,3L/s** της δευτερεύουσας ροής αέρος. Ο ρυθμός ενεργειακής αποδοτικότητας ψύξης για αυτόν τον τύπο σειράς εναλλακτών θερμότητας ποικίλει από **40** έως **80**.





Σχήμα 9: Έμμεσος εναλλάκτης θερμότητας εξατμιστικής ψύξης

➤ *Ανάκτηση θερμότητας*

Η έμμεση εξατμιστική ψύξη έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορα συστήματα ανάκτησης θερμότητας, συμπεριλαμβανομένων των εναλλακτών θερμότητας με πλάκες, εναλλάκτες με σωλήνες θερμότητας, περιστροφικοί αναπαραγωγικοί εναλλάκτες θερμότητας και διαφασικοί εναλλάκτες θερμοσιφωνικού βρόχου. Η έμμεση εξατμιστική ψύξη με ανάκτηση θερμότητας μπορεί να επανατοποθετηθεί στα υπάρχοντα συστήματα, χαμηλώνοντας το λειτουργικό κόστος και τη μέγιστη ενεργειακή ζήτηση. Για νέες εγκαταστάσεις, ο εξοπλισμός μπορεί να περιοριστεί σε μέγεθος, χαμηλώνοντας το γενικό πρόγραμμα και τις λειτουργικές δαπάνες.^[4]

➤ *Πύργος ψύξης / συστήματα coil (περιελίξεων)*

Ο συνδυασμός ενός πύργου ψύξης ή άλλου εξατμιστικού ψύκτη ύδατος με έναν εναλλάκτη περιελίξεων θερμότητας νερού / αέρα και μια αντλία ανακυκλοφορίας του νερού είναι ένας άλλος τύπος έμμεσης εξατμιστικής ψύξης. Το νερό αντλείται από τη δεξαμενή του πύργου ψύξης στις περιελίξεις και επιστρέφει στην άνω κεφαλή διανομής του πύργου. Χρησιμοποιούνται και τα συστήματα ανοικτού-ύδατος και κλειστού βρόγχου.

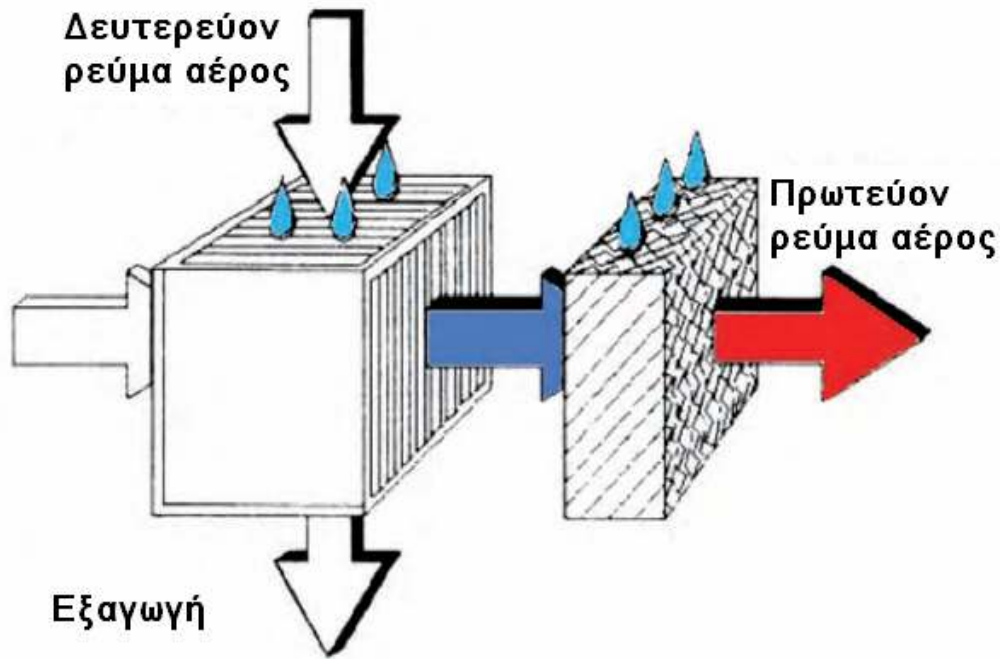
Το νερό επανακυκλοφορίας ψύχεται εξατμιστικά μέσα σε μερικούς βαθμούς της θερμοκρασίας υγρού βολβού καθώς ρέει πάνω στις βρεγμένες επιφάνειες του πύργου ψύξης. Καθώς το ψυχρό νερό ρέει μέσω των σωλήνων του coil παίρνει τη θερμότητα από το ρεύμα αέρος. Η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται και ο πρωτεύων αέρας ψύχεται χωρίς να προστίθεται υγρασία σ' αυτό.

Το νερό ψύχεται ξανά καθώς επανακυκλοφορεί από τον πύργο ψύξης. Ένα φλοτέρ ελέγχει την αναπλήρωση του φρέσκου νερού, το οποίο αντικαθιστά το εξατμισμένο νερό. Μία βαλβίδα αποτρέπει την υπερβολική συγκέντρωση των μεταλλικών στοιχείων στο επανακυκλοφορούμενο νερό.

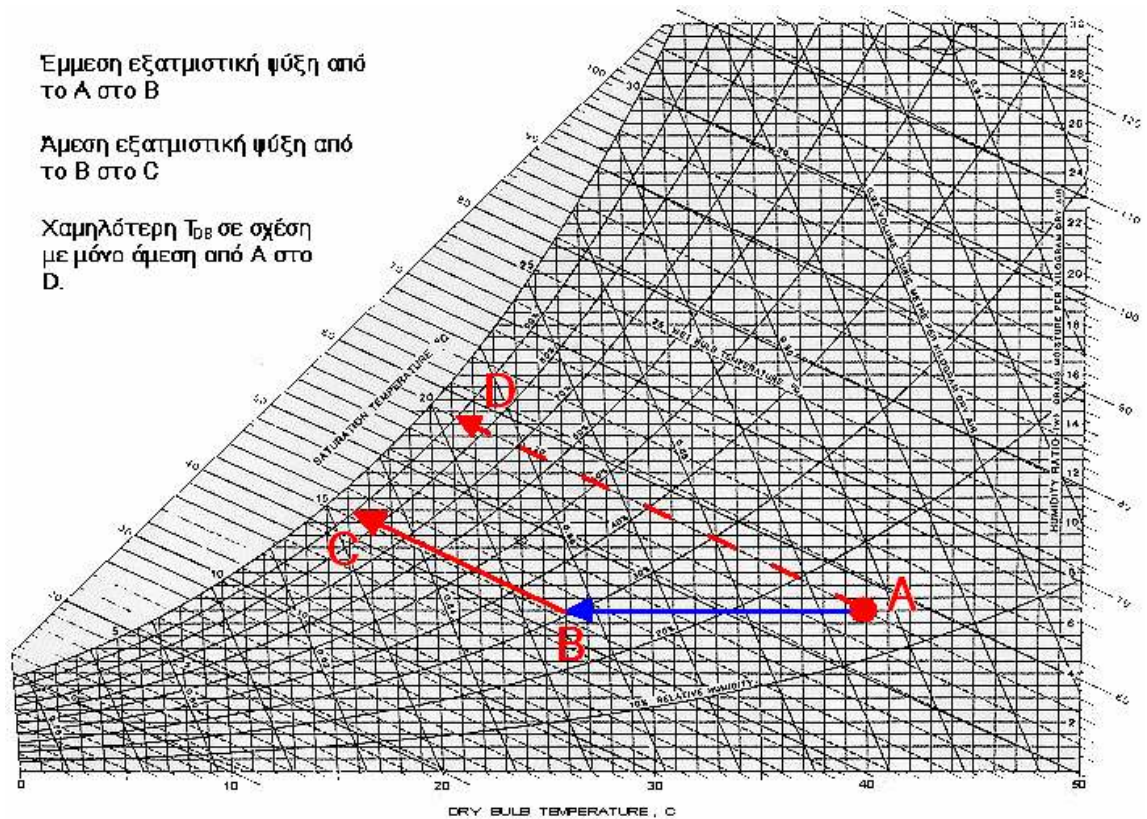
Πλεονεκτήματα του πύργου ψύξης είναι ότι μπορεί να επανατοποθετηθεί σε μεγάλα οικιστικά συστήματα και να τοποθετηθεί μακριά από το coil ψύξης. Επίσης, ο πύργος είναι πιο προσβάσιμος για συντήρηση. Γενικά η αποτελεσματικότητα (WBDE) μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 55% και 75% ή λίγο ψηλότερα. Εάν ο αέρας επιστροφής στέλνεται στον πύργο ψύξης ενός έμμεσου συστήματος ψύξης, πριν εκκενωθεί, τότε και ο πύργος πρέπει να σχεδιαστεί συγκεκριμένα. Αυτοί οι ψύκτες υγραίνουν ένα μέσο που έχει υψηλή αναλογία υγρής επιφανείας ανά μονάδα όγκου. Η απόδοση εξαρτάται από το πάχος του μέσου, τη ταχύτητα αέρα πάνω από την επιφάνεια, τη ροή του νερού στην παροχή αέρα, τη θερμοκρασία υγρού βολβού και την ποικιλία ψυκτικών υγρών. Λόγω της κλειστής προσέγγισης της θερμοκρασίας νερού στη θερμοκρασία υγρού βολβού, η αποτελεσματικότητα μπορεί γενικότερα να είναι υψηλότερη από αυτή ενός συμβατικού πύργου ψύξης.^[4]

2.5 Συνδυασμός Έμμεσης & Άμεσης εξατμιστικής ψύξης

Η έμμεση και άμεση εξατμιστική ψύξη μπορούν να συνδυαστούν σε δύο στάδια διαδικασίας ενός εξοπλισμού όπως φαίνεται στο παρακάτω *σχήμα 10*. Στα συστήματα αυτά το δευτερεύον ρεύμα αέρος ψύχει αισθητά το πρωτεύον στο πρώτο στάδιο της έμμεσης διαδικασίας. Κατόπιν ο αέρας ψύχεται άμεσα μέσω της εξάτμισης του νερού σε περαιτέρω χαμηλότερη θερμοκρασία (*σχήμα 11*). Ο πρωτεύον ή τροφοδοτούμενος αέρας μπορεί να εξέλθει με χαμηλότερη θερμοκρασία από την αρχική θερμοκρασία υγρής σφαίρας. Επίσης αυτή η διαδικασία μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε ένα ευρύτερο φάσμα κλιματικών συνθηκών σε σχέση με την άμεση εξατμιστική ψύξη, ενώ τα σχετικά ενεργειακά κόστη είναι χαμηλότερα από αυτά των συμβατικών κλιματιστικών συσκευών με συμπιεστή.^[4]



Σχήμα 10: Έμμεση και άμεση εξατμιστική ψύξη σε συνδυασμό



Σχήμα 11: Η μεταβολή στον ψυχομετρικό χάρτη

2.6 Πρόψυξη και προεπεξεργασία αναπλήρωσης αέρα

Η εξατμιστική ψύξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την ικανότητα και να μειώσει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ενός κλιματιστικού μηχανήματος ή ενός ψυγείου. Και ο συμπυκνωτής και ο αέρας αναπλήρωσης μπορούν να ψυχθούν εξατμιστικά με τα άμεσα ή/και τα έμμεσα μέσα.

Ο συμπυκνωτής μπορεί να ψυχθεί με την προσθήκη ενός άμεσου εξατμιστικού ψύκτη (συνήθως χωρίς ανεμιστήρα) στην εισαγωγή του ανεμιστήρα του συμπυκνωτή. Το άμεσο εξατμιστικό δοχείο ψύξης πρέπει να προσθέτει πολύ λίγη αντίσταση στη ροή αέρος στο συμπυκνωτή και οι μετωπικές ταχύτητες είναι αρκετά μικρές ώστε να παρασύρουν το υγρό και να το μεταφέρουν στο συμπυκνωτή. Η συντήρηση των συμπυκνωτών με ψύκτη είναι σποραδική και εύκολη να εκτελεσθεί. Ένας καλά σχεδιασμένος άμεσος εξατμιστικός ψύκτης μπορεί να μειώσει την ηλεκτρική κατανάλωση των μονάδων ψύξης από **10** έως **30%**.

Η ψύξη αέρα με μια έμμεση ή άμεση εξατμιστική μονάδα μπορεί να εφαρμοστεί και σε τυποποιημένες συσκευασμένες μονάδες και σε μεγάλα οικιστικά συστήματα. Είτε εξωτερικός αέρας είτε αέρας από εξαγωγή (οποιοσδήποτε έχει τη χαμηλότερη θερμοκρασία υγρού-βολβού) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύουσα πηγή αέρος. Ο εξωτερικός αέρας είναι γενικά ευκολότερο να ψυχθεί, και είναι σε μερικές περιπτώσεις η μόνη επιλογή επειδή ο εξαγόμενος αέρας είναι ή επικίνδυνος (π.χ., από ένα εργαστήριο) ή μακριά από την είσοδο του αέρα.

Εάν ο αέρας εξαγωγής ενός μπορεί να χρησιμοποιηθεί δεδομένου ως δευτερεύουσα πηγή αέρα, αυτό έχει τη δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας κατά τη διάρκεια κρύου καιρού. Γενικά, η ψύξη εξωτερικού αέρα έχει υψηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας και χαμηλότερη απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τον αέρα επιστροφής. Αυτά τα συστήματα μπορούν σημαντικά να μειώσουν το εξωτερικό φορτίο αέρα και μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας μία ψυχομετρική διαδικασία για την περιοχή και το κλίμα που εξετάζονται.^[4]

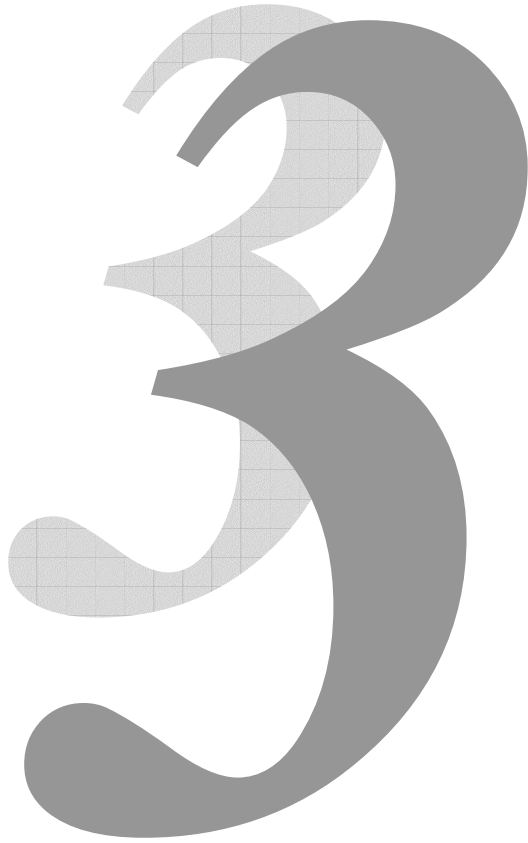
2.7 Σύγκριση των εξατμιστικών ψυκτών με τα συμβατικά κλιματιστικά συστήματα συμπίεσης ατμού

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μια γενική εικόνα των βασικών χαρακτηριστικών των ψυκτών αέρος με εξάτμιση και αυτών με συμπίεση, ώστε να γίνει και η σύγκρισή τους.

Βασικά χαρακτηριστικά	Κλιματιστικό με συμπιεστή	Εξατμιστικός ψύκτης αέρος
Ψυκτικό μέσο	Χλωροφθοράνθρακες, υδροφθοράνθρακες	Νερό
Μεγέθη παραγόμενων ψυκτών για εγκατάσταση	Μικρή και μεγάλη κλίμακα	Μικρή και μεγάλη κλίμακα
Ευαισθησία στην υγρασία για άνεση στην εφαρμογή τους	Εφαρμογή σε όλους τους τύπους κλιμάτων	Εφαρμογή σε ξηρά και θερμά κλίματα για ψυκτική άνεση
Εξαερισμός (ποιότητα του εσωτερικού αέρα)	20% του εξωτερικού αέρα	100% του εξωτερικού αέρα
Κατανάλωση ενέργειας σε μια τυπική εγκατάσταση σε χώρο 100m ³	1000 kWh/yr	350 kWh/yr
Κόστος επένδυσης για μια εγκατάσταση	700-1400 €	200-700 €
Συντήρηση	Αλλαγή φίλτρων κάθε 2 χρόνια	Ετήσια αλλαγή του χαρτιού και κάθε 2 χρόνια της επικάλυψης
Ετήσιο συσσωρευμένο κόστος συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής ισχύος, της συντήρησης και τις αποσβέσεις	500 €	150 €

Ορισμένες επιλογές επέκτασης των παροχών που προσφέρει η εξατμιστική ψύξη είναι:

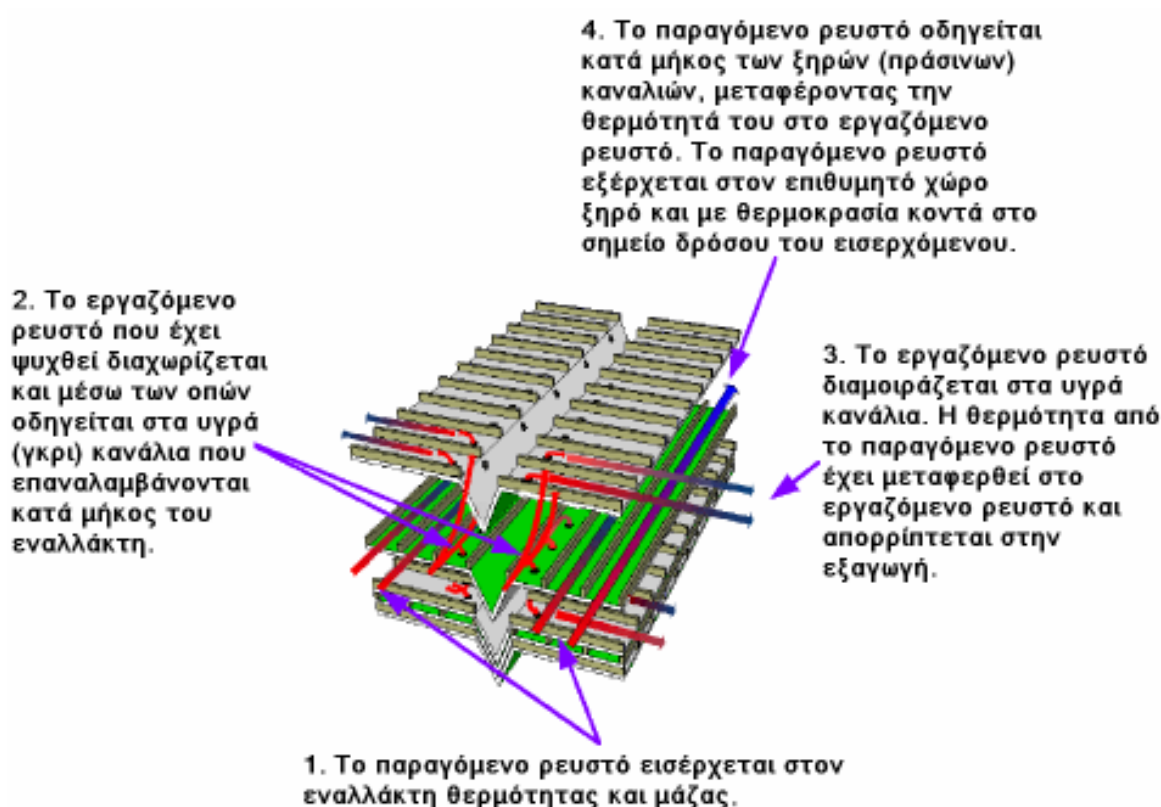
- **Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας μέσω της ηλιακής ενέργειας.** Μικρές εξατμιστικές μονάδες χρησιμοποιούν ηλιακά φωτοβολταϊκά και είναι διαθέσιμες σε ποικίλες εμπορικές και πρωτότυπες εφαρμογές.
- **Μεταφορά τεχνολογίας.** Η εξατμιστική ψύξη προσφέρει γόνιμο πεδίο για μεταφορά της τεχνολογίας ειδικότερα στις μικρές εφαρμογές των ψυκτών και σε αγροτικές εφαρμογές.
- **Πιθανότητες υποστήριξης.** Η εξατμιστική ψύξη έχει ουσιαστική εφαρμογή ως εργαλείο διαχείρισης από πλευράς ζήτησης σε δημόσια κτήρια και σχολεία. Τεχνική υποστήριξη σε αναπτυσσόμενες, πιλοτικά προγράμματα και επιδείξεις μπορούν να παρέχουν περαιτέρω ευκαιρίες για την εξατμιστική ψύξη.^[1]



Κύκλος του Maisotsenko

Ο κύκλος του Maisotsenko χρησιμοποιεί την ίδια υγρή και ξηρή πλευρά της πλάκας όπως περιγράφονται στην έμμεση εξατμιστική ψύξη, αλλά με διαφορετική ροή του αέρα δημιουργώντας ένα νέο θερμοδυναμικό κύκλο. Αυτός ο κύκλος επιτρέπει στον αέρα παραγωγής να ψύχεται κάτω από τη θερμοκρασία υγρής σφαίρας και κοντά στην θερμοκρασία του σημείου δρόσου του εργαζόμενου αέρα. Επίσης δεν προστίθεται καθόλου υγρασία στον παραγόμενο αέρα.

Στο παρακάτω *σχήμα 1* διακρίνεται ένας θεωρητικός διάτρητος και εγκάρσιος εναλλάκτης θερμότητας και μάζας στον οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί ο κύκλος του Maisotsenko μαζί με τα στάδια λειτουργίας του.^[1]



Σχήμα 1 : Θεωρητικός εναλλάκτης θερμότητας και μάζας στον οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί ο κύκλος του Maisotsenko μαζί με τα στάδια λειτουργίας του.

Στο επόμενο *σχήμα 2* φαίνεται ένα δισδιάστατο και απλοποιημένο διάγραμμα του κύκλου του Maisotsenko στο οποίο δείχνει πως ο αέρας ψύχεται από τη συνεχόμενη απόρριψη θερμότητας που ακολουθείται από επιπρόσθετη ψύξη.



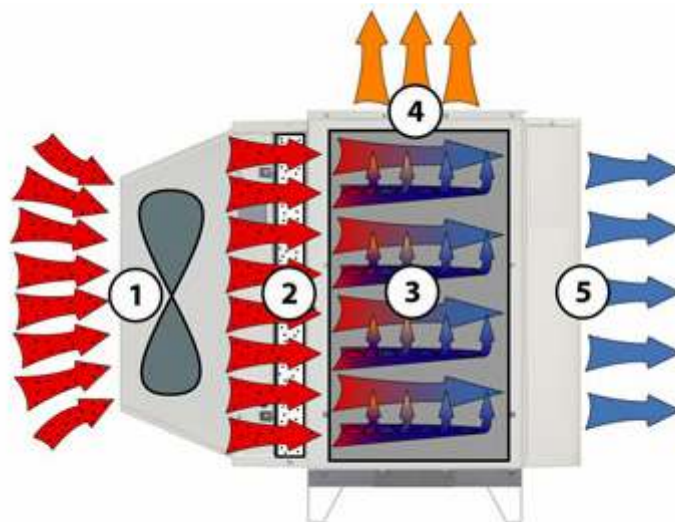
Σχήμα 2: Δισδιάστατο διάγραμμα του κύκλου του Maisotsenko

Ο εναλλάκτης θερμότητας και μάζας αποδίδει τον ψυχωμένο αέρα σε μερικούς βαθμούς κάτω από την θερμοκρασία υγρής σφαίρας του αέρα χωρίς να προσδίδει υγρασία σ' αυτόν. Αυτός ο ψύκτης ατμοσφαιρικού αέρα είναι κατασκευασμένος από ίνες κυτταρίνης με ζεστό λειωμένο πολυαιθυλένιο για κανάλια καθοδήγησης.

Σε ανεξάρτητους εργαστηριακούς έλεγχους επιτεύχθηκε αποτελεσματικότητα 110% έως 122% της θερμοκρασίας υγρής σφαίρας και 55% έως 85% της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου.^[2]

3.1 Λειτουργία κλιματισμού με χρήση του κύκλου Maisotsenko

Στο παρακάτω *σχήμα 3* φαίνεται μια πραγματική κλιματιστική μονάδα που χρησιμοποιεί τον κύκλο του Maisotsenko στην οποία είναι σημειωμένα η ροή του αέρα και τα στάδια λειτουργίας.



Σχήμα 3: Μονάδα που υλοποιεί τον κύκλο του Maisotsenko

1. **“Φρέσκο” αέρας** – Ο εξωτερικός αέρας οδηγείται μέσα στην μονάδα μέσω ενός ανεμιστήρα.
2. **Φιλτράρισμα** – Ο αέρας φιλτράρεται στο φίλτρο πάχους περίπου 5cm.
3. **Εναλλάκτης θερμότητας και μάζας** – Ο αέρας εισάγεται στον εναλλάκτη που χρησιμοποιεί την τεχνολογία του κύκλου του Maisotsenko.
4. **Εργαζόμενος αέρας και νερό** – Ο μισός αέρας από τον εισερχόμενο στον εναλλάκτη γίνεται κορεσμένος με νερό και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μεταφέροντας την θερμότητα που αφαιρείται από τον ψυχόμενο αέρα.
5. **Ψυχόμενος αέρας** – Το υπόλοιπο μισό του εισερχόμενου αέρα ψύχεται χωρίς να του προστίθεται καθόλου υγρασία. Ο κλιματιζόμενος αυτός αέρας οδηγείται μέσω αγωγού στο κτίριο.

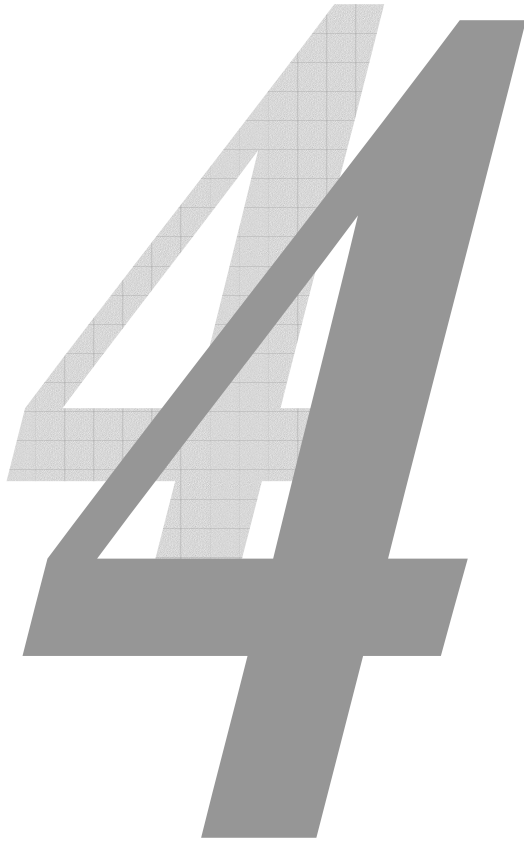
Οι πρότυπες μονάδες κάποιας κατασκευάστριας εταιρίας είναι διαθέσιμες είτε με κινητήρα μιας ταχύτητας που καταναλώνει **1.200 Watt** είτε με ηλεκτρονικά μεταγωγικό κινητήρα (ECM) που δεν καταναλώνει πάνω από **750 Watt**. Ένα συγκρίσιμο κλιματιστικό υψηλής απόδοσης καταναλώνει **6.000-7.000 Watt**. Οπότε το ποσοστό μείωσης της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι περίπου **85%**. Έτσι οι κλιματιστικές μονάδες αυτές μπορούν να μειώσουν δραματικά την αιχμή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τιμές των μονάδων αυτών για λιανική πώληση φτάνουν τα **3.500€** για τον βασικό κινητήρα και **4.000 €** για την ECM.

Οι μονάδες μεταφέρουν στον εσωτερικό χώρο μόνο **700 l/s** κλιματιζόμενου αέρα. Λειτουργούν άψογα σε κατοικίες αν είναι εγκατεστημένες σωστά, ενώ ταιριάζουν ακόμα καλύτερα σε μικρά και ελαφρά εμπορικά και βιομηχανικά κτίρια. Οι εγκαταστάσεις αυτές έχουν μεγάλους και ανοικτούς χώρους, έτσι δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη πολλών σωληνώσεων και απαιτούν μεγάλες ποσότητες εξωτερικού αέρα για εξαερισμό. Επειδή εξαρτώνται από τον ξηρό αέρα, οι εξατμιστικοί ψύκτες γενικά λειτουργούν πιο αποτελεσματικά με τον εξωτερικό αέρα απ’ ότι με ανακυκλοφορούμενο.

Ένα μειονέκτημα αυτής της έμμεσης εξατμιστικής ψύξης είναι η ποσότητα του νερού που χρειάζεται. Η μονάδα της δεν διαθέτει δεξαμενή αποθήκευσης νερού, αλλά χρειάζεται μέχρι **45 λίτρα ανά ώρα** νερό, ή **2,5 l/kWh** ενώ περισσότερο απαιτείται από εξατμιστικούς πύργους ψύξης για μεγαλύτερης κλίμακας συστήματα.

Η μονάδα αυτή δεν προσθέτει υγρασία στον αέρα αλλά ούτε την αφαιρεί όπως κάποια συμβατικά κλιματιστικά κάνουν. Έτσι αν η σχετική υγρασία του αέρα είναι ήδη υψηλή δεν θα έχει μεγάλη αποτελεσματικότητα στην ψύξη του αέρα αφού ο κορεσμός του εργαζόμενου θα επέλθει γρηγορότερα. Αν η αφύγρανση είναι αναγκαία, μπορεί να επιτευχθεί μέσω της σύνδεσης του εξατμιστικού ψύκτη σε ένα συμβατικό πηνίο ψύξης ή με άλλα μέσα. Στην πραγματικότητα, η μονάδα αυτή μπορεί να συνδυαστεί με άλλο

εξοπλισμό ψύξης με διάφορους τρόπους για να ενισχύσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του όλου συστήματος. Για παράδειγμα, νοσοκομείο της Ιαπωνία χρησιμοποιεί μια σειρά από τέτοιες μονάδες μαζί με ξηραντικό σύστημα ψύξης για να επιτευχθεί **50%** εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά κλιματιστικά.^[8]



Εφαρμογές της εξαγωγικής ψύξης

4.1 Εφαρμογές της εξατμιστικής ψυκτικής μονάδος

Η εξατμιστική ψύξη είναι κυρίως κατάλληλη για κλίματα όπου ο αέρας είναι ζεστός και η υγρασία χαμηλή. Όμως και σε περιοχές με μέτρια υγρασία υπάρχουν πολλές οικονομικά αποδοτικές χρήσεις. Κάποια παραδείγματα όπου μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά η εξατμιστική ψυκτική μονάδα του κύκλου του Maisotsenko εκτός από την οικιακή χρήση είναι βιομηχανικές εγκαταστάσεις, πλυντήρια, καθαριστήρια, θερμοκήπια, αποβάθρες φόρτωσης, αποθήκες, εργοστάσια, εργοτάξια, χώροι αθλητικών εκδηλώσεων, εργαστήρια, συνεργεία αυτοκινήτων, εκτροφεία ζώων. Σε πολύ υγρά κλίματα, η εξατμιστική ψύξη θα έχει λιγότερη θερμική άνεση, οπότε θα πρέπει να συνδυαστεί με κατάλληλες αφυγραντικές μονάδες. ^[11]

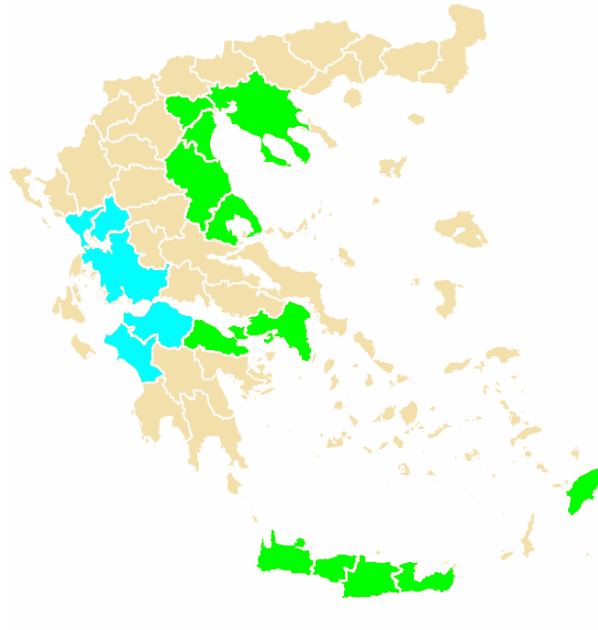
Όσον αφορά τον ελληνικό χώρο παρουσιάζεται χάρτης με την σχετική υγρασία σε κάθε περιοχή:



Εικόνα 1: Χάρτης σχετικής υγρασίας της Ελλάδας.

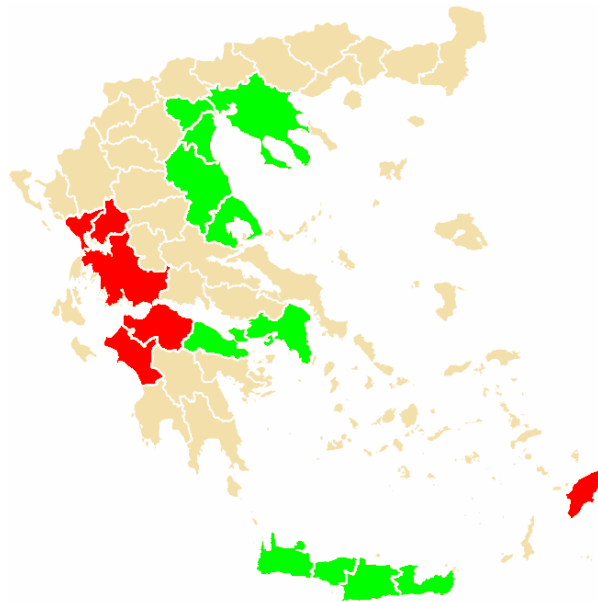
Στις περιοχές της χώρας με ημίξηρο κλίμα η αποδοτικότητα της εξατμιστικής ψυκτικής μονάδας θα είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα δεν θα έχει ικανοποιητική απόδοση στις περιοχές με υγρό κλίμα που είναι κυρίως στην δυτική Ελλάδα.

Με βάση τα στοιχεία κάποιων περιοχών της χώρας και υπολογισμούς μιας γνωστής εταιρίας, που κατασκευάζει ψυκτικές μονάδες με χρήση του κύκλου του Maisotsenko, έγινε εκτίμηση για το αν είναι λειτουργικές ή όχι αυτές οι μονάδες. Παρακάτω φαίνονται δύο χάρτες, ο ένας αφορά την βιομηχανική εφαρμογή της εξατμιστικής ψύξης και ο άλλος την οικιακή.^[8]



Εικόνα 2: Λειτουργικότητα εξατμιστικού ψύκτη σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις 200m².

- Πολύ καλή για τις περισσότερες εγκαταστάσεις
- Καλή για κάποιες εγκαταστάσεις
- Δεν υπάρχουν στοιχεία για τις περιοχές αυτές.



Εικόνα 3: Λειτουργικότητα εξατμιστικού ψύκτη σε οικιακές εφαρμογές 200m².

- Καλή σε κάποιες οικιακές εφαρμογές
- Κακή για οικιακή χρήση σε αυτές τις περιοχές
- Δεν υπάρχουν στοιχεία για τις περιοχές αυτές.

4.2 Οικονομική σύγκριση της μονάδας εξατμιστικής ψύξης με συμβατικό κλιματιστικό

Η εξατμιστική ψύξη με χρήση του κύκλου του Maisotsenko έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά κλιματιστικά. Τα οφέλη είναι κυρίως περιβαλλοντικά αφού η κατανάλωση ενέργειας είναι αρκετά μικρότερη στην πρώτη περίπτωση. Στο κεφάλαιο αυτό θα συγκριθεί οικονομικά η εξατμιστική μονάδα του εργαστηρίου με ένα παράδειγμα συμβατικού κλιματιστικού. Συγκεκριμένα θα δούμε μετά από ποιες ώρες λειτουργίας συμφέρει η εξατμιστική μονάδα επειδή η αρχική τιμή της είναι μεγαλύτερη.

Τα χαρακτηριστικά της εξατμιστικής μονάδας ψύξης είναι τα εξής:

Ψυκτική Ισχύς:	$P_c = 5RT_c$ (Ψυκτικοί Τόνοι) ή 60000BTU/hr
Κατανάλωση Ρεύματος:	$P_{ev_el} = 750\text{W}$
Μέση Κατανάλωση Νερού:	$m_w = 60\text{L/hr}$
Κόστος Αγοράς:	$C_{ev_buy} = 4000\text{€}$

Η σύγκριση θα γίνει με ένα συμβατικό κλιματιστικό ίδιας ψυκτικής ισχύος. Οπότε κατόπιν έρευνας αγοράς επιλέχθηκε ένα παράδειγμα κλιματιστικού με τα εξής χαρακτηριστικά:

Ψυκτική Ισχύς:	$P_c = 60000\text{BTU/hr}$
Κατανάλωση Ρεύματος:	$P_{AC_el} = 6150\text{W}$
Κόστος Αγοράς:	$C_{AC_buy} = 1800\text{€}$

Επίσης βρέθηκαν οι χρεώσεις ρεύματος και νερού χωρίς πάγιο που είναι:

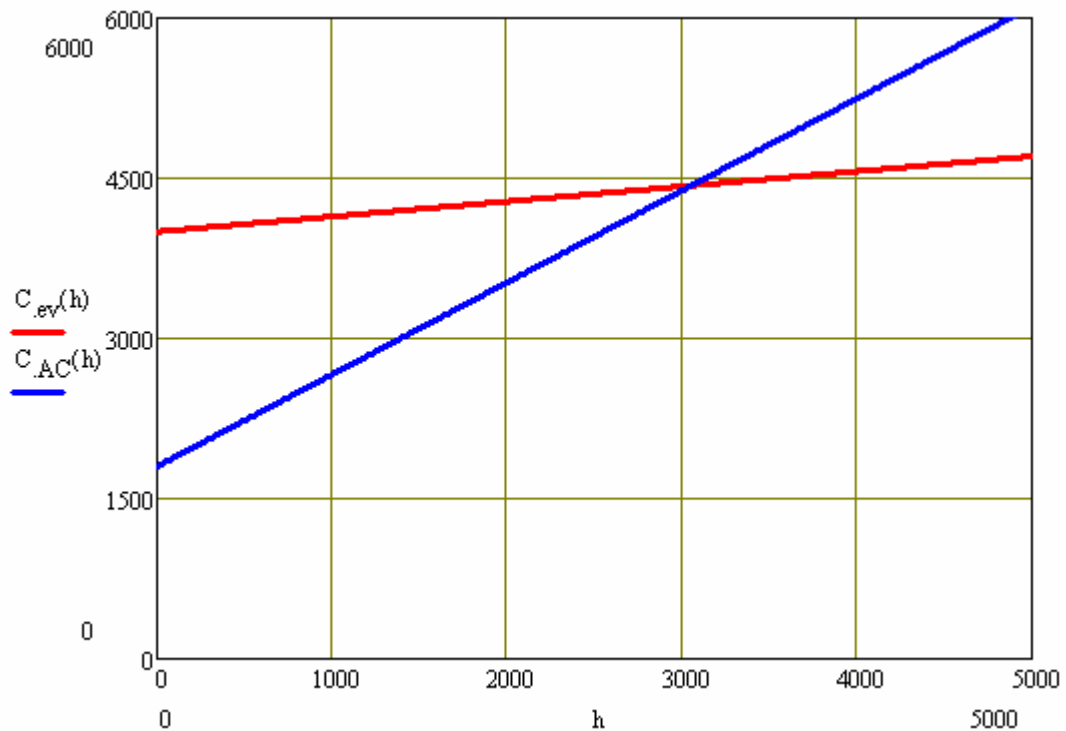
Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας:	$C_{elec} = 0.14\text{€/kW}\cdot\text{hr}$
Κόστος νερού:	$C_{wat} = 0.60\text{€/m}^3$

Έτσι υπολογίζονται τα συνολικά κόστη λειτουργίας των δύο ψυκτικών μονάδων ως συνάρτηση των ωρών λειτουργίας:

$$C_{ev}(h) = C_{ev_buy} + P_{ev_el} \cdot C_{elec} \cdot h + m_w \cdot C_{wat} \cdot h$$

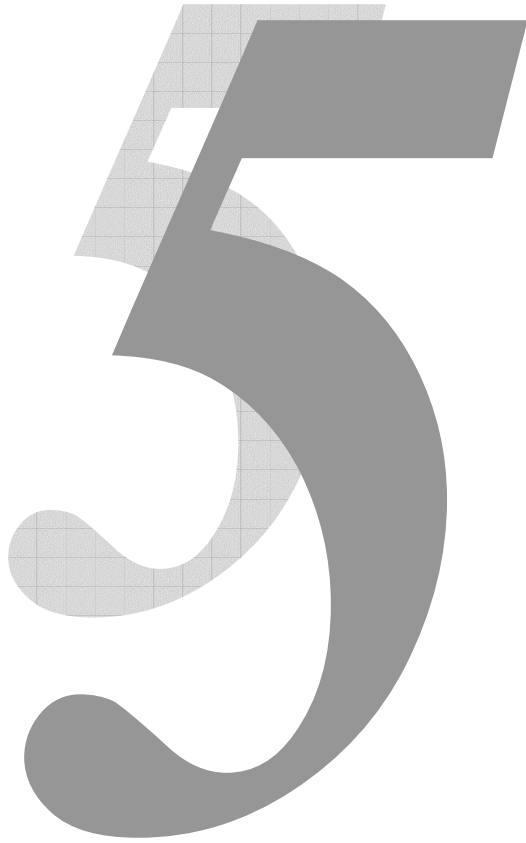
$$C_{AC}(h) = C_{AC_buy} + P_{AC_el} \cdot C_{elec} \cdot h$$

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα με τα δύο διαφορετικά συνολικά κόστη σε σχέση με τις ώρες λειτουργίας:



Διάγραμμα 1: Κόστος σε ευρώ – ώρες λειτουργίας. Με κόκκινο χρώμα είναι το συνολικό λειτουργικό κόστος της μονάδας εξατμιστικής ψύξης, ενώ με μπλε το συνολικό κόστος του συμβατικού κλιματιστικού.

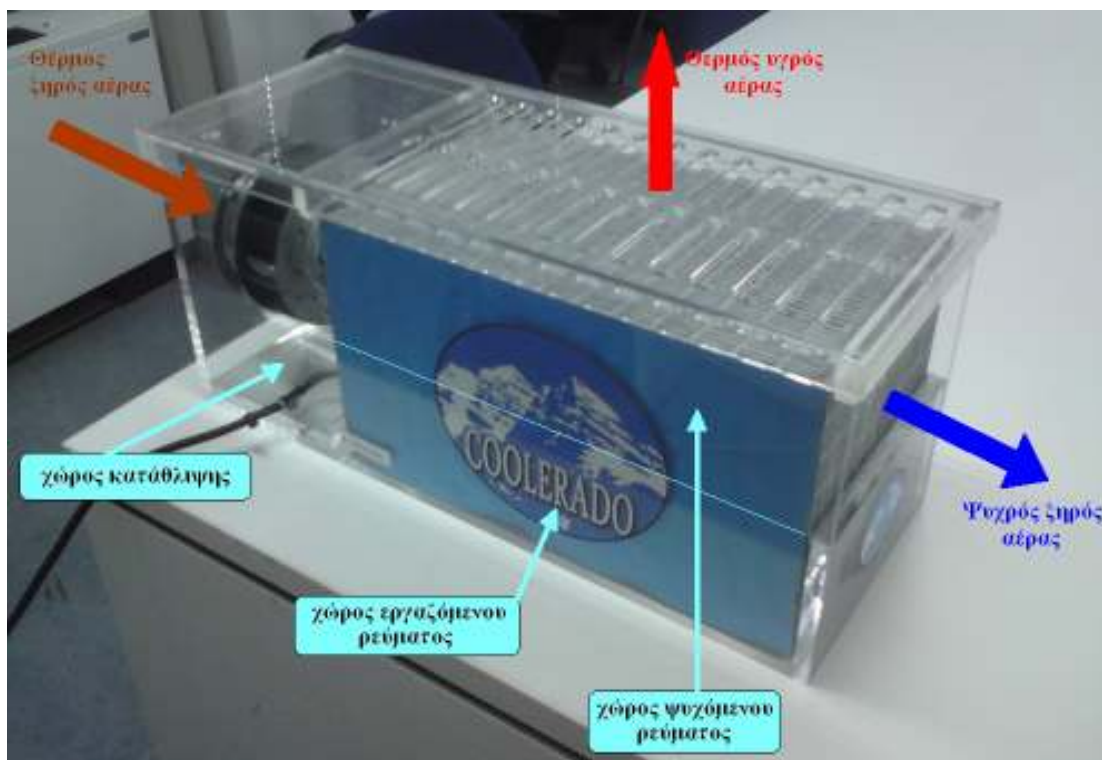
Το συμπέρασμα, που προκύπτει είτε λύνοντας τις δύο σχέσεις με τα κόστη είτε γραφικά, είναι ότι χρησιμοποιώντας την μονάδα εξατμιστικής ψύξης έχουμε οικονομικό κέρδος μετά τις **3056** ώρες λειτουργίας. Η καμπύλη του συμβατικού κλιματιστικού έχει μεγαλύτερη κλίση διότι η κατανάλωση ρεύματος είναι πολύ πιο δαπανηρή από την αντίστοιχη του νερού, ώστε τελικά η κατανάλωση του νερού από την μονάδα εξατμιστικής ψύξης να έχει μικρή συμβολή στην αύξηση του συνολικού κόστους λειτουργίας.



Πειραματικές μετρήσεις στην ψυκτική μονάδα

5.1 Περιγραφή του πειράματος και της ψυκτικής μονάδας

Με σκοπό την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του ψύκτη Maisotsenko, εκτελέστηκαν μετρήσεις στην επιδεικτική μονάδα. Η επιδεικτική μονάδα (demo) είναι κατασκευασμένη από διαφανές πλαστικό και περιλαμβάνει τρεις βασικές περιοχές: το χώρο κατάθλιψης, το χώρο εργαζόμενου ρεύματος και το χώρο ψυχόμενου ρεύματος. Παρακάτω βρίσκεται μια φωτογραφία της μονάδας με σημειωμένες αυτές τις τρεις περιοχές (σχήμα 1).



Σχήμα 1: Demo μονάδα του Maisotsenko

- Ο νωπός αέρας από το περιβάλλον, που είναι ξηρός και θερμός, αναρροφάται από τον ακτινικό ανεμιστήρα, η είσοδος του οποίου είναι κυκλικής διατομής και διαμέτρου 95mm και καταθλίβεται. Η ισχύς του ανεμιστήρα είναι 40W. Στο δεξί όριο του χώρου κατάθλιψης εντοπίζεται ο εναλλάκτης θερμότητας και μάζας (HMX). Στο κάλυμμα του ψύκτη έχει προβλεφθεί οπή για την τοποθέτηση μετρητικού στοιχείου στο χώρο κατάθλιψης.

- Το κάτω μέρος του HMX περιλαμβάνει το χώρο του εργαζόμενου ρεύματος. Εκεί λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της εξάτμισης του νερού και καθορίζεται η δρομολόγηση του ρεύματος αέρα. Η είσοδος του χώρου εργαζόμενου ρεύματος είναι διαστάσεων 70mm×190mm, ενώ η έξοδος του (απ' όπου εξέρχεται θερμός και υγρός σε κάποιες δε βαθμίδες, κορεσμένος αέρας) είναι 365mm×190mm. Από την έξοδο του χώρου αυτού,

και αφού αφαιρεθεί το κάλυμμα του ψύκτη, γίνεται η τροφοδοσία του νερού σε ποσότητα περίπου 1L.

- Από το πάνω μέρος του HMX διακινείται το ψυχόμενο ρεύμα. Συναλλάσσοντας θερμότητα σε αντιστροφή με το ανερχόμενο εργαζόμενο ρεύμα, του αποδίδει τη θερμότητά του και η δική του θερμοκρασία μειώνεται. Η τεχνική που ακολουθείται είναι αυτή της μη άμεσης εξάτμισης (indirect cooling), οπότε αναμένεται ο λόγος υγρασίας στην έξοδο του ψυχόμενου ρεύματος να είναι ίσος με τον αντίστοιχο του αέρα τροφοδοσίας.

Για την εκτέλεση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η μετρητική συσκευή Testo 445. Η εν λόγω συσκευή καταγράφει, με τη βοήθεια μετρητικής ράβδου, θερμοκρασία ξηρού βολβού, σχετική υγρασία, θερμοκρασία σημείου δρόσου και τη ταχύτητα του αέρα. Ως πλεονέκτημά της συσκευής καταγράφεται η φορητότητα και η απλότητά της, ενώ στα μειονεκτήματά της περιλαμβάνονται ο υψηλός χρόνος εκκίνησης και η μάλλον αργή απόκριση σε μεταβολές των μετρούμενων μεγεθών.

Στον χώρο της κατάθλιψης έχει τοποθετηθεί μετρητικό στοιχείο που μετράει τη θερμοκρασία ξηρού βολβού και την σχετική υγρασία του αναρροφούμενου νεπού αέρα από το περιβάλλον και οι μετρήσεις καταγράφονται σε πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή (SUPCO Logger Interface). Αυτές οι μετρήσεις είχαν μικρή απόκλιση μεταξύ τους και ως τελικές μετρήσεις ορίστηκαν οι μέσοι όροι των δύο μεγεθών.

Έγιναν μετρήσεις με τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αρχικών συνθηκών ώστε να δούμε την αποδοτικότητα της ψυκτικής μονάδας ευρύτερα:

1. Στην πρώτη περίπτωση ο εισερχόμενος αέρας ήταν απλά του περιβάλλοντος με θερμοκρασία δωματίου (περίπου 22 °C).
2. Στην δεύτερη τοποθετήθηκε θερμική αντίσταση περίπου 900W πριν την αναρρόφηση του αέρα από τον ανεμιστήρα ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του αέρα, δημιουργώντας έτσι αρχικές συνθήκες θερμού περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα όπως καταγράφηκε από το μετρητικό στοιχείο είναι περίπου 42 °C.
3. Τέλος, στην τρίτη περίπτωση αυξήθηκε η θερμική αντίσταση στα 1800W με στόχο να δημιουργήσουμε συνθήκες εισόδου ακόμα μεγαλύτερης θερμοκρασίας (περίπου 52 °C).

Για καθεμία από τις παραπάνω περιπτώσεις καθορίστηκε ο ίδιος τρόπος λήψης των μετρήσεων. Τα μεγέθη που καταγράφηκαν σε πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή (Mathcad 14) είναι η θερμοκρασία ξηρού βολβού, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του αέρα. Για την επίτευξη ακριβέστερων προβλέψεων, καθορίστηκαν σημεία στις περιοχές εξόδου των δύο ρευμάτων (ψυχόμενου και εργαζόμενου). Η πάνω επιφάνεια που εξέρχεται το εργαζόμενο ρεύμα χωρίστηκε σε 112 (14×8) ισεμβαδικά μέρη (*σχήμα 2*), ενώ η επιφάνεια που εξέρχεται ο ψυχόμενος αέρας χωρίστηκε σε 32 (4×8) (*σχήμα 3*). Σε κάθε εμβαδόν από αυτά μετρήθηκαν τα παραπάνω μεγέθη (θερμοκρασία ξηρού βολβού,

η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του αέρα). Έτσι κατασκευάστηκαν συνολικά 6 πίνακες μετρήσεων (για το κάθε μέγεθος και τη για κάθε πλευρά της μονάδας).



Σχήμα 2: Άνω πλευρά της ψυκτικής μονάδας απ' όπου εξέρχεται ο εργαζόμενος αέρας κορεσμένος



Σχήμα 3: Πλάγια πλευρά της ψυκτικής μονάδας απ' όπου εξέρχεται ο αέρας που ψύχεται

Λαμβάνοντας μετρήσεις των τιμών θερμοκρασίας ξηρού βολβού, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ρεύματος αέρα σε καθένα από τα σημεία και ανάγοντας τα μεγέθη αυτά σε αντίστοιχες περιοχές, εκτελέστηκαν προκαταρτικοί ισολογισμοί μάζας και ενέργειας με την βοήθεια του προγράμματος Mathcad.

- ♦ Το κάθε τμήμα επιφανείας της άνω πλευράς έχει εμβαδόν:

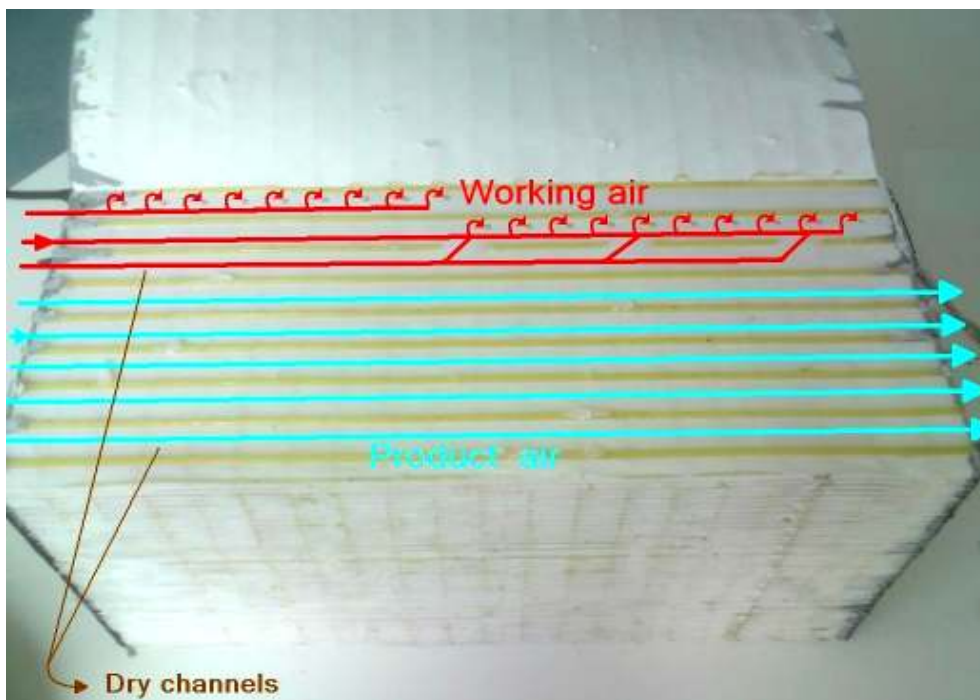
$$A_a = \frac{365mm \cdot 190mm}{112} = 619.20mm^2$$

- ♦ Το κάθε τμήμα επιφανείας της πλάγιας πλευράς έχει εμβαδόν:

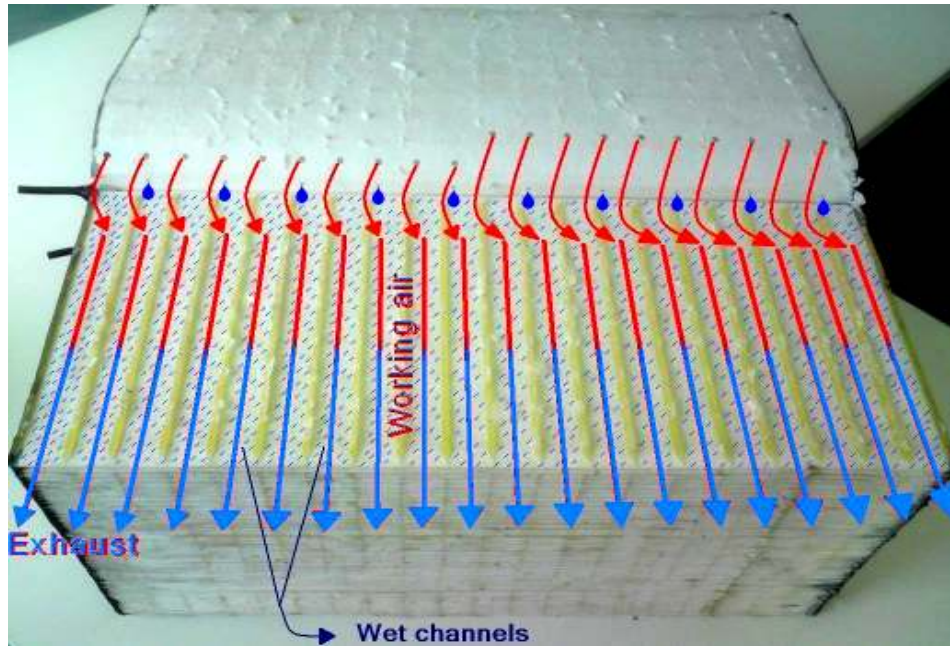
$$A_a = \frac{70mm \cdot 190mm}{32} = 415.63mm^2$$

Για την ομαλή λειτουργία της ψυκτικής μονάδας εκτός από το νερό (κρύο μεταλλικό) που βάζουμε αρχικά από τη άνω πλευρά προσθέτουμε κι άλλο στην συνέχεια, διότι αυτό εξατμίζεται μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι απαιτούμενες μετρήσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, η πρόσθεση νερού είναι μεγαλύτερη στις περιπτώσεις με υψηλότερη θερμοκρασία αρχικών συνθηκών (η εξάτμιση του νερού γίνεται πιο γρήγορα αφού αυτό παραλαμβάνει περισσότερη λανθάνουσα θερμότητα όταν η αρχική θερμοκρασία του αέρα αυξάνει).

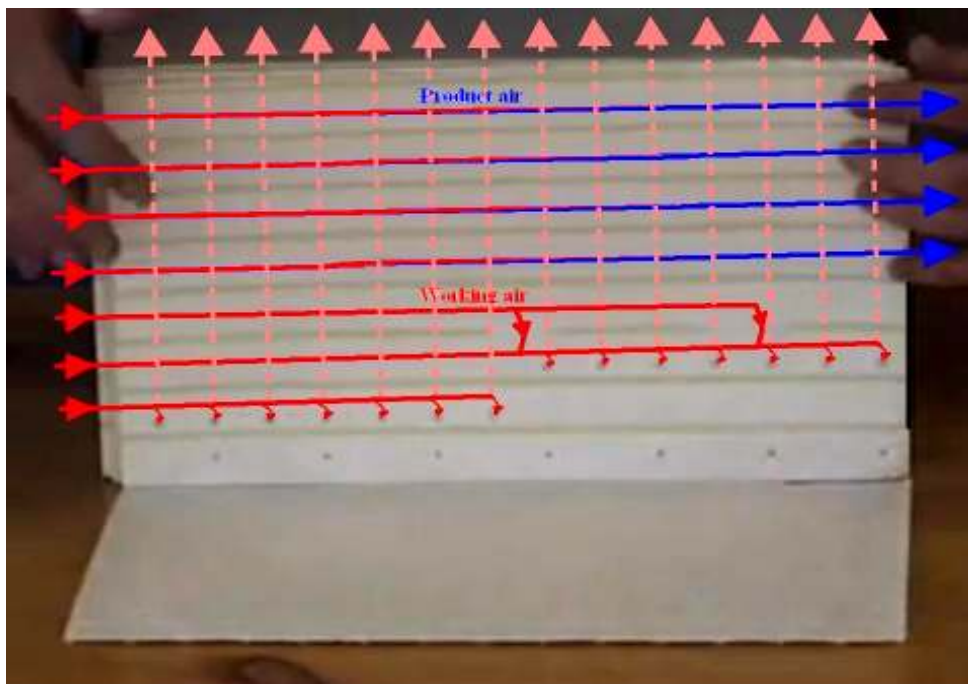
Παρακάτω βρίσκονται φωτογραφίες (σχήματα 4, 5, 6 & 7) από δύο παρόμοιες ανοιγμένες ψυκτικές μονάδες στις οποίες έχει σχεδιαστεί η πορεία των ρευμάτων αέρος.



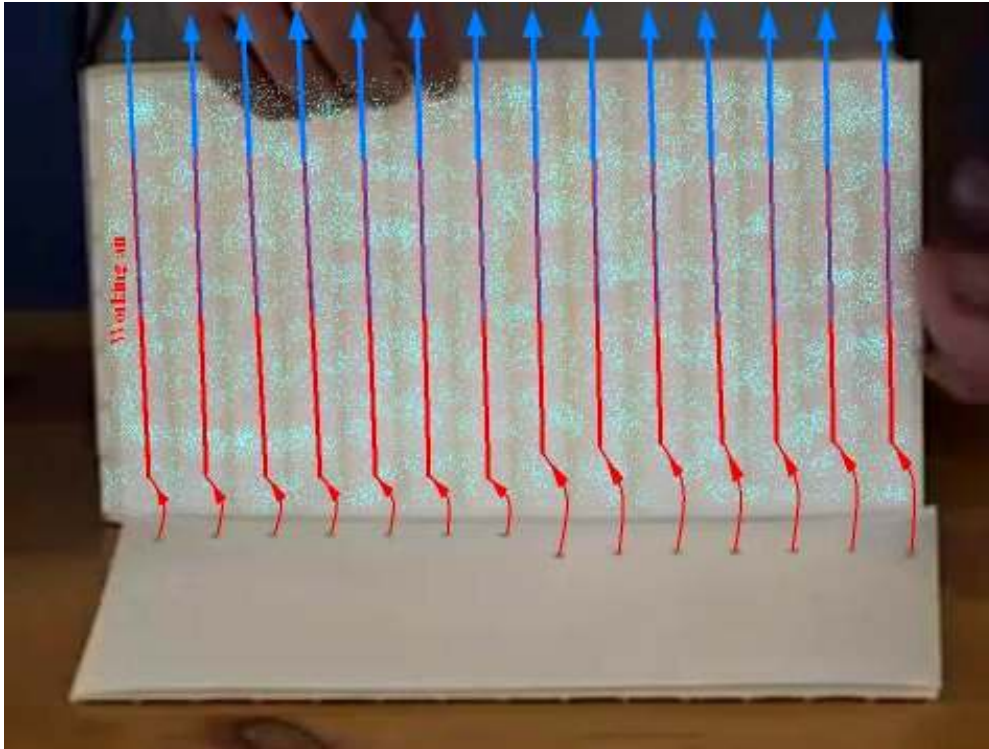
Σχήμα 4: Διακρίνονται τα στεγνά κανάλια και οι ροές του εργαζόμενου και του παραγόμενου αέρα



Σχήμα 5: Διακρίνονται τα υγρά κανάλια και οι ροή του εργαζόμενου αέρα που γίνεται κορεσμένος



Σχήμα 6: Διακρίνεται η διασταυρούμενη ροή στην οριζόντια και ξηρή πλευρά. Με κόκκινο χρώμα παριστάνεται ο εισερχόμενος αέρας, με μπλε ο αέρας που φύγεται και με ροζ το ρεύμα αέρος που περνάει μέσω των οπών στα κάθετα και υγρά κανάλια που βρίσκονται στην πίσω πλευρά.



Σχήμα 7: Η κάθετη και «υγρή» πλευρά της μονάδας. Το ρεύμα αέρος που εισέρχεται απ' το περιβάλλον στα οριζόντια κανάλια μέσω των οπών περνάει στα κάθετα και «υγρά» κανάλια. Ο εργαζόμενος αυτός αέρας παραλαμβάνει υγρασία από τα κανάλια και θερμότητα από το ρεύμα του παραγόμενου αέρα και εξέρχεται κορεσμένος.

Τα κανάλια στα οποία ρέει ο παραγόμενος αέρας είναι κατασκευασμένα από λείο και στιλπνό χαρτί διότι σ' αυτά δεν περνάει νερό. Αντίθετα τα κανάλια του εργαζόμενου ρεύματος αέρα είναι από απορροφητικό χαρτί γιατί εκεί πρέπει να κατακρατείται το νερό και καθώς περνάει ο θερμός αέρας αυτό να εξατμίζεται λαμβάνοντας την λανθάνουσα θερμότητα του.

Τα αποτελέσματα αλλά και η επεξεργασία των μετρήσεων είναι καταγεγραμμένα σε πρόγραμμα Mathcad. Η καθεμιά από τις τρεις περιπτώσεις αρχικών συνθηκών βρίσκεται σε διαφορετικό αρχείο προγράμματος για λόγους ευχρηστίας.

5.2 Αποτελέσματα του πειράματος

5.2.1 Σφάλματα

Οι μετρήσεις που καταγράφηκαν έχουν σφάλματα μετρήσεως διότι η μετρητική συσκευή Testo 445 δεν έδινε ικανοποιητικά αξιόπιστες μετρήσεις ειδικότερα της ταχύτητας. Η τιμή της μεταβαλλόταν συνεχώς οπότε αναγκαστικά λήφθηκε μια μέση

τιμή της τελικώς για κάθε μέτρηση. Ακόμα υπήρχε ένα μικρό ελάττωμα στεγανότητας στην demo μονάδα που είχε κάποια επίδραση στην ορθότητα των μετρήσεων. Επίσης υπήρχαν σφάλματα λόγω των συνθηκών στις οποίες διεξήχθη το πείραμα. Επειδή η διάρκεια του πειράματος ήταν αρκετά μεγάλη, ο χώρος μέσα στον οποίον ήταν η ψυχτική μονάδα έπαιρνε συνεχώς υγρασία, γιατί από την άνω πλευρά της μονάδος, όπως έχει προαναφερθεί, εξερχόταν σχεδόν κορεσμένος αέρας. Έτσι ο εισερχόμενος αέρας μέσω του ανεμιστήρα όσο περνούσε ο χρόνος γινόταν πιο υγρός. Όλα αυτά τα σφάλματα στις μετρήσεις για τους λόγους που αναφέρθηκαν είχαν κάποια επίδραση στα τελικά αποτελέσματα.

5.2.2 Πίνακες αποτελεσμάτων

Στο πρόγραμμα Mathcad 14 δημιουργήσαμε πίνακες των αποτελεσμάτων γιατί οι μετρήσεις ελήφθησαν για κάθε περιοχή των δύο πλευρών όπως προαναφέρθηκαν παραπάνω αναλυτικά. Παρακάτω θα καταγραφούν οι πίνακες των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων για καθεμιά από τις τρεις περιπτώσεις αρχικών συνθηκών.

➤ Μετρήσεις χωρίς θερμική αντίσταση

Άνω πλευρά

Πίνακας 1: Θερμοκρασίες (°C)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
1	21.7	21.2	21.5	21.8	21.4	21.3	21.1	20.4
2	21.1	20.9	21.0	21.0	20.6	20.8	20.8	20.2
3	20.6	20.6	20.3	20.2	19.7	20.0	20.1	19.7
4	20.2	19.7	19.4	19.8	19.2	19.0	19.8	19.3
5	19.5	19.5	19.2	19.1	18.9	18.7	19.0	18.8
6	19.4	19.3	19.2	18.9	18.5	18.5	18.7	18.7
7	18.5	18.6	18.9	18.3	17.9	18.0	18.3	17.7
8	18.2	18.3	18.7	18.1	18.0	17.9	17.8	17.5
9	17.9	17.7	18.0	17.8	17.5	17.8	17.4	17.1
10	17.7	17.4	17.9	17.6	17.9	17.7	17.2	16.6
11	17.7	17.3	17.7	16.9	17.4	17.2	16.9	16.5
12	17.6	17.1	17.4	16.8	17.1	16.8	16.3	16.0
13	17.4	16.8	17.2	16.8	16.4	16.6	16.0	15.9
14	16.6	16.6	16.6	17.7	16.4	16.1	15.9	16.6

Πίνακας 2: Σχετική υγρασία (%)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
1	95	98	99	99	97	90	95	92
2	97	98	97	99	97	96	92	96
3	99	96	96	98	94	95	93	93
4	98	95	94	97	93	95	95	93
5	96	94	93	94	94	93	93	93
6	94	94	94	93	92	93	92	94
7	92	93	94	92	91	93	91	91
8	92	94	92	93	92	92	91	90
9	91	92	92	89	93	92	92	91
10	91	90	92	88	94	92	90	91
11	89	91	92	90	92	91	88	90
12	89	90	91	90	91	91	92	90
13	91	90	91	90	91	91	92	91
14	90	89	90	89	91	92	92	93

Πίνακας 3: Ταχύτητες αέρα (m/s)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
1	1.47	0.58	0.76	0.62	0.95	2.20	1.47	1.45
2	0.47	0.35	0.82	0.40	0.92	0.74	1.82	0.68
3	0.31	0.98	0.33	0.55	0.72	1.10	0.75	0.66
4	0.25	0.57	0.43	0.84	0.50	0.55	0.42	0.64
5	0.18	0.32	0.58	0.25	0.89	0.66	0.44	0.50
6	0.44	0.37	0.34	0.21	0.58	0.63	0.55	0.65
7	0.66	0.36	0.31	0.34	0.88	0.89	0.58	0.37
8	0.42	0.32	0.30	0.55	0.87	0.84	0.56	0.52
9	0.88	0.45	0.73	0.35	0.45	0.35	0.67	0.79
10	0.32	0.63	0.32	0.88	0.52	0.49	0.90	0.58
11	0.76	0.88	0.33	0.22	0.82	0.54	0.63	0.57
12	0.60	0.88	0.92	0.50	0.47	0.53	0.55	0.93
13	0.42	0.78	0.42	0.66	0.67	0.90	0.82	1.41
14	0.87	0.92	0.71	0.25	0.32	0.69	0.51	1.11

Οι παρακάτω τρεις πίνακες είναι αυτοί που προέκυψαν κατόπιν επεξεργασίας στο πρόγραμμα Mathcad 14 μέσω ψυχομετρικών εξισώσεων και αφορούν τον λόγο υγρασίας, την ειδική ενθαλπία και τον ειδικό όγκο για κάθε ισεμβαδικό μέρος της επιφάνειας. Υπάρχουν οι αντίστοιχοι πίνακες και για την πλάγια πλευρά παρακάτω.

Πίνακας 4: Λόγοι υγρασίας (gm/kg)

15.52	15.53	15.99	16.30	15.56	14.32	14.95	13.84
15.27	15.24	15.18	15.50	14.80	14.83	14.20	14.28
15.11	14.64	14.37	14.58	13.54	13.95	13.73	13.39
14.58	13.69	13.28	14.07	12.97	13.09	13.77	13.06
13.66	13.37	12.97	13.03	12.87	12.57	12.81	12.65
13.28	13.20	13.11	12.73	12.27	12.41	12.43	12.70
12.27	12.49	12.87	12.11	11.68	12.02	11.98	11.53
12.04	12.38	12.43	12.09	11.88	11.81	11.60	11.25
11.68	11.66	11.88	11.34	11.64	11.73	11.43	11.09
11.53	11.18	11.81	11.07	12.07	11.66	11.04	10.74
11.27	11.24	11.66	10.83	11.43	11.16	10.58	10.55
11.20	10.97	11.31	10.76	11.09	10.88	10.65	10.21
11.31	10.76	11.16	10.76	10.60	10.74	10.44	10.26
10.62	10.50	10.62	11.27	10.60	10.51	10.38	10.98

Πίνακας 5: Τιμές ειδικής ενθαλπίας (kJ/kg)

61.1	60.6	62.1	63.2	60.9	57.7	59.1	55.5
59.9	59.6	59.5	60.3	58.2	58.4	56.8	56.4
59.0	57.8	56.8	57.2	54.0	55.4	54.9	53.7
57.2	54.4	53.1	55.5	52.1	52.2	54.7	52.4
54.1	53.4	52.1	52.1	51.5	50.6	51.5	50.9
53.1	52.8	52.5	51.2	49.6	49.9	50.2	50.9
49.6	50.2	51.5	49.0	47.5	48.4	48.7	46.9
48.7	49.7	50.2	48.7	48.1	47.8	47.2	46.0
47.5	47.2	48.1	46.5	47.0	47.5	46.4	45.2
46.9	45.7	47.8	45.6	48.5	47.2	45.1	43.8
46.2	45.7	47.2	44.3	46.4	45.5	43.7	43.2
46.0	44.9	46.0	44.0	45.2	44.3	43.2	41.8
46.0	44.0	45.5	44.0	43.2	43.8	42.4	41.9
43.5	43.2	43.5	46.2	43.2	42.7	42.2	44.4

Πίνακας 6: Τιμές ειδικών όγκων (m³/kg)

0.843	0.842	0.843	0.844	0.842	0.842	0.841	0.839
0.841	0.841	0.841	0.841	0.840	0.840	0.840	0.838
0.840	0.840	0.839	0.839	0.837	0.838	0.838	0.837
0.839	0.837	0.836	0.837	0.835	0.834	0.837	0.835
0.836	0.836	0.835	0.835	0.834	0.833	0.834	0.834
0.836	0.835	0.835	0.834	0.833	0.833	0.833	0.833
0.833	0.833	0.834	0.832	0.831	0.831	0.832	0.830
0.832	0.832	0.833	0.831	0.831	0.831	0.830	0.829
0.831	0.830	0.831	0.830	0.829	0.830	0.829	0.828
0.830	0.829	0.831	0.829	0.831	0.830	0.828	0.826
0.830	0.829	0.830	0.827	0.829	0.828	0.827	0.826
0.829	0.828	0.829	0.827	0.828	0.827	0.825	0.824
0.829	0.827	0.828	0.827	0.826	0.826	0.825	0.824
0.826	0.826	0.826	0.830	0.826	0.825	0.824	0.826

Πλάγια πλευρά

Πίνακας 7: Θερμοκρασίες (°C)

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>a</i>	16.0	15.0	15.8	15.4	16.2	15.6	16.1	16.5
<i>b</i>	15.8	14.7	14.4	14.9	15.0	14.8	15.1	15.4
<i>c</i>	14.9	14.1	14.3	14.5	14.9	14.3	14.4	14.7
<i>d</i>	13.8	13.6	13.5	13.9	13.9	13.9	14.0	14.3

Πίνακας 8: Σχετική υγρασία (%)

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>a</i>	85	83	79	77	75	74	73	74
<i>b</i>	90	84	78	75	79	77	75	79
<i>c</i>	91	85	76	77	77	79	79	77
<i>d</i>	94	83	80	80	81	80	80	80

Πίνακας 9: Ταχύτητες αέρα (m/s)

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>a</i>	1.54	1.60	4.15	4.65	2.15	3.75	3.30	2.60
<i>b</i>	1.59	1.42	4.20	3.10	2.95	2.75	3.90	1.30
<i>c</i>	0.78	1.10	2.25	2.75	0.95	1.65	3.25	0.95
<i>d</i>	1.35	1.58	4.35	3.00	1.40	2.45	2.55	1.80

Πίνακας 10: Λόγοι υγρασίας (gm/kg)

9.64	8.81	8.83	8.38	8.60	8.16	8.31	8.65
10.08	8.75	7.96	7.90	8.38	8.06	8.01	8.61
9.61	8.51	7.70	7.91	8.12	8.01	8.06	8.01
9.24	8.04	7.70	7.90	8.00	7.90	7.95	8.11

Πίνακας 11: Τιμές ειδικής ενθαλπίας (kJ/kg)

40.4	37.3	38.1	36.6	38.0	36.2	37.1	38.4
41.3	36.8	34.5	34.9	36.2	35.2	35.3	37.2
39.2	35.6	33.8	34.5	35.4	34.5	34.8	34.9
37.1	33.9	32.9	33.9	34.1	33.9	34.1	34.8

Πίνακας 12: Τιμές ειδικών όγκων (m³/kg)

0.824	0.821	0.823	0.822	0.824	0.822	0.824	0.825
0.824	0.820	0.819	0.820	0.821	0.820	0.821	0.822
0.821	0.818	0.818	0.819	0.820	0.818	0.819	0.820
0.818	0.817	0.816	0.817	0.817	0.817	0.818	0.819

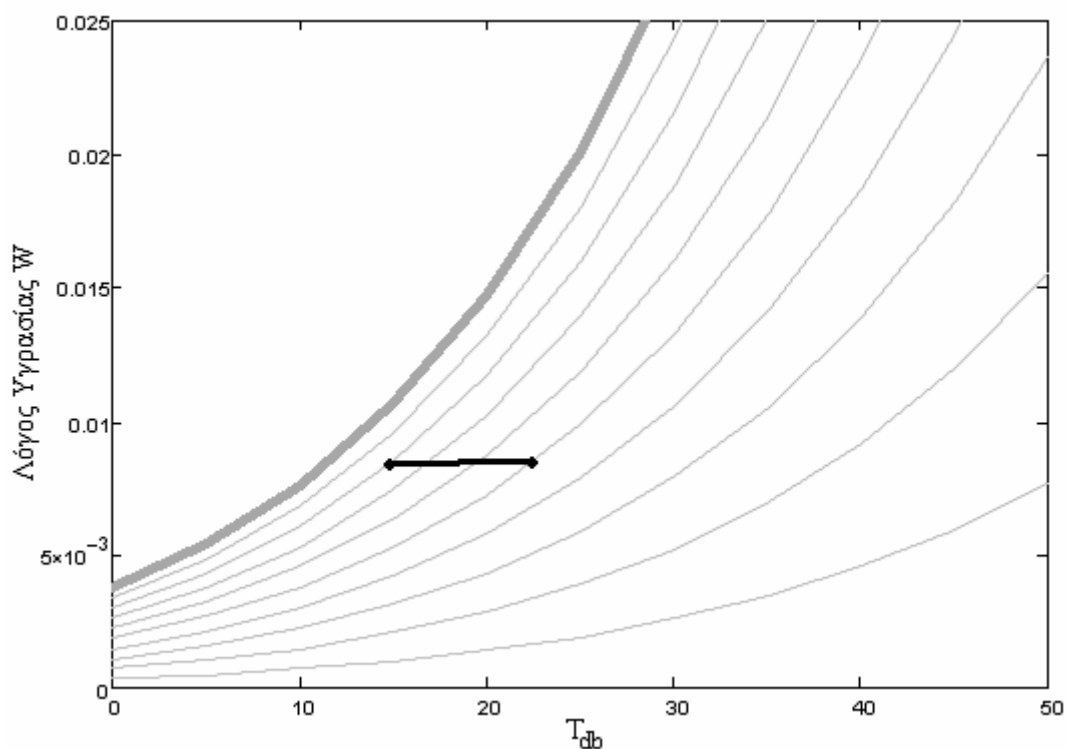
Με βάση τις παραπάνω τιμές που αναφέρονται στην έξοδο του αέρα από τις δύο πλευρές καθώς και της παροχής μάζας στην είσοδο και νερού από την άνω πλευρά οι οποίες έχουν καταγραφεί στο προγραμματιστικό μέρος, έγιναν τα ισοζύγια μάζας αέρα, μάζας νερού και συναλλασσόμενης ενέργειας. Προέκυψαν οι εξής αποκλίσεις:

Για την μάζα του νερού: $\sigma_{\text{νερού}} = 0,287\%$

Για την μάζα του αέρα: $\sigma_{\text{αέρα}} = 4,149\%$

Για την συναλλασσόμενη ενέργεια: $\sigma_{\text{ενέργειας}} = 2,074\%$

Επίσης έγινε απεικόνιση της μεταβολής (αρχικές συνθήκες – συνθήκες μετά την ψυκτική μονάδα) σε ψυχομετρικό χάρτη στο πρόγραμμα θεωρώντας μέσες τιμές της θερμοκρασίας και του λόγου υγρασίας στην έξοδο (στην πλάγια πλευρά του ψύκτη). Επειδή υπήρχαν σφάλματα στις μετρήσεις των αρχικών συνθηκών, έγιναν κατάλληλες διορθώσεις σε αυτές στο πρόγραμμα του Mathcad για να μην υπάρχει μεγάλη κλίση στην ευθεία της μεταβολής. Ο ψυχομετρικός χάρτης με την μεταβολή αυτή φαίνεται και παρακάτω.



Σχήμα 8: Ψυχομετρικός χάρτης με την μεταβολή

➤ Μετρήσεις με θερμική αντίσταση **900W**

Άνω πλευρά

Πίνακας 13: Θερμοκρασίες (°C)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
1	36.3	37.6	38.7	38.2	37.2	38.9	40.3	39.2
2	34.5	34.7	35.6	36.1	36.0	37.0	37.5	36.0
3	33.2	33.4	32.6	33.2	33.8	34.1	33.5	33.4
4	32.1	31.7	29.7	30.3	31.2	31.5	32.9	32.4
5	30.0	28.9	27.8	28.4	30.6	29.2	30.8	30.7
6	27.2	27.3	27.0	27.1	29.2	28.5	29.4	30.3
7	27.1	25.4	25.9	26.5	27.2	27.5	28.4	29.7
8	25.8	24.8	24.0	25.1	25.6	25.3	26.8	30.0
9	25.5	24.5	23.7	23.7	24.7	24.8	25.5	27.4
10	25.3	23.8	23.4	22.8	23.9	24.2	25.4	26.2
11	24.2	23.1	23.3	22.9	22.8	23.5	23.9	23.2
12	23.8	21.4	22.8	22.4	22.2	22.9	23.7	22.3
13	23.2	23.0	22.3	21.8	22.1	22.2	21.9	21.3
14	22.5	22.6	21.2	21.4	21.7	21.8	21.4	21.9

Πίνακας 14: Σχετική υγρασία (%)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	100	100	100	100	100	100	100	100
3	100	100	99	99	99	100	99	100
4	98	100	97	98	96	99	99	97
5	98	99	97	97	98	98	97	98
6	96	95	97	95	97	96	95	97
7	94	95	92	93	91	92	94	93
8	93	94	94	91	92	93	92	90
9	91	90	86	87	89	87	86	88
10	84	83	85	86	87	84	85	86
11	81	84	82	83	82	81	80	81
12	78	79	77	78	77	79	80	78
13	77	78	80	79	78	76	76	77
14	75	77	74	72	76	75	73	74

Πίνακας 15: Ταχύτητες αέρα (m/s)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
1	1.00	0.80	0.71	0.55	1.25	0.57	0.98	0.62
2	1.70	0.47	0.73	0.51	0.72	0.55	0.45	0.52
3	0.52	1.18	0.85	0.38	0.85	0.75	0.84	0.54
4	0.53	0.92	0.67	0.58	0.73	0.62	1.47	0.22
5	0.25	0.42	0.35	0.44	1.56	0.32	0.58	0.15
6	0.32	0.48	0.27	0.37	0.52	0.34	0.28	0.15
7	0.16	0.22	0.50	0.76	0.67	0.65	0.78	0.12
8	0.28	0.85	0.40	0.43	0.93	0.38	0.75	0.28
9	0.40	0.65	0.55	0.35	0.95	0.45	0.81	0.29
10	0.85	1.28	0.82	0.85	0.78	0.56	0.72	0.18
11	0.30	0.25	0.54	0.63	1.14	0.48	0.68	0.60
12	0.28	0.46	0.65	0.38	0.68	0.62	0.77	0.50
13	0.22	0.70	0.61	0.58	0.55	0.78	1.02	0.45
14	0.20	0.56	0.80	0.45	0.62	0.41	0.34	0.35

Οι παρακάτω τρεις πίνακες είναι αυτοί που προέκυψαν κατόπιν επεξεργασίας στο πρόγραμμα Mathcad 14 μέσω ψυχομετρικών εξισώσεων και αφορούν τον λόγο υγρασίας, την ειδική ενθαλπία και τον ειδικό όγκο για κάθε ισεμβαδικό μέρος της επιφάνειας. Υπάρχουν οι αντίστοιχοι πίνακες και για την πλάγια πλευρά παρακάτω.

Πίνακας 16: Λόγοι υγρασίας (gm/kg)

39.47	42.57	45.37	44.08	41.59	45.90	49.75	46.7
35.53	35.95	37.89	39.02	38.79	41.11	42.33	38.79
32.91	33.30	31.43	32.57	33.74	34.71	33.15	33.30
30.19	30.12	25.89	27.13	28.01	29.45	32.00	30.41
26.64	25.21	23.09	23.94	27.62	25.40	27.65	27.78
22.03	21.92	22.00	21.66	25.13	23.83	24.88	26.84
21.42	19.53	19.48	20.43	20.84	21.47	23.18	24.78
19.58	18.62	17.72	18.34	19.12	18.99	20.57	24.38
18.79	17.48	15.88	16.07	17.49	17.19	17.73	20.38
17.10	15.40	15.40	15.02	16.26	15.98	17.41	18.50
15.40	14.93	14.75	14.57	14.30	14.75	14.92	14.48
14.45	12.62	13.41	13.26	12.92	13.85	14.74	13.17
13.75	13.76	13.52	12.94	13.01	12.75	12.51	12.22
12.81	13.24	11.66	11.48	12.36	12.27	11.64	12.18

Πίνακας 17: Τιμές ειδικής ενθαλπίας (kJ/kg)

137.6	147	155.3	151.5	144.0	156.9	168.3	159.3
125.6	126.9	132.8	136.2	135.5	142.6	146.2	135.5
117.5	118.7	113.1	116.6	120.2	123.0	118.4	118.7
109.4	108.7	95.8	99.6	102.8	106.8	114.8	110.2
98.1	93.3	86.7	89.5	101.2	94.1	101.5	101.7
83.4	83.2	83.1	82.3	93.4	89.3	93.0	98.9
81.7	75.1	75.5	78.6	80.4	82.3	87.6	93.0
75.7	72.2	69.1	71.8	74.3	73.6	79.3	92.3
73.4	69.0	64.1	64.6	69.2	68.6	70.7	79.4
68.8	63.0	62.6	61.0	65.3	64.9	69.7	73.4
63.4	61.1	60.8	59.9	59.2	61.0	61.9	60.0
60.6	53.4	56.9	56.1	55.0	58.1	61.2	55.8
58.2	58.0	56.7	54.7	55.2	54.6	53.7	52.3
55.1	56.3	50.8	50.6	53.1	53.0	51.0	52.8

Πίνακας 18: Τιμές ειδικών όγκων (m³/kg)

0.897	0.902	0.907	0.905	0.901	0.908	0.914	0.909
0.890	0.891	0.894	0.896	0.896	0.900	0.902	0.896
0.885	0.886	0.882	0.885	0.887	0.888	0.886	0.886
0.880	0.879	0.871	0.874	0.877	0.878	0.884	0.881
0.873	0.869	0.864	0.867	0.875	0.870	0.875	0.875
0.862	0.862	0.862	0.862	0.870	0.867	0.870	0.874
0.862	0.856	0.857	0.859	0.862	0.863	0.866	0.871
0.857	0.854	0.851	0.854	0.856	0.855	0.860	0.871
0.856	0.852	0.849	0.849	0.853	0.853	0.855	0.862
0.854	0.849	0.848	0.846	0.850	0.851	0.855	0.858
0.850	0.847	0.847	0.846	0.846	0.848	0.849	0.847
0.849	0.841	0.845	0.844	0.843	0.846	0.849	0.844
0.847	0.846	0.844	0.842	0.843	0.843	0.842	0.841
0.844	0.845	0.840	0.840	0.842	0.842	0.841	0.842

Πλάγια πλευρά

Πίνακας 19: Θερμοκρασίες (°C)

	1	2	3	4	5	6	7	8
a	18.5	19.6	20.2	21.3	20.9	22.8	22.5	22.7
b	17.2	17.0	17.7	17.9	18.9	19.8	20.5	19.4
c	16.5	16.7	16.6	16.8	17.0	18.4	19.5	18.6
d	16.2	16.4	16.1	16.7	16.3	17.1	17.9	17.2

Πίνακας 20: Σχετική υγρασία (%)

	1	2	3	4	5	6	7	8
a	45	43	48	49	47	46	48	49
b	51	52	55	57	55	53	54	56
c	54	57	56	54	58	55	57	54
d	58	59	59	61	62	61	62	60

Πίνακας 21: Ταχύτητες αέρα (m/s)

	1	2	3	4	5	6	7	8
a	1.52	2.42	1.55	3.70	3.40	3.25	2.45	3.85
b	0.95	2.18	2.84	3.12	3.25	2.65	1.75	1.33
c	1.32	3.32	3.85	2.18	2.25	1.25	1.86	1.82
d	1.58	2.75	2.42	2.25	1.35	2.65	1.97	2.06

Πίνακας 22: Λόγοι υγρασίας (gm/kg)

5.94	6.08	7.06	7.72	7.22	7.94	8.14	8.42
6.21	6.25	6.92	7.26	7.46	7.61	8.10	7.85
6.29	6.73	6.56	6.41	6.98	7.23	8.04	7.19
6.63	6.83	6.70	7.20	7.14	7.39	7.91	7.32

Πίνακας 23: Τιμές ειδικής ενθαλπίας (kJ/kg)

33.6	35.0	38.1	40.9	39.2	43.0	43.2	44.1
32.9	32.8	35.2	36.3	37.8	39.1	41.1	39.3
32.4	33.7	33.2	33.0	34.7	36.7	39.9	36.8
33.0	33.7	33.1	34.9	34.4	35.8	37.9	35.7

Πίνακας 24: Τιμές ειδικών όγκων (m³/kg)

0.829	0.833	0.835	0.838	0.837	0.843	0.842	0.843
0.826	0.825	0.828	0.828	0.831	0.834	0.836	0.833
0.824	0.825	0.824	0.825	0.826	0.830	0.833	0.830
0.823	0.824	0.823	0.825	0.824	0.826	0.829	0.826

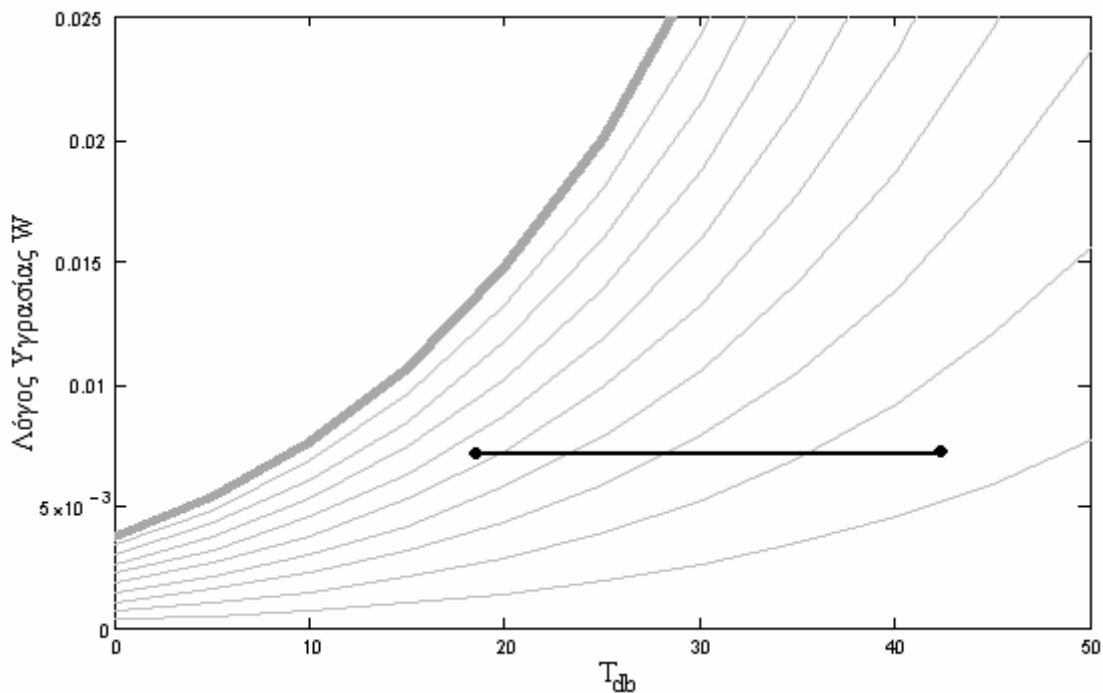
Με βάση τις παραπάνω τιμές που αναφέρονται στην έξοδο του αέρα από τις δύο πλευρές καθώς και της παροχής μάζας στην είσοδο και νερού από την άνω πλευρά οι οποίες έχουν καταγραφεί στο προγραμματιστικό μέρος, έγιναν τα ισοζύγια μάζας αέρα, μάζας νερού και συναλλασσόμενης ενέργειας. Προέκυψαν οι εξής αποκλίσεις:

Για την μάζα του νερού: $\sigma_{\text{νερού}} = 6,784\%$

Για την μάζα του αέρα: $\sigma_{\text{αέρα}} = 0,505\%$

Για την συναλλασσόμενη ενέργεια: $\sigma_{\text{ενέργειας}} = 11,013\%$

Επίσης έγινε απεικόνιση της μεταβολής (αρχικές συνθήκες – συνθήκες μετά την ψυκτική μονάδα) σε ψυχομετρικό χάρτη στο πρόγραμμα θεωρώντας μέσες τιμές της θερμοκρασίας και του λόγου υγρασίας στην έξοδο (στην πλάγια πλευρά του ψύκτη). Επειδή υπήρχαν σφάλματα στις μετρήσεις των αρχικών συνθηκών, έγιναν κατάλληλες διορθώσεις σε αυτές στο πρόγραμμα του Mathcad για να μην υπάρχει μεγάλη κλίση στην ευθεία της μεταβολής. Ο ψυχομετρικός χάρτης με την μεταβολή αυτή φαίνεται και παρακάτω.



Σχήμα 9: Ψυχομετρικός χάρτης με την μεταβολή

➤ Μετρήσεις με θερμική αντίσταση **1800W**

Άνω πλευρά

Πίνακας 25: Θερμοκρασίες (°C)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
1	49.9	50.3	50.8	49.2	51.2	50.3	49.1	47.2
2	42.3	43.6	44.4	46.5	49.8	47.9	47.2	46.8
3	41.7	42.1	42.4	43.6	47.3	46.1	45.4	42.7
4	37.3	40.0	40.5	40.2	43.6	44.2	42.3	38.1
5	34.8	36.8	41.3	39.8	41.9	42.5	41.6	35.7
6	31.7	33.5	37.3	38.6	40.5	41.3	39.2	34.5
7	30.2	32.3	36.5	37.9	39.2	39.8	37.1	31.2
8	27.2	30.1	33.9	37.2	38.6	38.4	35.8	29.6
9	26.5	29.6	34.1	35.7	37.1	37.5	34.4	28.2
10	24.6	27.8	32.9	34.1	35.9	36.2	33.9	27.0
11	24.3	28.1	29.1	32.5	33.8	34.6	31.5	25.9
12	22.7	26.2	28.9	30.2	32.5	33.1	30.2	24.8
13	21.1	24.6	26.7	28.3	31.2	29.5	28.3	22.2
14	20.4	24.0	23.4	25.0	28.1	26.5	25.9	22.8

Πίνακας 26: Σχετική υγρασία (%)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	100	100	100	100	100	100	100	100
3	100	100	100	100	100	100	100	100
4	100	100	100	99	100	100	100	100
5	99	99	99	99	100	99	99	100
6	97	98	99	100	100	100	98	100
7	98	99	100	100	100	99	100	99
8	98	97	100	100	100	100	99	98
9	95	96	99	100	99	97	98	92
10	93	95	97	100	100	98	97	89
11	87	88	96	98	99	96	97	85
12	84	86	92	97	98	92	98	82
13	82	84	90	95	92	95	99	81
14	84	82	88	91	88	93	87	83

Πίνακας 27: Ταχύτητες αέρα (m/s)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
1	1.45	1.25	0.85	0.42	0.32	0.39	0.52	0.05
2	0.88	1.08	0.55	0.30	0.45	1.05	0.17	0.04
3	0.42	1.15	0.36	0.33	0.68	0.95	0.25	0.03
4	0.52	1.25	0.48	0.36	1.12	0.83	0.43	0.08
5	0.48	1.12	0.69	0.44	1.15	1.25	0.41	0.12
6	0.33	0.39	0.22	0.17	0.66	0.52	0.52	0.03
7	0.28	0.45	0.56	0.63	0.55	0.46	0.17	0.04
8	0.43	0.81	0.69	0.38	0.25	0.86	0.75	0.06
9	0.33	1.22	0.42	0.27	0.15	1.25	0.55	0.12
10	0.18	0.35	0.84	1.65	0.95	0.38	1.12	0.25
11	0.21	1.15	0.31	0.35	0.45	1.20	0.69	0.33
12	0.32	0.78	1.41	0.88	0.72	0.81	0.75	0.30
13	0.15	0.88	1.05	0.92	0.85	0.38	0.56	0.27
14	0.14	0.95	0.45	0.42	0.96	0.79	0.61	0.22

Οι παρακάτω τρεις πίνακες είναι αυτοί που προέκυψαν κατόπιν επεξεργασίας στο πρόγραμμα Mathcad 14 μέσω ψυχομετρικών εξισώσεων και αφορούν τον λόγο υγρασίας, την ειδική ενθαλπία και τον ειδικό όγκο για κάθε ισεμβαδικό μέρος της επιφάνειας. Υπάρχουν οι αντίστοιχοι πίνακες και για την πλάγια πλευρά παρακάτω.

Πίνακας 28: Λόγοι υγρασίας (gm/kg)

85.87	87.83	90.35	82.54	92.42	87.83	82.07	73.71
55.79	60.08	62.88	70.84	85.39	76.69	73.71	72.06
53.91	55.15	56.11	60.08	74.13	69.25	66.56	57.08
41.84	48.90	50.32	48.93	60.08	62.17	55.79	43.82
35.78	40.21	52.12	47.82	54.53	55.81	53.02	38.12
29.17	32.80	41.39	45.11	50.32	52.69	45.69	35.53
26.96	30.88	39.94	43.32	46.70	47.82	41.35	28.93
22.50	26.52	34.30	41.59	45.11	44.59	37.93	26.01
20.88	25.46	34.34	38.12	40.91	40.97	34.58	22.39
18.19	22.60	31.32	34.71	38.56	38.41	33.22	20.12
16.67	21.26	24.71	30.92	33.74	34.23	28.83	17.95
14.57	18.50	23.36	26.68	30.92	29.98	26.96	16.18
12.86	16.38	19.99	23.29	26.79	25.03	24.31	13.61
12.62	15.40	15.96	18.23	21.26	20.43	18.39	14.48

Πίνακας 29: Τιμές ειδικής ενθαλπίας (kJ/kg)

272.4	277.9	285.0	263.0	290.9	277.9	261.6	237.8
186.1	198.6	206.7	229.6	271.0	246.3	237.8	233.1
180.6	184.2	187.0	198.6	239.0	225.1	217.3	189.9
144.8	165.8	170.0	166.1	198.6	204.7	186.1	150.7
126.5	140.0	175.5	162.8	182.4	186.4	178.2	133.5
106.3	117.5	143.6	154.6	170.0	177.0	156.7	125.6
99.1	111.3	139.0	149.2	159.3	162.8	143.3	105.2
84.6	97.9	121.8	144.0	154.6	153.0	133.1	96.0
79.7	94.6	122.1	133.5	142.2	142.7	123.0	85.3
70.9	85.5	113.1	123.0	134.8	134.8	119.0	78.3
66.7	82.3	92.2	111.6	120.2	122.4	105.2	71.6
59.7	73.4	88.5	98.4	111.6	109.9	99.1	66.0
53.8	66.3	77.7	87.7	99.7	93.4	90.3	56.8
52.4	63.2	64.0	71.4	82.3	78.6	72.7	59.6

Πίνακας 30: Τιμές ειδικών όγκων (m³/kg)

0.959	0.962	0.964	0.956	0.966	0.962	0.955	0.946
0.923	0.928	0.932	0.942	0.959	0.949	0.946	0.944
0.920	0.922	0.923	0.928	0.946	0.940	0.937	0.924
0.901	0.913	0.915	0.913	0.928	0.931	0.923	0.904
0.891	0.899	0.918	0.911	0.921	0.923	0.919	0.895
0.879	0.886	0.901	0.907	0.915	0.918	0.909	0.890
0.873	0.881	0.898	0.904	0.909	0.911	0.900	0.877
0.862	0.873	0.888	0.901	0.907	0.906	0.895	0.871
0.860	0.871	0.888	0.895	0.900	0.901	0.889	0.865
0.853	0.864	0.883	0.888	0.896	0.896	0.887	0.861
0.851	0.864	0.869	0.882	0.887	0.890	0.878	0.856
0.846	0.858	0.868	0.873	0.882	0.883	0.873	0.852
0.840	0.852	0.860	0.866	0.876	0.870	0.867	0.844
0.838	0.850	0.848	0.854	0.864	0.859	0.857	0.846

Πλάγια πλευρά

Πίνακας 31: Θερμοκρασίες (°C)

	1	2	3	4	5	6	7	8
a	20.7	21.7	23.8	24.9	24.6	25.1	23.7	24.4
b	18.4	18.6	19.2	20.3	20.4	20.7	20.6	20.5
c	17.6	18.1	18.9	19.1	18.9	18.7	18.4	19.3
d	15.8	15.9	17.5	16.6	16.8	16.8	18.1	18.1

Πίνακας 32: Σχετική υγρασία (%)

	1	2	3	4	5	6	7	8
a	45	52	52	51	50	46	52	49
b	53	61	65	61	63	61	60	60
c	60	65	64	69	68	70	70	62
d	67	68	68	71	72	72	69	68

Πίνακας 33: Ταχύτητες αέρα (m/s)

	1	2	3	4	5	6	7	8
a	1.74	3.65	2.45	2.31	4.54	3.72	2.15	3.45
b	0.83	3.45	3.15	2.05	2.12	1.48	2.08	2.85
c	0.82	2.57	1.97	1.41	1.57	1.96	2.22	2.65
d	1.77	2.32	1.85	1.13	1.44	2.55	2.52	2.93

Πίνακας 34: Λόγοι υγρασίας (gm/kg)

6.82	8.40	9.56	10.02	9.65	9.14	9.50	9.34
6.97	8.13	9.01	9.05	9.41	9.28	9.07	9.02
7.51	8.40	8.70	9.51	9.25	9.41	9.23	8.64
7.47	7.64	8.47	8.35	8.58	8.58	8.93	8.80

Πίνακας 35: Τιμές ειδικής ενθαλπίας (kJ/kg)

38.0	43.0	48.1	50.4	49.2	48.4	47.9	48.2
36.1	39.2	42.0	43.3	44.3	44.3	43.6	43.4
36.6	39.4	41.0	43.2	42.4	42.6	41.8	41.2
34.7	35.2	38.9	37.7	38.5	38.5	40.7	40.4

Πίνακας 36: Τιμές ειδικών όγκων (m³/kg)

0.836	0.84	0.846	0.850	0.849	0.850	0.846	0.848
0.830	0.831	0.833	0.836	0.837	0.837	0.837	0.837
0.828	0.829	0.832	0.833	0.832	0.832	0.831	0.833
0.822	0.823	0.828	0.825	0.826	0.826	0.830	0.830

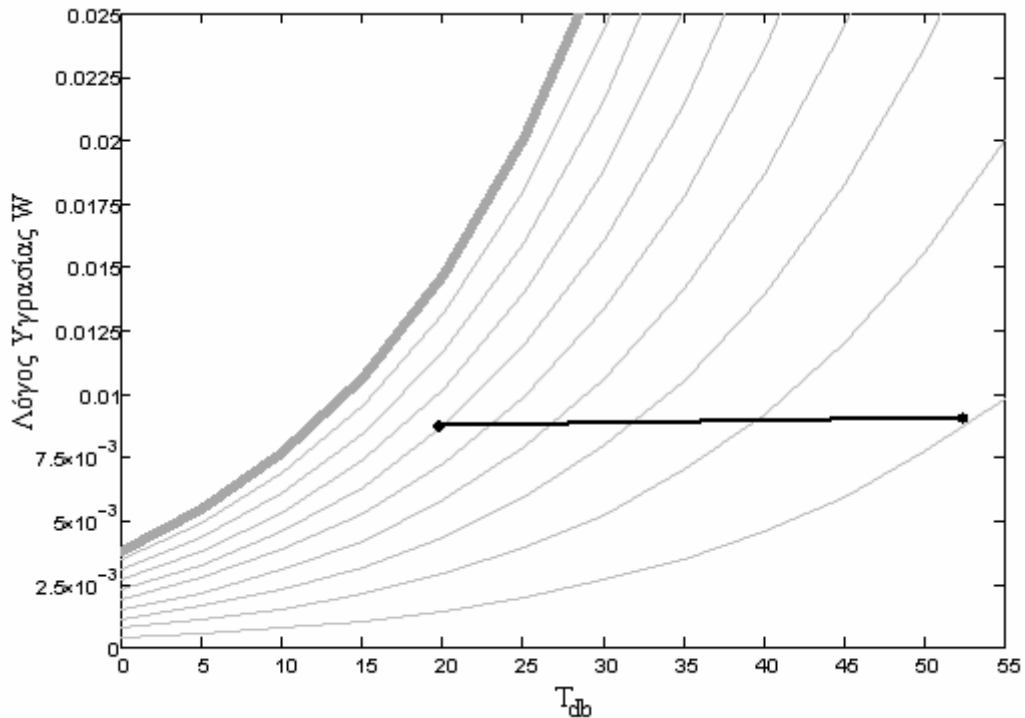
Με βάση τις παραπάνω τιμές που αναφέρονται στην έξοδο του αέρα από τις δύο πλευρές καθώς και της παροχής μάζας στην είσοδο και νερού από την άνω πλευρά οι οποίες έχουν καταγραφεί στο προγραμματιστικό μέρος, έγιναν τα ισοζύγια μάζας αέρα, μάζας νερού και συναλλασσόμενης ενέργειας. Προέκυψαν οι εξής αποκλίσεις:

Για την μάζα του νερού: $\sigma_{\text{νερού}} = 6,527\%$

Για την μάζα του αέρα: $\sigma_{\text{αέρα}} = 0,917\%$

Για την συναλλασσόμενη ενέργεια: $\sigma_{\text{ενέργειας}} = 3,98\%$

Επίσης έγινε απεικόνιση της μεταβολής (αρχικές συνθήκες – συνθήκες μετά την ψυκτική μονάδα) σε ψυχομετρικό χάρτη στο πρόγραμμα θεωρώντας μέσες τιμές της θερμοκρασίας και του λόγου υγρασίας στην έξοδο (στην πλάγια πλευρά του ψύκτη). Επειδή υπήρχαν σφάλματα στις μετρήσεις των αρχικών συνθηκών, έγιναν κατάλληλες διορθώσεις σε αυτές στο πρόγραμμα του Mathcad για να μην υπάρχει μεγάλη κλίση στην ευθεία της μεταβολής. Ο ψυχομετρικός χάρτης με την μεταβολή αυτή φαίνεται και παρακάτω.



Σχήμα 10: Ψυχομετρικός χάρτης με την μεταβολή

5.2.3 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Αυτό που παρατηρούμε και στις τρεις περιπτώσεις αρχικών συνθηκών είναι πως ο παραγόμενος αέρας από την πλάγια πλευρά της μονάδος είναι κατάλληλος για την θερμική άνεση ενός χώρου. Είναι ψυχρός και ικανοποιητικής σχετικής υγρασίας σε σχέση με τις εκάστοτε αρχικές συνθήκες. Συγκεκριμένα:

- ♦ Όταν δεν υπήρχε η θερμική αντίσταση αρχικά, η θερμοκρασία πριν την ψυκτική μονάδα ήταν στους $22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η σχετική υγρασία στο 54% ενώ μετά μειώθηκε η θερμοκρασία στους $14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ η σχετική υγρασία αυξήθηκε στο 80% . Παρατηρούμε λοιπόν πτώση της θερμοκρασίας κατά $7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ και σχετικά υγρό παραγόμενο αέρα. Ο βαθμός απόδοσης είναι πολύ ικανοποιητικός: ^[4]

$$e = \frac{T_{db}^{in} - T_{db}^{out}}{T_{db}^{in} - T_{wb}^{in}} \cdot 100\% = 124.6\%$$

- ♦ Με την προσθήκη θερμικής αντίστασης 900 W η αρχική θερμοκρασία ήταν $42,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η σχετική υγρασία στο 20% και μετά τη ψυκτική μονάδα ο παραγόμενος αέρας είχε θερμοκρασία $18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ και σχετική υγρασία 55% . Έτσι η πτώση της θερμοκρασίας ήταν $23,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ που είναι αρκετά ικανοποιητική. Ο βαθμός απόδοσης και σ' αυτή τη περίπτωση προκύπτει σύμφωνα με την θεωρία του κύκλου του Maisotsenko:

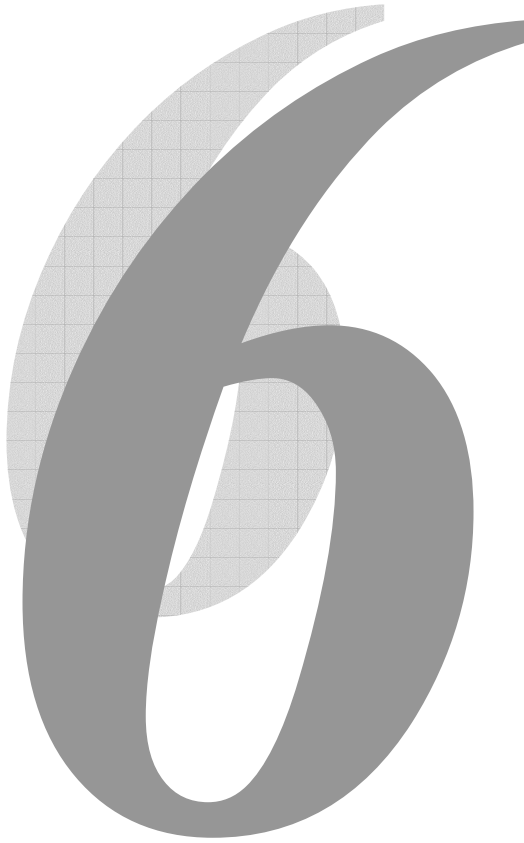
$$e = \frac{T_{db}^{in} - T_{db}^{out}}{T_{db}^{in} - T_{wb}^{in}} \cdot 100\% = 126.6\%$$

♦ Τέλος με θερμική αντίσταση $1800W$ η αρχική θερμοκρασία ήταν $52,4\text{ }^{\circ}C$ και η σχετική υγρασία στο 15% και μετά τη ψυκτική μονάδα ο παραγόμενος αέρας είχε θερμοκρασία $20\text{ }^{\circ}C$ και σχετική υγρασία 60% . Έχουμε μία μεγάλη πτώση της θερμοκρασίας κατά $32,4\text{ }^{\circ}C$ και όσον αφορά την υγρασία το άτομο νιώθει ευεξία στον χώρο. Ο βαθμός απόδοσης είναι:

$$e = \frac{T_{db}^{in} - T_{db}^{out}}{T_{db}^{in} - T_{wb}^{in}} \cdot 100\% = 130.6\%$$

Όσον αφορά τις αποκλίσεις στα ισοζύγια παροχής μάζας, παροχής νερού και συναλλασσόμενης ενέργειας που παρατηρήσαμε, οφείλονται κυρίως στα σφάλματα που προαναφέρθηκαν. Πάντως δεν είναι υπερβολικές και κυμαίνονται από $0,5 - 6,5\%$.

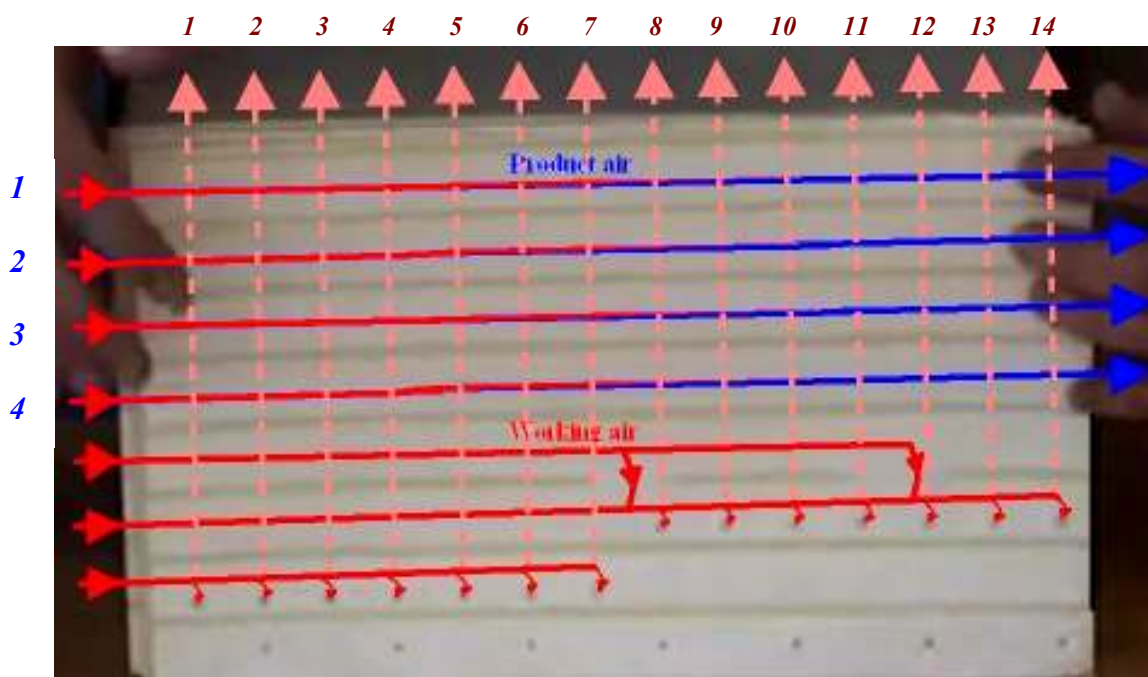
Παρατηρώντας τις μεταβολές στον ψυχομετρικό χάρτη για τις τρεις περιπτώσεις βλέπουμε πως υπάρχει μία κλίση. Κανονικά όπως έχει προαναφερθεί δεν προστίθεται αλλά ούτε και αφαιρείται υγρασία στο παραγόμενο ρεύμα αέρος αφού τα κανάλια είναι μονωμένα και δεν έρχονται καθόλου με το εισερχόμενο νερό. Σύμφωνα με αυτό δεν θα έπρεπε να υπάρχει κλίση στην μεταβολή. Όμως αυτό συμβαίνει λόγω των σφαλμάτων που υπήρξαν στις μετρήσεις κυρίως στην προσαγωγή του αέρα. Ένα ακόμα γεγονός που επηρεάζει την ορθότητα των μετρήσεων είναι το εξής. Παρατηρήθηκε μια μικρή ατέλεια στην στεγάνωση του πάνω μέρους της μονάδας που εξέρχεται ο εργαζόμενος αέρας με αποτέλεσμα ένα μικρό ποσοστό αέρα απ' την προσαγωγή να εξέρχεται απ' ευθείας εκεί χωρίς να υλοποιεί τον ζητούμενο κύκλο.



Υπολογιστική επίλυση του κύκλου του
Maisotsenko
Maisotsenko

6.1 Περιγραφή της διαδικασίας επίλυσης

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο τρόπος της υπολογιστικής επίλυσης του κύκλου και ειδικότερα της ψυκτικής μονάδας demo στην οποία εκτελέστηκε το πείραμα και ελήφθησαν οι μετρήσεις. Η επίλυση αυτή έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και με χρήση του προγράμματος Mathcad. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η γεωμετρία της μονάδας με σχεδιασμένη την ροή του αέρα στα κανάλια.



Σχήμα 1: Γεωμετρία της μονάδας με σχεδιασμένη την ροή του αέρα στα κανάλια. Με κόκκινο χρώμα παριστάνεται ο εισερχόμενος αέρας περιβάλλοντος που στα τέσσερα πάνω οριζόντια κανάλια ψύχεται, ενώ στα υπόλοιπα τρία μέσω των οπών μεταβιβάζεται στα κάθετα «υγρά» κανάλια. Η κάθετη αυτή ροή παριστάνεται με ροζ χρώμα. Αυτό το ρεύμα αέρος εξέρχεται κορεσμένο και έχοντας πάρει την θερμότητα απ' τον παραγόμενο ρεύμα.

Στα σημεία που διασταυρώνονται οι οριζόντιες και κάθετες ροές του αέρα συντελείται η μεταφορά θερμότητας με μέσο το διαχωριστικό χαρτί. Έτσι με την βοήθεια των κατάλληλων εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας και του προγράμματος θα κατασκευαστούν πίνακες με τις τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας σε καθένα απ' αυτά σημεία και για τις δύο πλευρές, άρα και με τις τελικές παραγόμενες τιμές θερμοκρασίας – υγρασίας του αέρα.

Η αρχική θερμοκρασία και υγρασία του αέρα μπορούν να μετρηθούν εύκολα και μέσω του ψυχομετρικού χάρτη να βρεθεί η αρχική ενθαλπία και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του αέρα. Η θερμότητα μεταφέρεται από την οριζόντια ροή αέρος που ψύχεται στην κάθετη εργαζόμενη ροή μέσω αγωγής και συναγωγής. Το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας σε κάθε σημείο δίνεται από τον τύπο:^[5]

Σχέση 1

$$DQ = k \cdot A_1 \cdot \frac{T_{prod} - T_{work}}{L_1} + h_m \cdot A_1 \cdot (T_{prod} - T_{work})$$

όπου k : ο συντελεστής αγωγής του χαρτιού ($=0.05W/m \cdot K$)

A_1 : η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας ($=4.84cm^2$), L_1 : το πάχος χαρτιού ($=1mm$)

T_{prod} : η θερμοκρασία του οριζόντιου παραγόμενου (product) αέρα σε κάθε σημείο

T_{work} : η θερμοκρασία του κάθετου εργαζόμενου (working) αέρα σε κάθε σημείο

h_m : η μέση ειδική συναγωγιμότητα η οποία δίδεται από την παρακάτω σχέση^[5]

Σχέση 2

$$h_m = \frac{C \cdot \frac{k_a}{D_e} \cdot \left(\frac{U_{prod} \cdot D_e}{v_a} \right)^n + C \cdot \frac{k_a}{D_e} \cdot \left(\frac{U_{work} \cdot D_e}{v_a} \right)^n}{2}$$

όπου $C = 0.205$, $n = 0.731$ συντελεστές, $k_a = 0.0262W/m \cdot K$, $v_a = 15.8 \cdot 10^{-6}m^2/s$ οι φυσικές ιδιότητες του αέρα,

D_e : το ύψος της κάθε οπής ($=22mm$), U_{prod} & U_{work} είναι οι μέσοι όροι των ταχυτήτων των δύο ροών αέρος σε κάθε κανάλι και έχουν μετρηθεί κατά το πείραμα.

Γνωρίζοντας πλέον το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας (DQ) βρίσκουμε τα θερμικά χαρακτηριστικά των επόμενων οριζόντιων και κάθετων σημείων, αφαιρώντας το ποσό αυτό από την ενθαλπία του product ρεύματος αέρος και προσθέτοντάς το στην ενθαλπία του εργαζόμενου (working) ρεύμα αέρος. Η αρχική ενθαλπία του product ρεύματος είναι η εξωτερική, ενώ η ενθαλπία του εργαζόμενου κάθετου ρεύματος υπολογίζεται για κάθε από τα 14 κανάλια με παρόμοιο τρόπο. Τα θερμικά ισοζύγια είναι τα εξής:^[5]

Σχέση 3

$$H_{prod}^{i+1} = H_{prod}^i - \frac{DQ}{\dot{m}_{prod}},$$

Σχέση 4

$$H_{work}^{i+1} = H_{work}^i + \frac{DQ}{\dot{m}_{work}}$$

όπου \dot{m}_{prod} & \dot{m}_{work} : οι παροχές μάζας για κάθε ρεύμα αέρος που δίνονται απ' τις σχέσεις:

Σχέση 5

$$\dot{m}_{prod} = \rho_{prod} \cdot E_1 \cdot U_{prod},$$

Σχέση 6

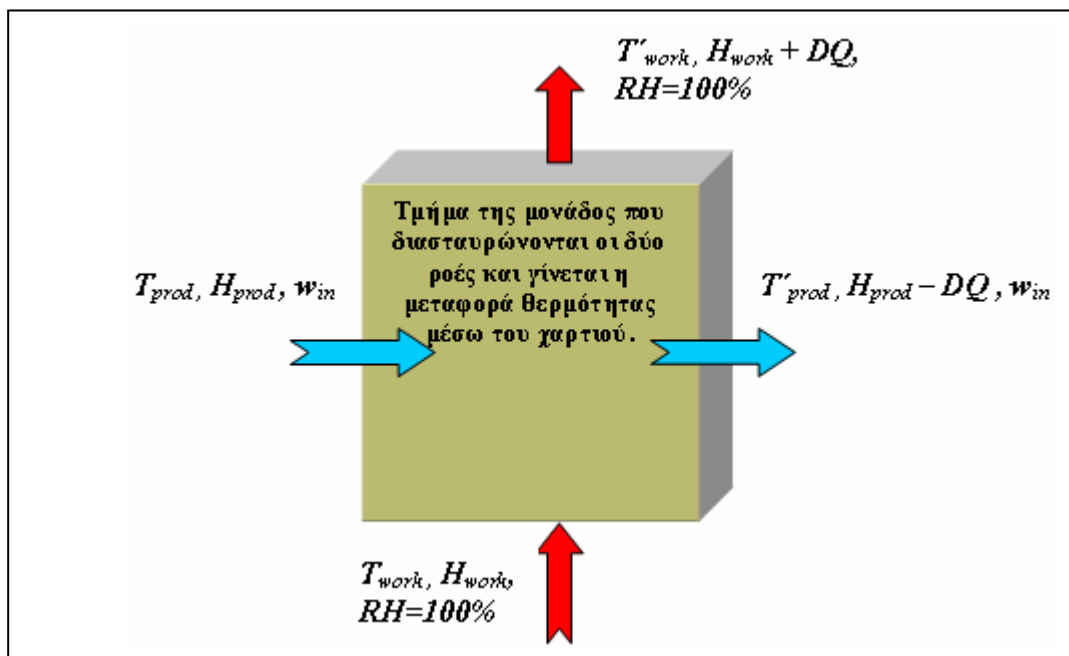
$$\dot{m}_{work} = \rho_{work} \cdot E_1 \cdot U_{work}$$

όπου ρ_{prod} & ρ_{work} : οι πυκνότητες του κάθε ρεύματος αέρα (βρίσκονται από το ψυχομετρικό χάρτη), E_1 : η διατομή της κάθε οπής που ρέει ο αέρας ($=0.44cm^2$)

Στην συνέχεια μέσω του ψυχομετρικού χάρτη βρίσκουμε την θερμοκρασία και την υγρασία της νέας θέσης. Όσον αφορά το ρεύμα του παραγόμενου αέρα έχουμε γνωστά

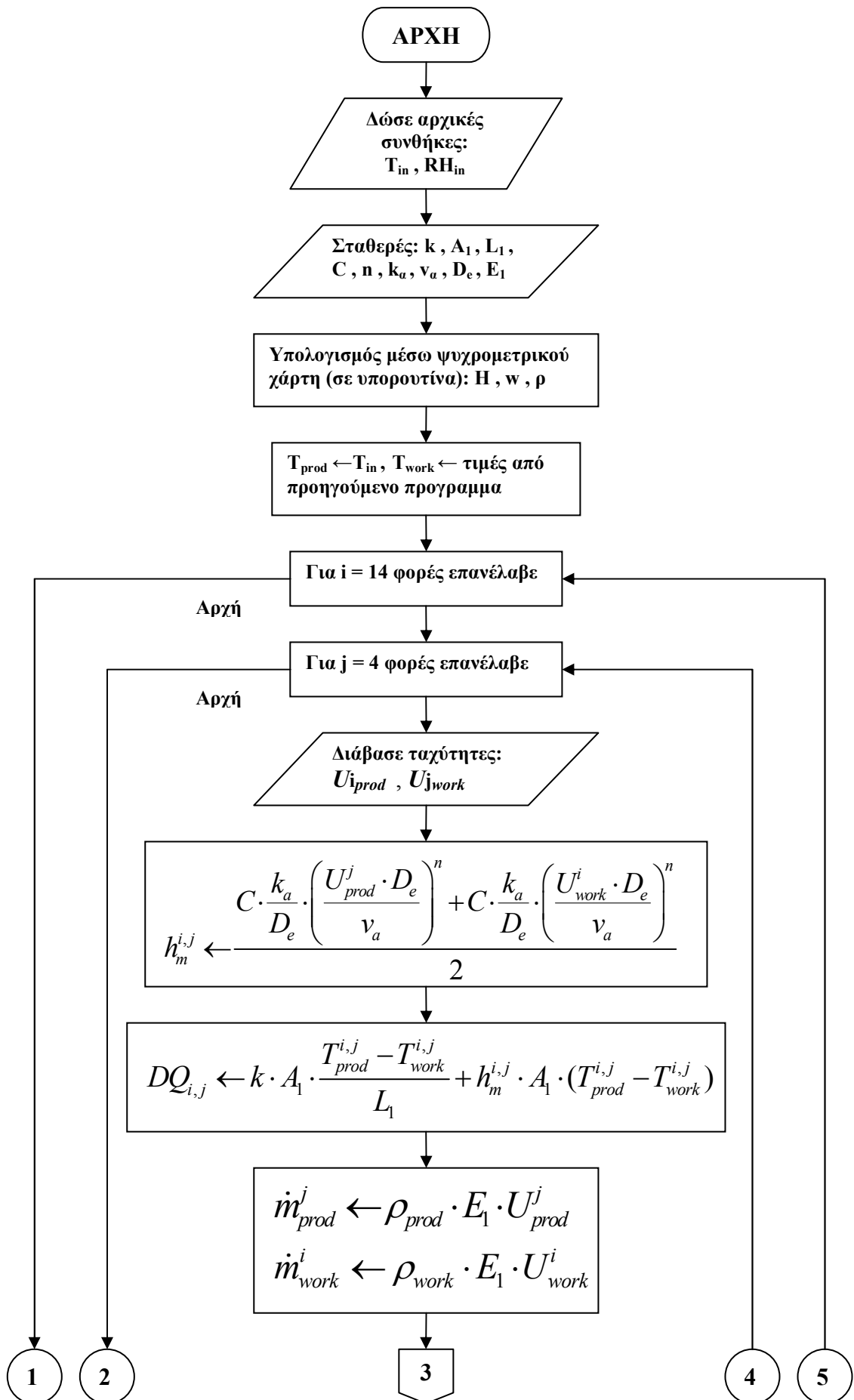
την νέα ενθαλπία και την ειδική υγρασία, η οποία είναι όση η αρχική, αφού δεν προστίθεται καθόλου νερό. Στην περίπτωση του εργαζόμενου ρεύματος γνωστά έχουμε την νέα ενθαλπία και την σχετική υγρασία, που την θεωρούμε 100% αφού τα κανάλια που ρέει ο αέρας είναι υγρά. Η παραδοχή που έχουμε κάνει είναι ότι μόλις ο αέρας των τριών τελευταίων οριζόντιων καναλιών περάσει μέσω των οπών (14 συγκεκριμένα) στα κατακόρυφα υγρά κανάλια, τότε έχει τη θερμοκρασία υγρού βολβού και γίνεται κορεσμένος.

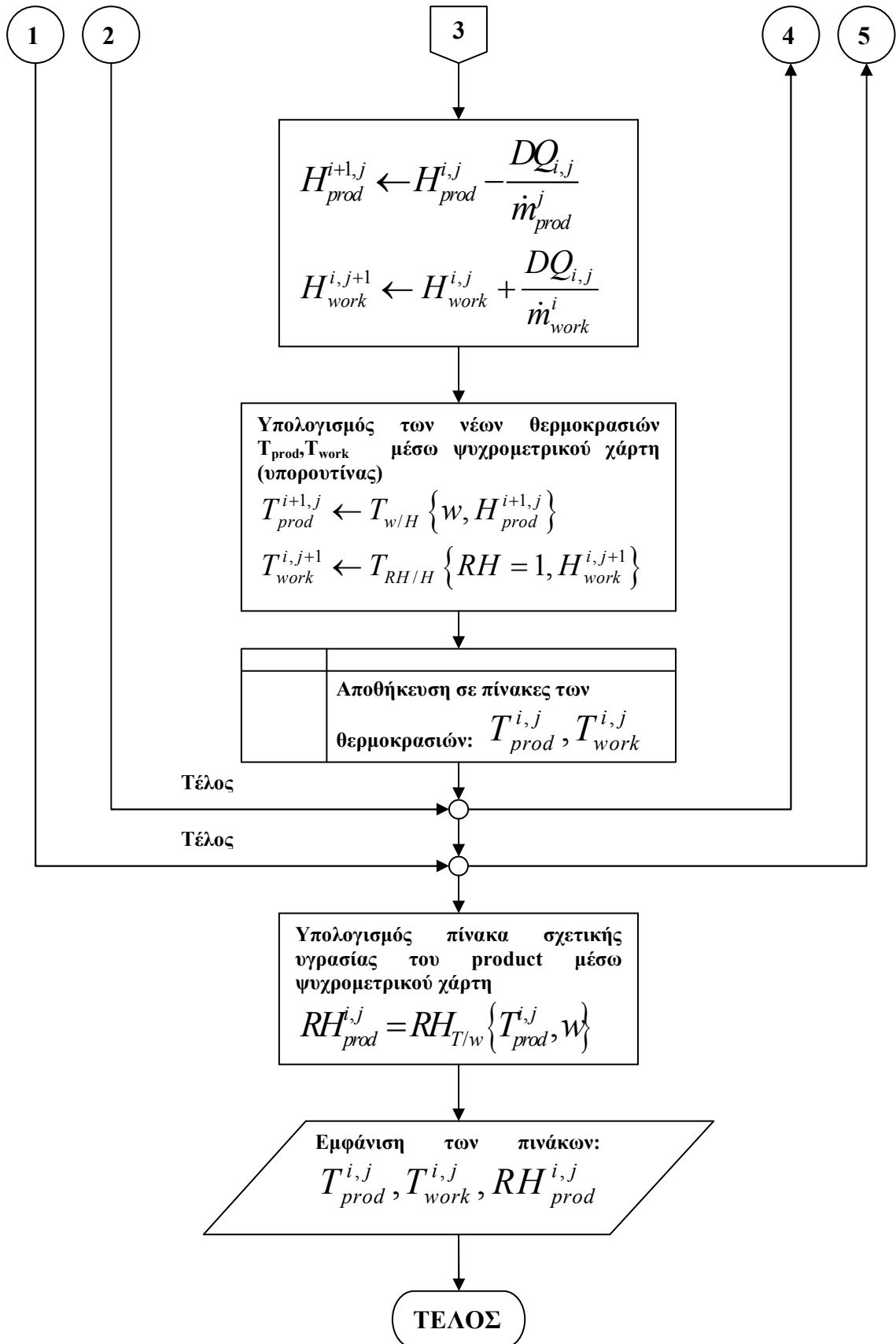
Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις θέσεις του πλέγματος που διασταυρώνονται οι δύο ροές. Αρχικά υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο οι ενθαλπίες των κατακόρυφων καναλιών προτού διασταυρωθούν με τα 4 οριζόντια κανάλια product. Έτσι βρίσκουμε τα θερμοκί χαρακτηριστικά του αέρα σε όλο το πλέγμα και για τις δύο επιφάνειες (οριζόντια product – κατακόρυφη working).



Σχήμα 2: Φαίνεται το θερμικό ισοζύγιο των δύο ρευμάτων αέρα.

Στην επόμενη σελίδα είναι σχεδιασμένο το λογικό διάγραμμα της υπολογιστικής επίλυσης του κύκλου. Έτσι γίνεται πιο εμφανής η διαδικασία, ενώ αποτελεί και το πρώτο στάδιο επίλυσης πριν κατασκευαστεί το τελικό πρόγραμμα στο Mathcad.





6.2 Αποτελέσματα της επίλυσης

Το παραπάνω διάγραμμα ροής κατόπιν κάποιων μετατροπών προσαρμόστηκε στο πρόγραμμα Mathcad. Το βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι για την συγκεκριμένη demo ψυκτική μονάδα μπορούμε να εισάγουμε διάφορες αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας και να παίρνουμε αρκετά χρήσιμα αποτελέσματα. Καταρχάς βρίσκουμε σε κάθε θέση των οριζόντιων product και των κάθετων working καναλιών τα θερμικά χαρακτηριστικά. Στην συνέχεια εύκολα υπολογίζονται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου, ο βαθμός απόδοσης σημείου δρόσου και η κατανάλωση νερού.

Θεωρώντας αρχικές συνθήκες αυτές του ενός πειράματος έχουμε:

$$T_{in} = 42.3 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ και } RH_{in} = 20\%$$

και προκύπτουν τα αποτελέσματα στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 1: Θερμοκρασία σε όλο το πλέγμα του product ρεύματος. (Η στήλη 0 αναφέρεται στην αρχική συνθήκη)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	42.3	39.4	36.9	34.5	32.4	30.9	29.9	28.6	27.1	25.6	23.8	22.6	21.6	20.7	20.1
2	42.3	38.2	35.2	32.5	30.4	29.1	28.3	26.9	25.1	23.4	21.8	20.8	20.0	19.5	19.2
3	42.3	37.0	33.6	30.9	28.9	27.8	27.2	25.3	23.2	21.5	20.3	19.6	19.2	18.9	18.8
4	42.3	35.2	31.5	29.0	27.4	26.7	26.4	22.6	20.6	19.6	19.1	18.8	18.7	18.6	18.6

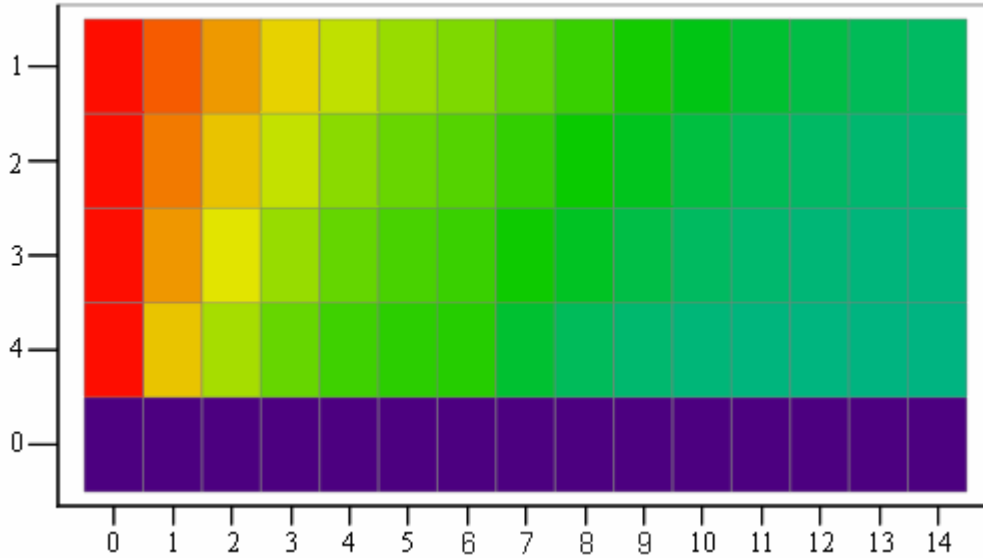
Πίνακας 2: Σχετική υγρασία σε όλο το πλέγμα του product ρεύματος. (Η στήλη 0 αναφέρεται στην αρχική συνθήκη)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	20.0	23.3	26.7	30.5	34.3	37.3	39.4	42.5	46.5	50.9	56.5	60.9	64.8	68.2	70.7
2	20.0	24.9	29.4	34.1	38.4	41.4	43.4	47.1	52.3	57.8	63.8	68.0	71.1	73.5	75.0
3	20.0	26.5	32.0	37.3	41.7	44.6	46.2	51.7	58.7	64.9	70.0	73.1	75.0	76.3	77.0
4	20.0	29.4	36.1	41.6	45.6	47.7	48.5	60.8	68.6	73.0	75.5	76.7	77.4	77.7	77.8

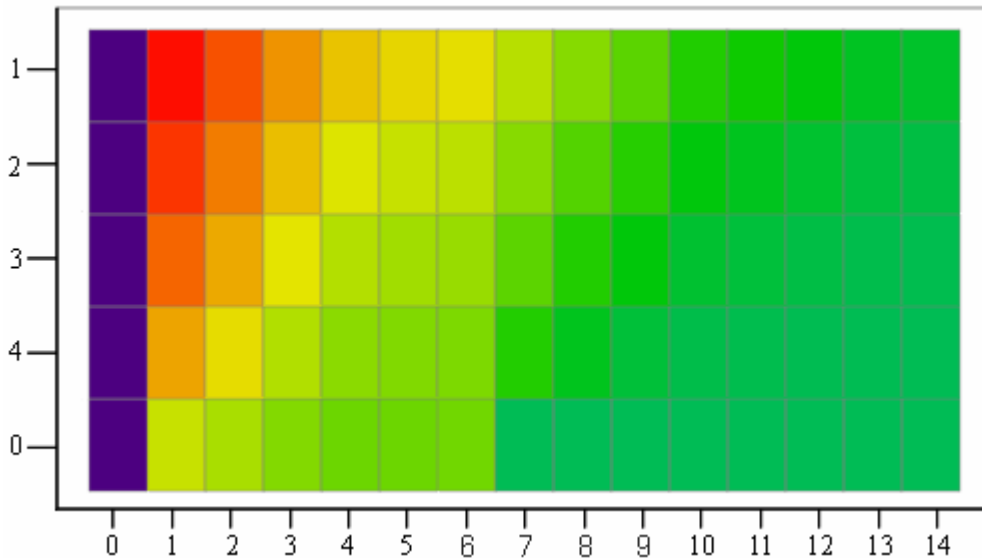
Πίνακας 3: Θερμοκρασία σε όλο το πλέγμα του working ρεύματος. (Η στήλη 0 αναφέρεται στις θερμοκρασίες πριν την διασταύρωση με το product ρεύμα & προκύπτουν απ' την επίλυση των τριών τελευταίων οριζόντιων καναλιών)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	37.2	35.0	32.7	30.9	30.3	29.9	28.2	26.6	25.1	23.1	22.4	21.5	20.6	20.3
2	35.9	33.5	31.2	29.4	28.8	28.4	26.7	24.9	23.3	21.4	20.8	20.1	19.5	19.3
3	34.3	31.9	29.7	28.1	27.6	27.3	25.2	23.1	21.5	20.1	19.6	19.2	18.9	18.8
4	32.1	30.0	28.1	26.9	26.5	26.4	23.1	20.8	19.7	19.0	18.8	18.7	18.6	18.6
0	28.8	27.9	26.6	25.8	25.8	26.0	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6

Παρακάτω διακρίνονται τα γραφήματα των θερμοκρασιών των δύο ρευμάτων σε σχέση με την θέση στην ψυκτική μονάδα. Ο χρωματισμός μας δείχνει την μεταβολή – πτώση της θερμοκρασίας από σημείο σε σημείο.



Εικόνα 1: Θερμοκρασία σε όλο το πλέγμα του product ρεύματος.



Εικόνα 2: Θερμοκρασία σε όλο το πλέγμα του working ρεύματος.

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες και δίνεται από την σχέση:^[4]

$$\text{Σχέση 7: } \varepsilon = \frac{T_{in}^{d.b.} - T_{out}^{d.b.}}{T_{in}^{d.b.} - T_{in}^{w.b.}}$$

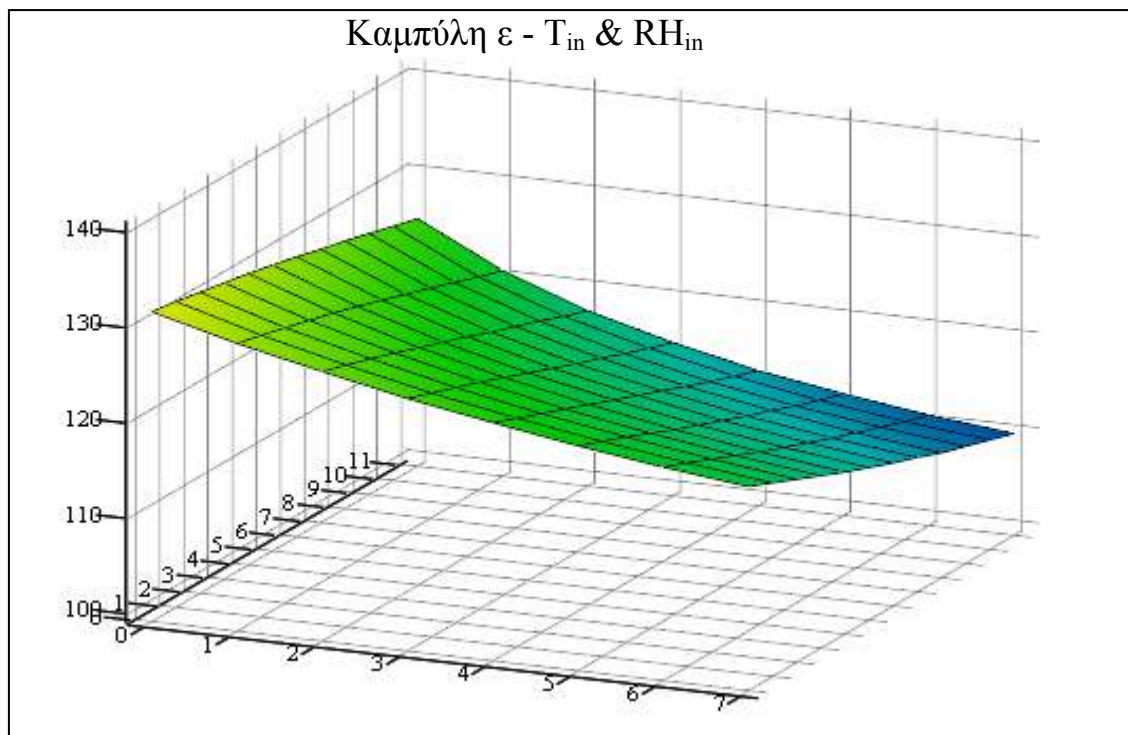
όπου $T_{in}^{w.b.}$ είναι η θερμοκρασία υγρής σφαίρας του περιβάλλοντος και βρίσκεται από τον ψυχομετρικό χάρτη.

Για τις αρχικές συνθήκες που πήραμε ($T_{in} = 42.3^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 20\%$) ο βαθμός απόδοσης προκύπτει: $\varepsilon = 122.8\%$

Για να γίνει εμφανής η εξάρτηση του βαθμού απόδοσης από τις αρχικές συνθήκες ελήφθη ένα εύρος θερμοκρασιών και σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος και κατασκευάστηκε πίνακας και διάγραμμα. Το εύρος θερμοκρασιών είναι: **26 – 48°C με βήμα 2°C**, ενώ σχετικής υγρασίας **10 – 80% με βήμα 10%**. Έτσι προκύπτει ο πίνακας και το αντίστοιχο διάγραμμα:

RH _{in} ↓	T _{in} →												
	Ε	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
10		131.4	131.0	130.5	130.0	129.5	128.9	128.3	127.6	127.0	126.3	125.6	124.9
20		129.1	128.5	127.8	127.1	126.4	125.6	124.8	123.9	123.1	122.2	121.3	120.5
30		127.2	126.4	125.6	124.7	123.8	122.9	122.0	121.0	120.1	119.2	118.2	117.3
40		125.4	124.5	123.6	122.7	121.7	120.7	119.7	118.7	117.8	116.8	115.9	115.0
50		123.9	122.9	121.9	120.9	119.9	118.9	117.9	116.9	115.9	114.9	114.0	113.1
60		122.5	121.5	120.5	119.4	118.3	117.3	116.3	115.3	114.4	113.4	112.5	111.7
70		121.3	120.3	119.2	118.1	117.0	116.0	115.0	114.0	113.1	112.2	111.3	110.5
80		120.3	119.2	118.1	117.0	115.9	114.9	113.9	113.0	112.0	111.2	110.4	109.6

Πίνακας 4



Διάγραμμα 1

Ο βαθμός απόδοσης σημείου δρόσου του κύκλου εξαρτάται και αυτός από τις αρχικές συνθήκες και δίνεται από την σχέση: ^[4]

$$\text{Σχέση 8: } \varepsilon_{D.P.} = \frac{T_{in}^{d.b.} - T_{out}^{d.b.}}{T_{in}^{d.b.} - T_{in}^{D.P.}}$$

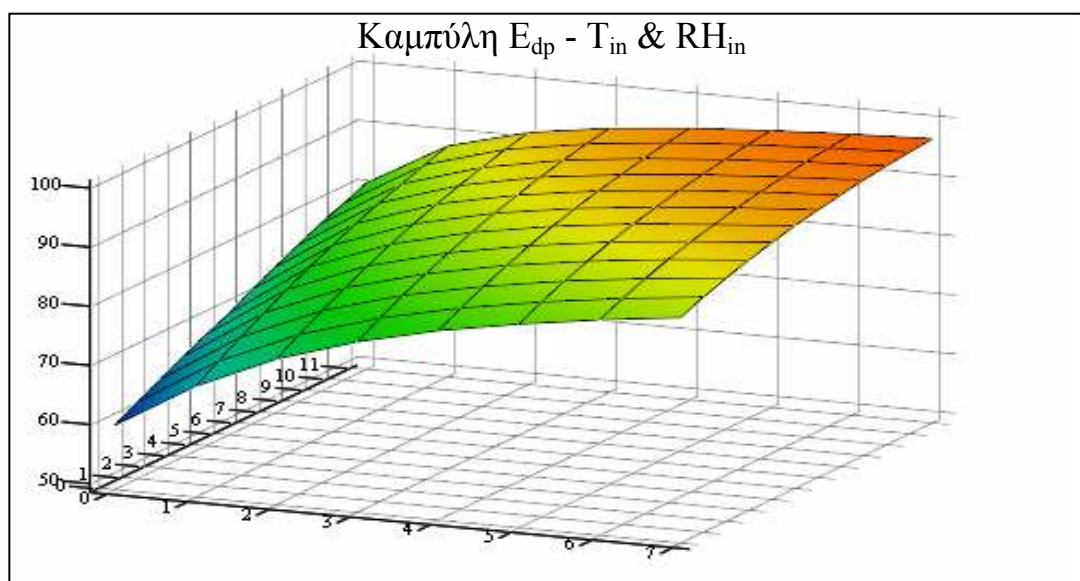
όπου $T_{in}^{D.P.}$ είναι το σημείο δρόσου του αέρα του περιβάλλοντος και βρίσκεται από τον ψυχομετρικό χάρτη.

Για τις αρχικές συνθήκες που πήραμε ($T_{in} = 42.3^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 20\%$) ο βαθμός απόδοσης προκύπτει: $\varepsilon_{D.P.} = 83.7\%$

Όπως και παραπάνω, για να γίνει εμφανής η εξάρτηση του βαθμού απόδοσης από τις αρχικές συνθήκες ελήφθη το ίδιο εύρος θερμοκρασιών και σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος και κατασκευάστηκαν πίνακας και διάγραμμα που βρίσκονται παρακάτω:

		$T_{in} \longrightarrow$												
$\text{RH}_{in} \downarrow$		ε_{dp}	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
10	10	59.5	61.6	63.6	65.6	67.5	69.2	71.4	73.3	75.2	77.0	78.6	80.2	80.2
20	20	67.4	69.8	72.1	74.3	76.4	78.4	80.2	82.0	83.6	85.0	86.4	87.7	87.7
30	30	73.3	75.6	77.8	79.8	81.7	83.5	85.1	86.6	87.9	89.1	90.3	91.3	91.3
40	40	77.5	79.7	81.7	83.5	85.2	86.8	88.2	89.4	90.6	91.6	92.5	93.3	93.3
50	50	80.7	82.7	84.5	86.2	87.7	89.1	90.3	91.4	92.3	93.2	94.0	94.6	94.6
60	60	83.1	85.0	86.7	88.2	89.6	90.8	91.8	92.8	93.6	94.3	95.0	95.5	95.5
70	70	85.1	86.9	88.4	89.8	91.0	92.0	93.0	93.8	94.5	95.2	95.7	96.2	96.2
80	80	86.8	88.4	89.8	91.0	92.1	93.1	93.9	94.6	95.3	95.8	96.3	96.7	96.7

Πίνακας 5



Διάγραμμα 2

Όσον αφορά την κατανάλωση νερού εξαρτάται και αυτή από τις αρχικές συνθήκες και βρίσκεται με βάση τις τιμές του εργαζόμενου working ρεύματος αέρα σύμφωνα με τη σχέση:

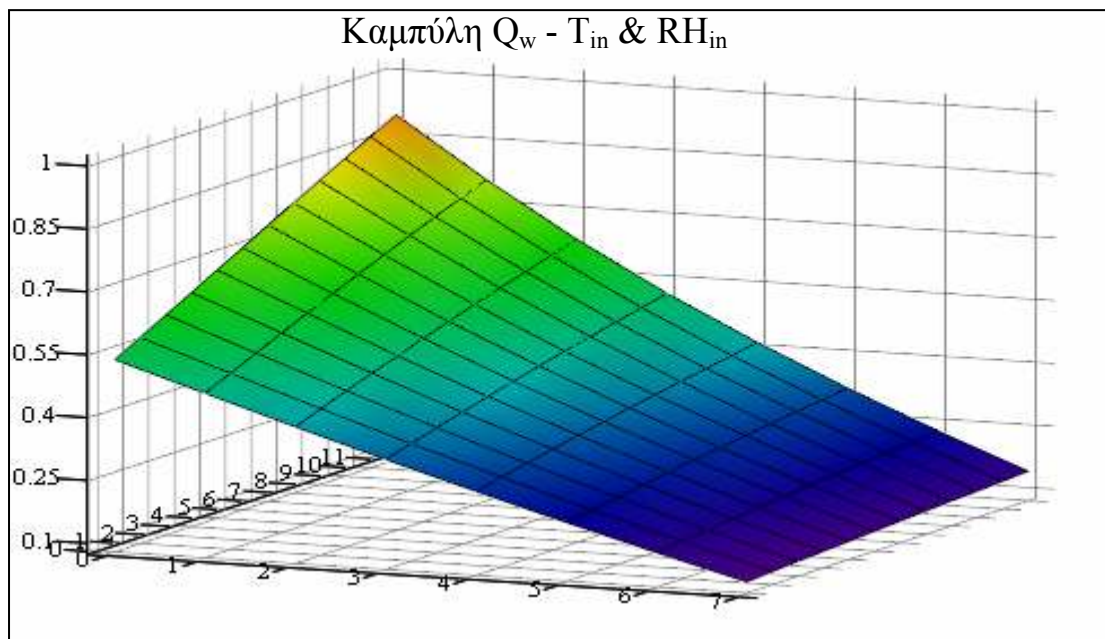
$$\text{Σχέση 9 } Q_{water} = (W_{out}^{work} - W_{in}) \cdot \rho_{work} \cdot E_1$$

Για τις αρχικές συνθήκες που πήραμε ($T_{in} = 42.3^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 20\%$) η κατανάλωση νερού προκύπτει: $Q_{water} = 0.705\text{kg/hr}$

Για να γίνει εμφανής η εξάρτηση του βαθμού απόδοσης από τις αρχικές συνθήκες ελήφθη το ίδιο με παραπάνω εύρος θερμοκρασιών και σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος και κατασκευάστηκαν πίνακας και διάγραμμα:

$T_{in} \rightarrow$	Q_w	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
\downarrow RH _{in}	10	0.534	0.567	0.601	0.634	0.668	0.701	0.735	0.768	0.801	0.834	0.866	0.898
20	0.468	0.496	0.524	0.552	0.579	0.606	0.632	0.658	0.684	0.709	0.733	0.757	
30	0.402	0.425	0.448	0.470	0.491	0.513	0.533	0.554	0.573	0.592	0.611	0.629	
40	0.338	0.356	0.374	0.391	0.408	0.425	0.441	0.456	0.471	0.486	0.500	0.514	
50	0.276	0.290	0.303	0.317	0.330	0.342	0.355	0.366	0.378	0.389	0.400	0.411	
60	0.216	0.226	0.236	0.246	0.256	0.265	0.274	0.283	0.291	0.300	0.308	0.316	
70	0.158	0.165	0.172	0.179	0.186	0.192	0.199	0.205	0.211	0.216	0.222	0.228	
80	0.102	0.107	0.111	0.115	0.119	0.123	0.127	0.131	0.135	0.138	0.142	0.146	

Πίνακας 6



Διάγραμμα 3

6.3 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων

Στο πείραμα που υλοποιήθηκε στην demo ψυκτική μονάδα του εργαστηρίου ελήφθησαν μετρήσεις για τρεις αρχικές συνθήκες όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 5. Οπότε στο παραπάνω υπολογιστικό πρόγραμμα επίλυσης θέτουμε τις ίδιες αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας οι οποίες είναι:

1^η Περίπτωση χωρίς θερμική αντίσταση να θερμαίνει τον αέρα πριν την είσοδο στην μονάδα. $T_{in} = 22.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και $RH_{in} = 57\%$

Πειραματικά μετρήσαμε στην έξοδο μέσω όσο θερμοκρασίας: $T_{exp.} = 14.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ τιμή που προκύπτει και με την υπολογιστική επίλυση ($T_{calc} = 14.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Όσον αφορά την σχετική υγρασία υπάρχει διαφορά **6%**, αφού στο πείραμα μετρήθηκε $RH_{exp} = 80\%$ ενώ από το πρόγραμμα προκύπτει $RH_{calc} = 86\%$. Αυτή η απόκλιση οφείλεται στα σφάλματα μέτρησης του πειράματος που έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 5. Ο βαθμός απόδοσης που προκύπτει πειραματικά και υπολογιστικά είναι ο ίδιος **125%**.

2^η Περίπτωση με θερμική αντίσταση **900W** για να θερμαίνει τον αέρα πριν την είσοδο στην μονάδα. $T_{in} = 42.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και $RH_{in} = 20\%$

Πειραματικά μετρήσαμε στην έξοδο μέσω όσο θερμοκρασίας: $T_{exp.} = 18.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ η τιμή που προκύπτει με την υπολογιστική επίλυση είναι $T_{calc} = 19.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Η απόκλιση είναι σχετικά μικρή, περίπου **3%**. Όσον αφορά την σχετική υγρασία στο πείραμα μετρήθηκε $RH_{exp} = 55\%$ ενώ από το πρόγραμμα προκύπτει $RH_{calc} = 75\%$. Η διαφορά είναι αρκετά μεγάλη και το σφάλμα θεωρούμε πως υπάρχει στις μετρήσεις του πειράματος καθώς το πρόγραμμα υπολογίζει την σχετική υγρασία μέσω του ψυχομετρικού χάρτη θεωρώντας ότι δεν προστίθεται καθόλου νερό στο product ρεύμα αέρος. Ο βαθμός απόδοσης που προκύπτει πειραματικά είναι **126.6%** και υπολογιστικά **122.7%**, άρα υπάρχει σχετικά μικρή απόκλιση.

3^η Περίπτωση με θερμική αντίσταση **1800W** για να θερμαίνει τον αέρα πριν την είσοδο στην μονάδα. $T_{in} = 52.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και $RH_{in} = 18\%$

Πειραματικά μετρήσαμε στην έξοδο μέσω όσο θερμοκρασίας: $T_{exp.} = 19.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ η τιμή που προκύπτει με την υπολογιστική επίλυση είναι $T_{calc} = 22.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Η απόκλιση είναι περίπου **11%**. Όσον αφορά την σχετική υγρασία στο πείραμα μετρήθηκε $RH_{exp} = 60\%$ ενώ από το πρόγραμμα προκύπτει $RH_{calc} = 77\%$. Οι αποκλίσεις είναι αρκετά μεγάλες (κυρίως της σχετικής υγρασίας) και το σφάλμα θεωρούμε πως υπάρχει στις μετρήσεις του πειράματος παρόμοια με την 2^η περίπτωση. Όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης από το πείραμα υπολογίστηκε **130.6%**, ενώ από την υπολογιστική επίλυση **120.5%**. Προκύπτει μια διαφορά **10%**.



Συμπεράσματα - Σχόλια

Ο κύριος σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η παρουσίαση και η πειραματική αξιολόγηση της εξατμιστικής ψυκτικής μονάδας με αρχή λειτουργίας τον κύκλο του Maisotsenko. Αρχικά έγινε μια αναφορά στα είδη εξατμιστικής ψύξης – άμεση, έμμεση και συνδυασμός αυτών – και στον τρόπο λειτουργίας τους. Στη συνέχεια περιγράφηκε γενικά ο κύκλος του Maisotsenko. Ένα σκέλος της εργασίας ήταν η εφαρμογή της εξατμιστικής ψυκτικής μονάδας και η σύγκριση της με τα συμβατικά κλιματιστικά. Σίγουρα τα περιβαλλοντικά οφέλη είναι πολλά διότι η κατανάλωση ρεύματος είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτή των συμβατικών. Το μειονέκτημα είναι ότι για να λειτουργήσει αποδοτικά η μονάδα πρέπει να μην έχει ο αρχικός αέρας μεγάλη σχετική υγρασία, οπότε περιορίζονται και οι εφαρμογές της. Η οικονομική σύγκριση μας αποδεικνύει ότι θα υπάρξει σχετικά γρήγορη απόσβεση του κόστους της μονάδας που είναι μεγαλύτερο από αυτό των συμβατικών κλιματιστικών. Βεβαίως αυτό εξαρτάται και από την χρήση του ψύκτη. Πάντως το προσωπικό συμπέρασμά μου είναι ότι η εξατμιστική ψύξη συμφέρει καλύτερα να εφαρμόζεται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και δημόσιες υπηρεσίες όσον αφορά την χώρα μας.

Το κυριότερο μέρος της εργασίας ήταν το πείραμα, κατά το οποίο ελήφθησαν μετρήσεις της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της ταχύτητας του αέρα πριν και μετά την demo μονάδα που χρησιμοποιήθηκε. Οι αρχικές συνθήκες του αέρα μεταβλήθηκαν τρεις φορές για να υπάρχει μεγαλύτερο εύρος δοκιμών. Η ανάλυση των μετρήσεων έγινε στο πρόγραμμα Mathcad και η ακριβής διαδικασία δίνεται στο παράρτημα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ήταν σημαντικά γιατί μας δείχνουν κυρίως την αποδοτικότητα του ψύκτη, η οποία για τις τρεις περιπτώσεις κυμαίνεται από **125 – 130%**, που είναι σύμφωνα με την θεωρία του κύκλου του Maisotsenko. Συγκεκριμένα στο τρίτο πείραμα η πτώση της θερμοκρασίας είναι **32,4°C** με την σχετική υγρασία στο **60%**. Παρατηρήθηκαν κάποιες αποκλίσεις στους ισολογισμούς μάζας αέρα, μάζας νερού και ενέργειας τις τάξεως των **0,5 – 5%** που οφείλονται στα σφάλματα των μετρήσεων κυρίως στην προσαγωγή του αέρα. Επίσης όσον αφορά το σημείο εισόδου και εξόδου του αέρα που ψύχεται στην μονάδα στον ψυχομετρικό χάρτη εμφανίστηκε μία κλίση και στις τρεις περιπτώσεις η οποία δεν ήταν αναμενόμενη. Αυτό γιατί στο κύριο οριζόντιο ρεύμα δεν προστίθεται ούτε αφαιρείται ποσό νερού και έτσι η υγρασία έπρεπε να παραμείνει η ίδια με την αρχική. Η αιτιολόγηση του γεγονότος αυτού είναι πως υπάρχει σφάλμα στην μέτρηση των αρχικών συνθηκών και κυρίως της σχετικής υγρασίας και αποδεικνύεται με την ανάλυση ευαισθησίας που έγινε στην συνέχεια. Τέλος, όπως έχει διευκρινιστεί στο **Κεφάλαιο 5** παρατηρήθηκε ένα ελάττωμα στεγανότητας της demo μονάδας στο πάνω μέρος της που έχει κάποιες επιπτώσεις στις μετρήσεις του πειράματος. Γενικά το κύριο μέλημα ενός χρήστη μίας συσκευής κλιματισμού είναι να πληρούνται οι προϋποθέσεις θερμικής άνεσης στον κλιματιζόμενο χώρο ώστε να είναι δυνατή η άνετη διαβίωση των ενοίκων μέσα σε αυτόν. Με βάση το πείραμα αποδείχτηκε ότι η μονάδα προσφέρει θερμική άνεση, αφού η θερμοκρασία και η υγρασία είναι σε ικανοποιητικές τιμές.

Το δεύτερο σημαντικό κομμάτι της εργασίας ήταν η υπολογιστική επίλυση του κύκλου του Maisotsenko και ειδικότερα της demo μονάδας ψύξης. Με την βοήθεια του Mathacad υλοποιήθηκε πρόγραμμα με βάση την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Αυτό έχει την δυνατότητα εισάγοντας διάφορες αρχικές συνθήκες περιβάλλοντος – θερμοκρασίας και υγρασίας – να μας δείχνει την μεταβολή τους σε κάθε θέση μέσα στην μονάδα και τελικά να μας δίνει τις τελικές παραγόμενες που είναι και οι ζητούμενες. Επίσης υπολογίζει στην συνέχεια τον βαθμό απόδοσης της μονάδος και την κατανάλωση νερού.

Έχοντας πλέον τις πειραματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα της υπολογιστικής επίλυσης της μονάδος μπορούμε εύκολα να τα συγκρίνουμε. Το πρόγραμμα της θεωρητικής επίλυσης μας δίνει αποτελέσματα για ένα ευρύ φάσμα αρχικών συνθηκών. Γι' αυτό και έχουν κατασκευαστεί διαγράμματα βαθμού απόδοσης και κατανάλωσης νερού σε σχέση με διάφορες συνθήκες. Εισάγοντας όμως ως αρχικές συνθήκες τις ίδιες με αυτές του πειράματος που είναι τρεις διαφορετικές συμπεραίνουμε ότι το γενικό αποτέλεσμα έχει κάποια απόκλιση. Παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνουμε την θερμοκρασία στις αρχικές συνθήκες, τόσο μεγαλύτερες γίνονται οι αποκλίσεις πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Στο τέλος του **Κεφαλαίου 6** είδαμε αναλυτικά αυτές τις αποκλίσεις που προέκυψαν στην θερμοκρασία, στην σχετική υγρασία και στον βαθμό απόδοσης και κυμαίνονται από **3 – 11%** , **6 – 20%** και **4 – 10%** αντίστοιχα. Σχεδόν πάντα τα πειραματικά και τα θεωρητικά αποτελέσματα δεν είναι ίδια γιατί υπεισέρχονται τα σφάλματα στις μετρήσεις. Για το συγκεκριμένο πείραμα έχουν ήδη σχολιαστεί αυτά τα σφάλματα.

Η τεχνολογία της εξατμιστικής ψύξης με αρχή λειτουργίας τον κύκλο του Maisotsenko θα πρέπει να αναπτυχθεί στην Ελλάδα, σε παράλληλη λειτουργία με συστήματα Α.Π.Ε., για να δώσει λύσεις στο ενεργειακό πρόβλημα που γίνεται ορατό κυρίως τους θερινούς μήνες. Η χρήση των συμβατικών κλιματιστικών, που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας και μάλιστα στις ώρες αιχμής υπάρχει ο κίνδυνος του black out, θα περιοριστεί. Έμμεσα μειώνεται και η εκπομπή των αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Γενικότερα με την χρήση της τεχνολογίας αυτής θα γίνει ένα βήμα για την «πράσινη» ανάπτυξη της χώρας. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι υπόθεση όλων μας: και για την οικονομία του οικογενειακού εισοδήματος και για την εθνική οικονομία αλλά και για την προστασία του πλανήτη.

Εκφράζονται ειλικρινείς ευχαριστίες προς τον Δρ. Εμμανουήλ Ρογδάκη και τον Υ.Δ. κ. Δημήτριο Τερτίπη για την ουσιαστική βοήθεια και υποστήριξη σε όλα τα στάδια εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αρχεία Υπολογιστικής Επίλυσης

Επιλυση για το πρωτο τμημα της μοναδας που γινεται η μεταφορα θερμότητας

ORIGIN := 1 Dt := 18 Drh := 10

Αρχικες συνθηκες:

$$T_{in} := 26 + Dt$$

$$RH_{in} := (10 + Drh)\%$$

$$H_{in} := h(RH_{in}, T_{in}) \cdot \frac{1000J}{kg} = 73398 \cdot \frac{J}{kg}$$

$$W_{in} := W(RH_{in}, T_{in}) = 0.01139 \cdot \frac{kg}{kg}$$

$$T_{dp} := T_{dp}(RH_{in}, T_{in}) = 16.032$$

$$\rho_{in} := \rho(RH_{in}, T_{in}) \cdot \frac{kg}{m^3} = 1.105 \cdot \frac{kg}{m^3}$$

$$T_w := T_w(RH_{in}, T_{in}) = 24.538$$

$$\rho_w := \rho(RH_{in}, T_w) \cdot \frac{kg}{m^3} = 1.183 \cdot \frac{kg}{m^3}$$

$$H_w := h(1, T_w) \cdot 1000 \cdot \frac{J}{kg} = 74232 \cdot \frac{J}{kg}$$

Μ.Ο ταχυτητων που εχουν μετρηθει:

Υπολογισμος hm (μεσης ειδικης συναγωγιμοτητας συμφωνα με σχεση 8.22 σελ.294 **Αρχες Μεταφορας Θερμότητας & Μαζης, Ξ. Κακατσιου.**

$$hm := \frac{\left[C1 \cdot \frac{k1}{D_e} \cdot \left(\frac{U_p \cdot D_e}{v1} \right)^{n1} + C1 \cdot \frac{k1}{D_e} \cdot \left(\frac{U_w \cdot D_e}{v1} \right)^{n1} \right]}{2}$$

Ποσο μεταφερομενης θερμότητας μεσω αγωγης και συναγωγης απο το product ρευμα αερος στο working.

$$DQ := k \cdot A1 \cdot \frac{(T_{in} - T_w)K}{L1} + hm \cdot A1 \cdot (T_{in} - T_w) \cdot K$$

$$DQ = 1.064 W$$

Παροχη μαζας για καθε ρευμα αερος:

$$m_p := \rho_{in} \cdot E1 \cdot U_{p1} = 1.035 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$m_w := \rho_w \cdot E1 \cdot U_{w1} = 4.215 \times 10^{-5} \frac{kg}{s}$$

Θερμικο ισοζυγιο ενεργειας για καθε ρευμα αερος:

$$H_p := H_{in} - \frac{DQ}{m_p} \quad H_p = 63124 \cdot \frac{J}{kg}$$

$$H_w := H_w + \frac{DQ}{m_w} \quad H_w = 99465 \cdot \frac{J}{kg}$$

$$H_{pn} := \frac{H_p}{1000 \cdot \frac{J}{kg}}$$

$$H_{wn} := \frac{H_w}{1000 \cdot \frac{J}{kg}}$$

Δεδομενα:

Συντελεστης αγωγής του χαρτιου: $k := 0.05 \frac{watt}{m \cdot K}$

Επιφανεια συναλλαγης θερμότητας: $A1 := 4.84 \cdot 10^{-4} m^2$

Παχος χαρτιου: $L1 := 0.001m$

Διατομη οπτης: $E1 := 4.4 \cdot 10^{-5} m^2$

Υψος οπτης: $D_e := 0.022m$

$$k1 := 0.0262 \cdot \frac{watt}{m \cdot K}$$

Ιδιότητες αερα:

$$v1 := 15.8 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Συντελεστες C, n απο πινακα 8.2. σελ.295

$$C1 := 0.205$$

Αρχες Μεταφορας Θερμότητας & Μαζης, Ξ. Κακατσιου:

$$n1 := 0.731$$

$$U_p := \begin{pmatrix} 2.129 \\ 2.231 \\ 2.259 \\ 2.768 \end{pmatrix} \frac{m}{s}$$

$$U_w := \begin{pmatrix} 0.81 \\ 0.706 \\ 0.739 \\ 0.717 \\ 0.509 \\ 0.341 \\ 0.483 \\ 0.538 \\ 0.556 \\ 0.755 \\ 0.578 \\ 0.542 \\ 0.614 \\ 0.466 \end{pmatrix} \frac{m}{s}$$

Υπολογισμός των νέων τιμών θερμοκρασιών μέσω του ψυχομετρικού χαρτί:

$$T_{\text{pdb}}(W_{\text{in}}, H_{\text{pn}}) := \text{Tdb}_{\text{W_H}}(W_{\text{in}}, H_{\text{pn}})$$

$$T_{\text{pdb}}(W_{\text{in}}, H_{\text{pn}}) = 33.8$$

$$T_{\text{wdp}}(\text{RH}, H_{\text{wn}}) := \text{Tdb.rh}_h(1, H_{\text{wn}})$$

$$T_{\text{wdp}}(\text{RH}, H_{\text{wn}}) = 30$$

Επιλυση για ολα τα τμηματα της μοναδας που γινεται η μεταφορα θερμοτητας με καταλληλο προγραμμα

Το ακόλουθο υποπρόγραμμα υπολογίζει τις θερμοκρασίες και ενθαλπίες του working ρεύματος αέρος προτού γίνει η διασταύρωση του με το product ρεύμα.

ORIGIN ≡ 0

$$\begin{aligned} \text{Tf}_{1_7}(\text{Y}) := & \left\{ \begin{array}{l} W_{\text{in}} \leftarrow W(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{in}}) \\ \rho_{\text{in}} \leftarrow \rho(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{in}}) \\ H_{\text{in}} \leftarrow h(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{in}}) \cdot 1000 \\ T_{\text{inw}} \leftarrow T_w(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{in}}) \\ \rho_{\text{inw}} \leftarrow \rho(1, T_{\text{inw}}) \\ U_w \leftarrow \begin{pmatrix} 0.81 \\ 0.706 \\ 0.739 \\ 0.717 \\ 0.509 \\ 0.341 \\ 0.483 \\ 0.538 \\ 0.556 \\ 0.755 \\ 0.578 \\ 0.542 \\ 0.614 \\ 0.466 \end{pmatrix} \\ U_p \leftarrow \frac{(U_{w7} + U_{w8} + U_{w9} + U_{w10} + U_{w11} + U_{w12} + U_{w13})}{2} \\ AT \leftarrow T_{\text{in}} \\ H_p \leftarrow H_{\text{in}} \\ k \leftarrow 0.05 \\ A1 \leftarrow 4.84 \cdot 10^{-4} \\ L1 \leftarrow 0.001 \\ E1 \leftarrow 4.4 \cdot 10^{-5} \\ D_e \leftarrow 0.022 \\ k1 \leftarrow 0.0262 \\ v1 \leftarrow 15.8 \cdot 10^{-6} \\ C1 \leftarrow 0.205 \\ n1 \leftarrow 0.731 \end{array} \right. \end{aligned}$$

Εισαγωγή των αρχικών συνθηκών T_{in} , RH_{in} και ταχυτήτων αέρος για κάθε working κανάλι και των κατάλληλων δεδομένων (που έχουν διευκρινιστεί παραπάνω)

$$\begin{aligned}
\text{Tdbf}_8_{14} := & \left\{ \begin{array}{l}
W_{in} \leftarrow W(RH_{in}, T_{in}) \\
\rho_{in} \leftarrow \rho(RH_{in}, T_{in}) \\
H_{in} \leftarrow h(RH_{in}, T_{in}) \cdot 1000 \\
T_{inw} \leftarrow Tw(RH_{in}, T_{in}) \\
\rho_{inw} \leftarrow \rho(1, T_{inw}) \\
U_w \leftarrow \begin{pmatrix} 0.81 \\ 0.706 \\ 0.739 \\ 0.717 \\ 0.509 \\ 0.341 \\ 0.483 \\ 0.538 \\ 0.556 \\ 0.755 \\ 0.578 \\ 0.542 \\ 0.614 \\ 0.466 \end{pmatrix} \\
U_p \leftarrow \frac{(U_w_7 + U_w_8 + U_w_9 + U_w_{10} + U_w_{11} + U_w_{12} + U_w_{13})}{2} \\
AT \leftarrow T_{in} \\
H_p \leftarrow H_{in} \\
k \leftarrow 0.05 \\
A1 \leftarrow 4.84 \cdot 10^{-4} \\
L1 \leftarrow 0.001 \\
E1 \leftarrow 4.4 \cdot 10^{-5} \\
D_e \leftarrow 0.022 \\
k1 \leftarrow 0.0262 \\
v1 \leftarrow 15.8 \cdot 10^{-6} \\
C1 \leftarrow 0.205 \\
n1 \leftarrow 0.731
\end{array} \right.
\end{aligned}$$

Εισαγωγή των αρχικών συνθηκών T_{in} , RH_{in} και ταχυτήτων αέρος για κάθε working κανάλι και των κατάλληλων δεδομένων (που έχουν διευκρινιστεί παραπάνω)

```

for i ∈ 0..Y
  BT ← Tw(RHin, Tin)
  Hw ← Hin
  hm ←  $\frac{\left[ C1 \cdot \frac{k1}{D_e} \cdot \left( \frac{U_p \cdot D_e}{v1} \right)^{n1} + C1 \cdot \frac{k1}{D_e} \cdot \left( \frac{U_w \cdot D_e}{v1} \right)^{n1} \right]}{2}$ 
  DQ ← k·A1· $\frac{(AT - BT)}{L1}$  + hm·A1·(AT - BT)
  mp ← ρin·2E1·Up
  mw ← ρinw·E1·Uwi
  Hp ← Hp -  $\frac{DQ}{m_p}$ 
  Hw ← Hw +  $\frac{DQ}{m_w}$ 
  AT ← TdbW_H $\left( W_{in}, \frac{H_p}{1000} \right)$ 
  B ← Tdbrh_h $\left( 1, \frac{H_w}{1000} \right)$ 
B

```

Επανάληψη για τα 7 πρώτα κάθετα κανάλια

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγιμότητας από σχέση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή

Υπολογισμός του ποσού μεταφερόμενης θερμότητας μέσω αγωγής και συναγωγής

Υπολογισμός της παροχής μάζας για κάθε κανάλι (product & working)

Υπολογισμός της νέας ενθαλπίας στο οριζόντιο κανάλι και στο κάθετο κανάλι αφαιρώντας και προσθέτοντας αντίστοιχα το ποσό μεταφερόμενης θερμότητας στην προηγούμενη ενθαλπία

Εύρεση των νέων θερμοκρασιών μέσω ψυχομετρικού χάρτη

Η θερμοκρασία και η ενθαλπία για τα 7 πρώτα κανάλια working αέρος πριν την διασταύρωση με τα product κανάλια:

i := 0..6

Tf_{1_7(i)} =

29.806
28.881
27.648
26.882
26.879
27.061
25.875

Hf_{1_7(i)} := h(1, Tf_{1_7(i)})·1000

Hf_{1_7(i)} =

98520
93836
87886
84349
84334
85162
79877

```

for i ∈ 0..6
  BT ← Tw(RHin, Tin)
  Hw ← Hin
  hm ←  $\frac{\left[ C1 \cdot \frac{k1}{D_e} \cdot \left( \frac{U_p \cdot D_e}{v1} \right)^{n1} + C1 \cdot \frac{k1}{D_e} \cdot \left( \frac{U_{w_i} \cdot D_e}{v1} \right)^{n1} \right]}{2}$ 
  DQ ← k · A1 ·  $\frac{(AT - BT)}{L1}$  + hm · A1 · (AT - BT)
  mp ← ρin · 2E1 · Up
  mw ← ρinw · E1 · Uw_i
  Hp ← Hp -  $\frac{DQ}{m_p}$ 
  Hw ← Hw +  $\frac{DQ}{m_w}$ 
  AT ← Tdbw_H(Win,  $\frac{H_p}{1000}$ )
  B ← Tdbrh_h(1,  $\frac{H_w}{1000}$ )
AT

```

Επανάληψη για τα 7 δεύτερα κάθετα κανάλια

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγιμότητας από σχέση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή

Υπολογισμός του ποσού μεταφερόμενης θερμότητας μέσω αγωγής και συναγωγής

Υπολογισμός της παροχής μάζας για κάθε κανάλι (product & working)

Υπολογισμός της νέας ενθαλπίας στο οριζόντιο κανάλι και στο κάθετο κανάλι αφαιρώντας και προσθέτοντας αντίστοιχα το ποσό μεταφερόμενης θερμότητας στην προηγούμενη ενθαλπία

Εύρεση των νέων θερμοκρασιών μέσω ψυχομετρικού χάρτη

Η θερμοκρασία και η ενθαλπία για τα υπόλοιπα 7 κανάλια working αέρος πριν την διασταύρωση με τα product κανάλια:

$$Tdbf_{8_14} = 26.919$$

$$RHf := RHDBW(Tdbf_{8_14}, W_{in})$$

$$RHf = 0.513$$

$$Tf_{8_14} := Tw(RHf, Tdbf_{8_14})$$

$$Tf_{8_14} = 19.679$$

$$Hf_{8_14} := h(1, Tf_{8_14}) \cdot 1000 = 56214$$

Σύμφωνα με την γεωμετρία της μονάδος, οι τιμές θερμοκρασίας του working ρευματος για τα κάθετα κανάλια 8 - 14 πριν την διασταύρωση με το product ρεύμα είναι ίδιες και ίσες με την θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα στο σημείο αυτό.

Στο ακόλουθο πρόγραμμα υπολογίζονται με βάση τις εξισώσεις μεταφοράς μάζας οι θερμοκρασίες του product και working ρεύματος αέρος σε όλη την περιοχή των καναλιών του product ρεύματος.

Το παρακάτω πρόγραμμα βρίσκει τις θερμοκρασίες του product ρεύματος και τις τοποθετεί σε πίνακα 4x14

```

T_DBproduct :=
  nkanalia_working ← 14
  nkanalia_product ← 4
  W_in ← W(RH_in, T_in)
  ρ_in ← ρ(RH_in, T_in)
  H_in ← h(RH_in, T_in)·1000
  T_inw ← Tw(RH_in, T_in)
  ρ_inw ← ρ(1, T_inw)

  Up ←
    ( 2.129
      2.231
      2.259
      2.768 )

  Uw ←
    ( 0.81
      0.706
      0.739
      0.717
      0.509
      0.341
      0.483
      0.538
      0.556
      0.755
      0.578
      0.542
      0.614
      0.466 )

  for X ∈ 1..nkanalia_product
    | A0,X ← T_in
    | Hp0,X ← H_in
  for Y ∈ 1..  $\frac{nkanalia\_working}{2}$ 
    | BY,0 ← Tf1_7(Y - 1)
    | HwY,0 ← Hf1_7(Y - 1)
  for Y ∈  $\frac{nkanalia\_working}{2}$  .. nkanalia_working
    | BY,0 ← Tf8_14
    | HwY,0 ← Hf8_14
  k ← 0.05
  A1 ← 4.84·10-4
  L1 ← 0.001
  E1 ← 4.4·10-5

```

Εισαγωγή των αρχικών συνθηκών T_{in}, RH_{in} και ταχυτήτων αέρος για κάθε working κανάλι και των κατάλληλων δεδομένων (που έχουν διευκρινιστεί παραπάνω)

Εισαγωγή των αρχικών συνθηκών καθώς και των θερμοκρασιών που προέκυψαν από το προηγούμενο υποπρόγραμμα στις κατάλληλες θέσεις του πίνακα

Το παρακάτω πρόγραμμα βρίσκει τις θερμοκρασίες του working ρεύματος και τις τοποθετεί σε πίνακα 4x14

```

T_Dworking :=
  n_kanalia_working ← 14
  n_kanalia_product ← 4
  W_in ← W(RH_in, T_in)
  ρ_in ← ρ(RH_in, T_in)
  H_in ← h(RH_in, T_in) · 1000
  T_inw ← Tw(RH_in, T_in)
  ρ_inw ← ρ(1, T_inw)

  Up ←
    ( 2.129
      2.231
      2.259
      2.768 )

  Uw ←
    ( 0.81
      0.706
      0.739
      0.717
      0.509
      0.341
      0.483
      0.538
      0.556
      0.755
      0.578
      0.542
      0.614
      0.466 )

  for X ∈ 1..n_kanalia_product
    | A_0,X ← T_in
    | H_p0,X ← H_in

  for Y ∈ 1..  $\frac{n_{kanalia\_working}}{2}$ 
    | B_Y,0 ← Tf_1_7(Y - 1)
    | H_wY,0 ← Hf_1_7(Y - 1)

  for Y ∈  $\frac{n_{kanalia\_working}}{2}$  .. n_kanalia_working
    | B_Y,0 ← Tf_8_14
    | H_wY,0 ← Hf_8_14

  k ← 0.05
  A1 ← 4.84 · 10-4
  L1 ← 0.001
  E1 ← 4.4 · 10-5

```

Εισαγωγή των αρχικών συνθηκών T_{in}, RH_{in} και ταχυτήτων αέρος για κάθε working κανάλι και των κατάλληλων δεδομένων (που έχουν διευκρινιστεί παραπάνω)

Εισαγωγή των αρχικών συνθηκών καθώς και των θερμοκρασιών που προέκυψαν από το προηγούμενο υποπρόγραμμα στις κατάλληλες θέσεις του πίνακα

```

De ← 0.022
k1 ← 0.0262
v1 ← 15.8 · 10-6
C1 ← 0.205
n1 ← 0.731
for i ∈ 1..nkanalia_working
  for j ∈ 1..nkanalia_product
    hmi,j ←  $\frac{\left[ C_1 \cdot \frac{k_1}{D_e} \cdot \left( \frac{U_{p_{j-1}} \cdot D_e}{v_1} \right)^{n_1} + C_1 \cdot \frac{k_1}{D_e} \cdot \left( \frac{U_{w_{i-1}} \cdot D_e}{v_1} \right)^{n_1} \right]}{2}$ 
    DQi,j ← k · A1 ·  $\frac{(A_{i-1,j} - B_{i,j-1})}{L_1}$  + hmi,j · A1 · (Ai-1,j - Bi,j-1)
    mpj ← ρin · E1 · Upj-1
    mwi ← ρinw · E1 · Uwi-1
    Hpi,j ← Hpi-1,j -  $\frac{DQ_{i,j}}{m_{p_j}}$ 
    Hwi,j ← Hwi,j-1 +  $\frac{DQ_{i,j}}{m_{w_i}}$ 
    Ai,j ← TdbW_H  $\left( W_{in}, \frac{H_{p_{i,j}}}{1000} \right)$ 
    Bi,j ← Tdb.rh_h  $\left( 1, \frac{H_{w_{i,j}}}{1000} \right)$ 

```

A

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγιμότητας από σχέση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή

Υπολογισμός του ποσού μεταφερόμενης θερμότητας μέσω αγωγής και συναγωγής

Υπολογισμός της παροχής μάζας για κάθε κανάλι (product & working)

Υπολογισμός της νέας ενθαλπίας στο οριζόντιο κανάλι και στο κάθετο κανάλι αφαιρώντας και προσθέτοντας αντίστοιχα το ποσό μεταφερόμενης θερμότητας στην προηγούμενη ενθαλπία

Εύρεση των νέων θερμοκρασιών μέσω ψυχομετρικού χάρτη

Εμφάνιση πίνακα θερμοκρασιών της πλευράς του product αέρα

$$\begin{aligned}
D_e &\leftarrow 0.022 \\
k_l &\leftarrow 0.0262 \\
v_l &\leftarrow 15.8 \cdot 10^{-6} \\
C_1 &\leftarrow 0.205 \\
n_1 &\leftarrow 0.731 \\
\text{for } i \in 1..n_{\text{kanalia_working}} \\
\quad \text{for } j \in 1..n_{\text{kanalia_product}} \\
\quad \quad \text{hm}_{i,j} &\leftarrow \frac{\left[C_1 \cdot \frac{k_l}{D_e} \cdot \left(\frac{U_{p_{j-1}} \cdot D_e}{v_l} \right)^{n_1} + C_1 \cdot \frac{k_l}{D_e} \cdot \left(\frac{U_{w_{i-1}} \cdot D_e}{v_l} \right)^{n_1} \right]}{2} \\
\quad \quad \text{DQ}_{i,j} &\leftarrow k \cdot A_1 \cdot \frac{(A_{i-1,j} - B_{i,j-1})}{L_1} + \text{hm}_{i,j} \cdot A_1 \cdot (A_{i-1,j} - B_{i,j-1}) \\
\quad \quad m_{p_j} &\leftarrow \rho_{in} \cdot E_1 \cdot U_{p_{j-1}} \\
\quad \quad m_{w_i} &\leftarrow \rho_{inw} \cdot E_1 \cdot U_{w_{i-1}} \\
\quad \quad H_{p_{i,j}} &\leftarrow H_{p_{i-1,j}} - \frac{\text{DQ}_{i,j}}{m_{p_j}} \\
\quad \quad H_{w_{i,j}} &\leftarrow H_{w_{i,j-1}} + \frac{\text{DQ}_{i,j}}{m_{w_i}} \\
\quad \quad A_{i,j} &\leftarrow T_{db_{W_H}} \left(W_{in}, \frac{H_{p_{i,j}}}{1000} \right) \\
\quad \quad B_{i,j} &\leftarrow T_{db_{rh_h}} \left(1, \frac{H_{w_{i,j}}}{1000} \right)
\end{aligned}$$

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγιμότητας από σχέση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή
Υπολογισμός του ποσού μεταφερόμενης θερμότητας μέσω αγωγής και συναγωγής
Υπολογισμός της παροχής μάζας για κάθε κανάλι (product & working)
Υπολογισμός της νέας ενθαλπίας στο οριζόντιο κανάλι και στο κάθετο κανάλι αφαιρώντας και προσθέτοντας αντίστοιχα το ποσό μεταφερόμενης θερμότητας στην προηγούμενη ενθαλπία
Εύρεση των νέων θερμοκρασιών μέσω ψυχομετρικού χάρτη
Εμφάνιση πίνακα θερμοκρασιών της πλευράς του working αέρα

Παρακάτω δίνονται οι υπολογισμένοι από το πρόγραμμα πίνακες και ο πίνακας της υγρασίας του product ρεύματος

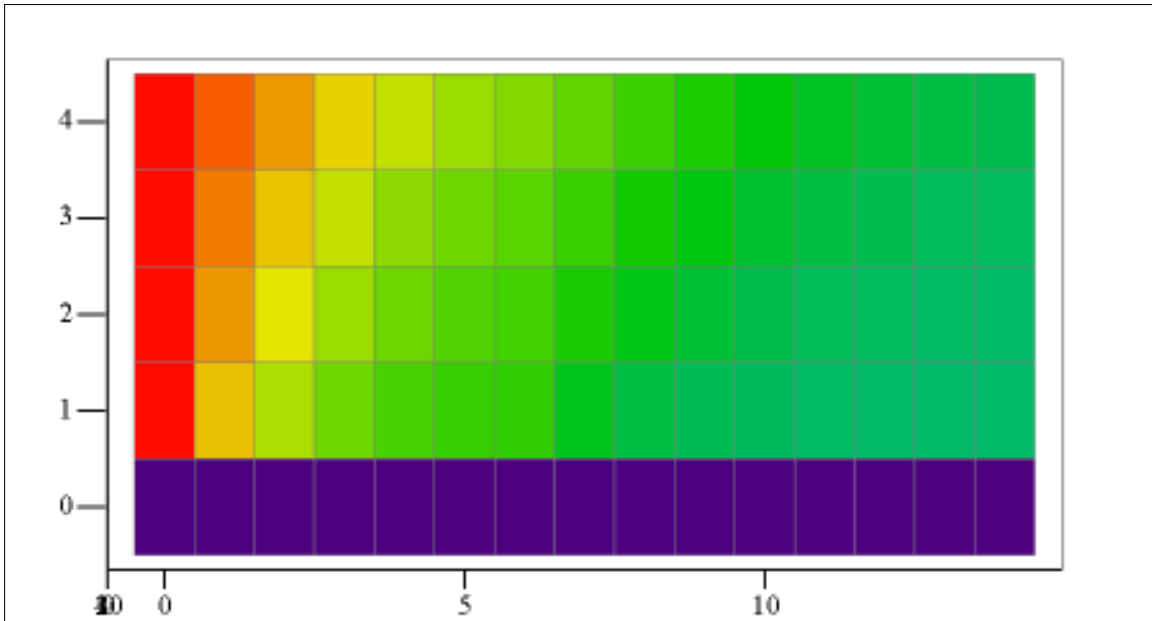
$$T_{DBproduct}^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 44 & 36.48 & 32.64 & 30.1 & 28.47 & 27.69 & 27.4 & 23.65 & 21.71 & 20.71 & 20.18 & 19.93 & 19.81 & 19.74 & 19.71 \\ 44 & 38.38 & 34.79 & 31.99 & 29.98 & 28.84 & 28.21 & 26.25 & 24.14 & 22.53 & 21.33 & 20.67 & 20.27 & 20.02 & 19.88 \\ 44 & 39.55 & 36.35 & 33.59 & 31.42 & 30.09 & 29.28 & 27.81 & 26.02 & 24.35 & 22.76 & 21.77 & 21.07 & 20.56 & 20.26 \\ 44 & 40.82 & 38.18 & 35.63 & 33.43 & 31.92 & 30.91 & 29.56 & 28.01 & 26.43 & 24.71 & 23.48 & 22.5 & 21.69 & 21.14 \end{pmatrix}$$

$$i := 0..14 \quad j := 1..4 \quad RH_{product}_{i,j} := RHDBW(T_{DBproduct}_{i,j}, W_{in}) \cdot 100$$

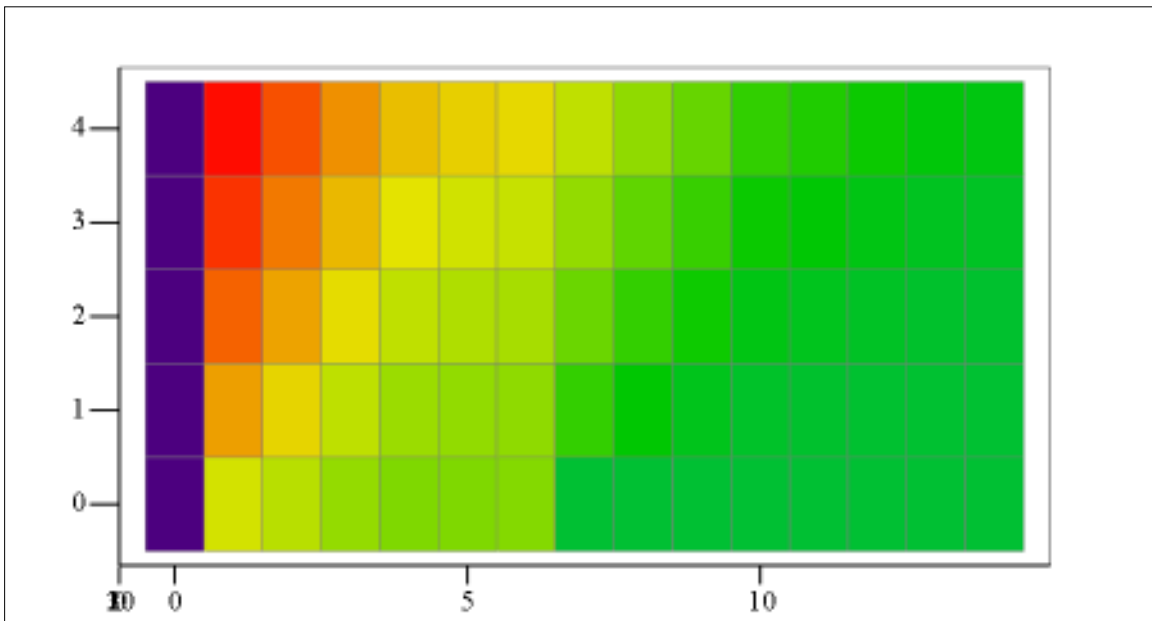
$$RH_{product}^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 20 & 29.85 & 36.94 & 42.67 & 46.88 & 49.04 & 49.91 & 62.32 & 70.15 & 74.57 & 77.03 & 78.23 & 78.84 & 79.15 & 79.31 \\ 20 & 26.92 & 32.76 & 38.31 & 42.96 & 45.88 & 47.6 & 53.39 & 60.52 & 66.7 & 71.76 & 74.75 & 76.63 & 77.84 & 78.5 \\ 20 & 25.28 & 30.06 & 35.02 & 39.57 & 42.69 & 44.73 & 48.72 & 54.1 & 59.76 & 65.79 & 69.88 & 72.92 & 75.24 & 76.66 \\ 20 & 23.63 & 27.21 & 31.26 & 35.32 & 38.46 & 40.74 & 44 & 48.15 & 52.81 & 58.51 & 62.99 & 66.82 & 70.22 & 72.62 \end{pmatrix}$$

$$T_{Dworking}^T = \begin{pmatrix} 0 & 29.81 & 28.88 & 27.65 & 26.88 & 26.88 & 27.06 & 19.68 & 19.68 & 19.68 & 19.68 & 19.68 & 19.68 & 19.68 & 19.68 \\ 0 & 33.13 & 31.03 & 29.11 & 27.89 & 27.56 & 27.45 & 24.03 & 21.81 & 20.76 & 20.1 & 19.94 & 19.82 & 19.74 & 19.72 \\ 0 & 35.4 & 32.95 & 30.68 & 29.13 & 28.57 & 28.29 & 26.11 & 24.01 & 22.48 & 21.09 & 20.67 & 20.29 & 20.01 & 19.91 \\ 0 & 37.05 & 34.55 & 32.15 & 30.41 & 29.71 & 29.34 & 27.58 & 25.75 & 24.17 & 22.36 & 21.72 & 21.09 & 20.53 & 20.33 \\ 0 & 38.37 & 36.05 & 33.7 & 31.9 & 31.2 & 30.86 & 29.12 & 27.48 & 25.97 & 23.94 & 23.23 & 22.41 & 21.54 & 21.23 \end{pmatrix}$$

Διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή της θερμοκρασίας σε όλο το πλέγμα των product ρευμάτων αέρα με χρωματική διαβάθμιση:



$T_{DBproduct}^T$



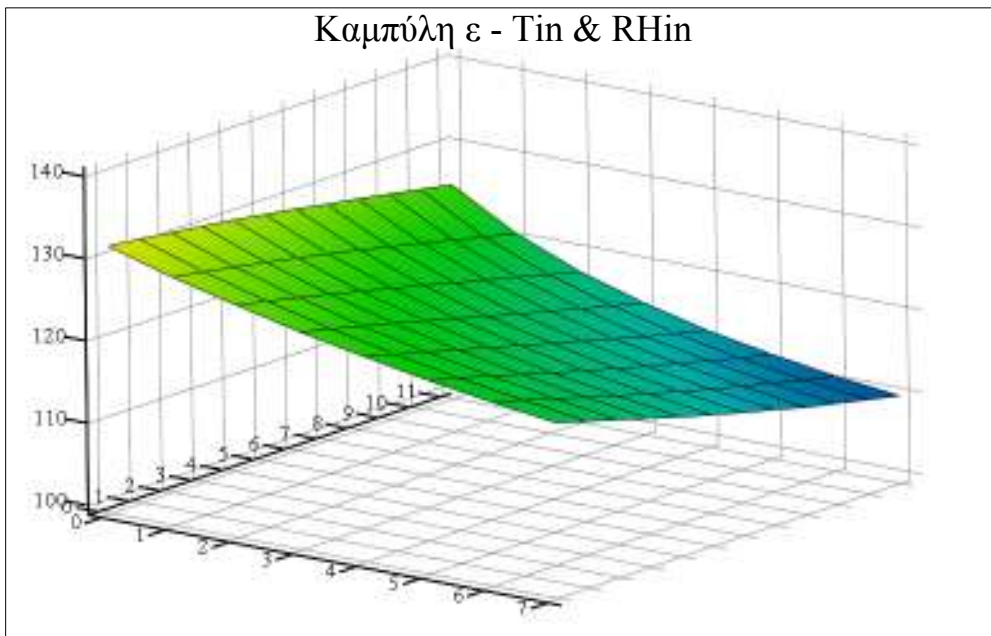
$T_{Dworking}^T$

Βαθμός Αποδοτικότητας μονάδος:

$$\epsilon := \frac{T_{in} - \frac{\sum_{i=1}^4 T_{DBproduct_{14,i}}}{4}}{T_{in} - Tw(RH_{in}, T_{in})} \cdot 100\%$$

$\epsilon = 122.0\%$

		Tin											
		26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
RHin	Em :=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	10	0	131.4	131	130.5	130	129.5	128.9	128.3	127.6	127	126.3	125.6
20	1	129.1	128.5	127.8	127.1	126.4	125.6	124.8	123.9	123.1	122.2	121.3	120.5
30	2	127.2	126.4	125.6	124.7	123.8	122.9	122	121	120.1	119.2	118.2	117.3
40	3	125.4	124.5	123.6	122.7	121.7	120.7	119.7	118.7	117.8	116.8	115.9	115
50	4	123.9	122.9	121.9	120.9	119.9	118.9	117.9	116.9	115.9	114.9	114	113.1
60	5	122.5	121.5	120.5	119.4	118.3	117.3	116.3	115.3	114.4	113.4	112.5	111.7
70	6	121.3	120.3	119.2	118.1	117	116	115	114	113.1	112.2	111.3	110.5
80	7	120.3	119.2	118.1	117	115.9	114.9	113.9	113	112	111.2	110.4	109.6



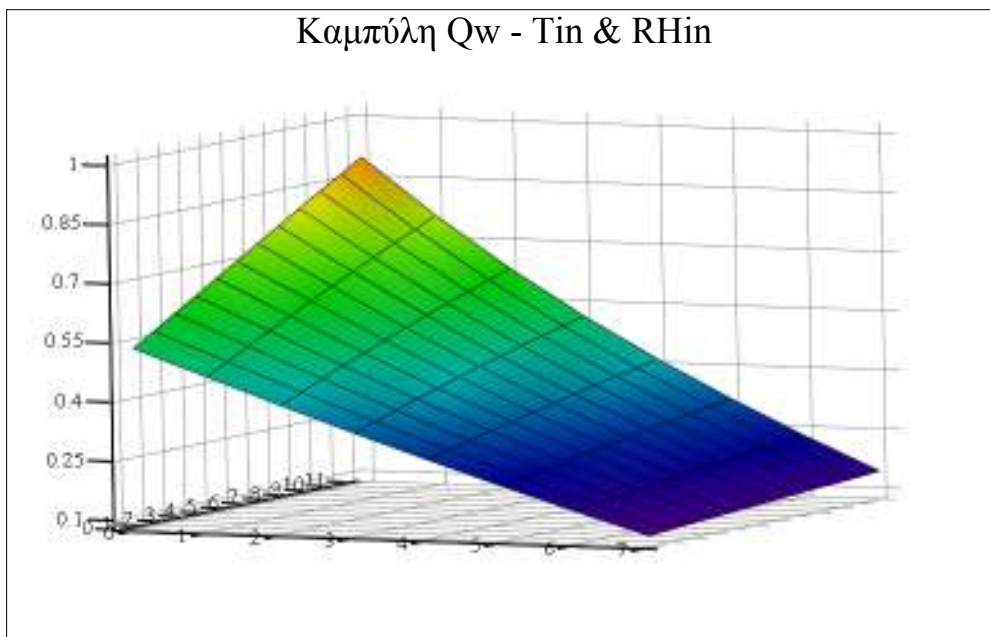
Em

Κατανάλωση νερού:

$$Q_{\text{water}} := \sum_{i=1}^{14} \left[(W(1, T_{D\text{working}, i, 4}) - W_{\text{in}}) \cdot U_{w, i-1} \cdot \frac{(\rho(1, T_{D\text{working}, i, 4}) + \rho(RH_{\text{in}}, T_{\text{in}}))}{2} \cdot 32 \cdot E1 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$Q_{\text{water}} = 0.727 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

		Tin											
		26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
RHin	Q _w :=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	10	0	0.534	0.567	0.601	0.634	0.668	0.701	0.735	0.768	0.801	0.834	0.866
20	1	0.468	0.496	0.524	0.552	0.579	0.606	0.632	0.658	0.684	0.709	0.733	0.757
30	2	0.402	0.425	0.448	0.47	0.491	0.513	0.533	0.554	0.573	0.592	0.611	0.629
40	3	0.338	0.356	0.374	0.391	0.408	0.425	0.441	0.456	0.471	0.486	0.5	0.514
50	4	0.276	0.29	0.303	0.317	0.33	0.342	0.355	0.366	0.378	0.389	0.4	0.411
60	5	0.216	0.226	0.236	0.246	0.256	0.265	0.274	0.283	0.291	0.3	0.308	0.316
70	6	0.158	0.165	0.172	0.179	0.186	0.192	0.199	0.205	0.211	0.216	0.222	0.228
80	7	0.102	0.107	0.111	0.115	0.119	0.123	0.127	0.131	0.135	0.138	0.142	0.146

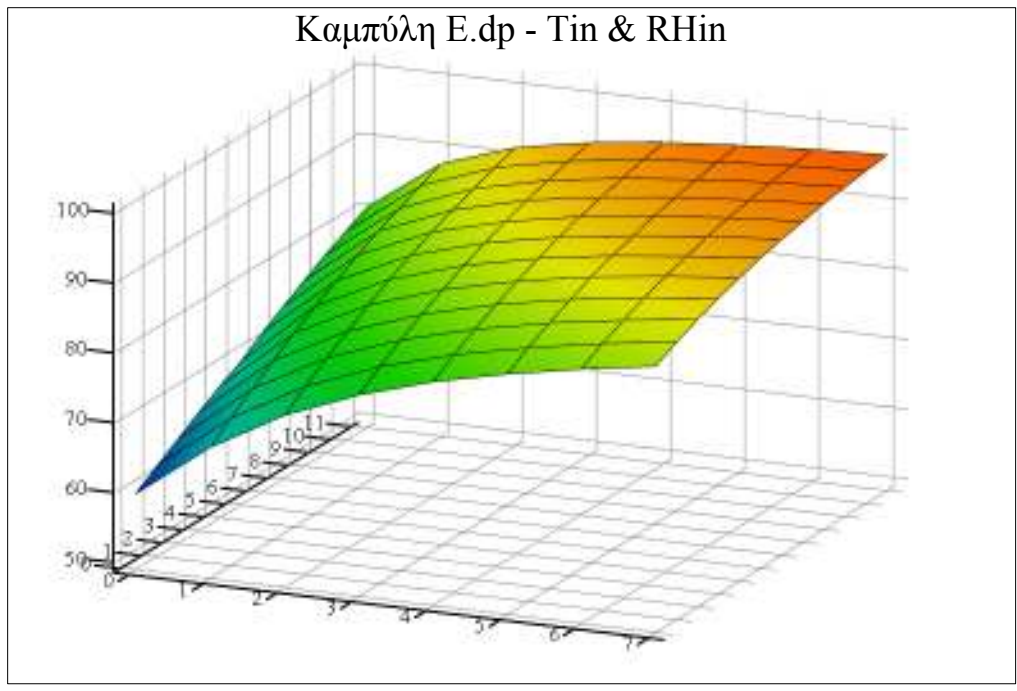


Q_w

Βαθμός Απόδοσης Σημείου Δρόσου:

$$\epsilon_{dp} := \frac{T_{in} - \frac{\sum_{i=1}^4 T_{DBproduct_{14,i}}}{4}}{T_{in} - T_{dp}(RH_{in}, T_{in})} 100\% \quad \epsilon_{dp} = 84.9\%$$

		Tin											
		26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
RHin	E _{dp} := 0	59.5	61.6	63.6	65.6	67.5	69.2	71.4	73.3	75.2	77	78.6	80.2
	1	67.4	69.8	72.1	74.3	76.4	78.4	80.2	82	83.6	85	86.4	87.7
	2	73.3	75.6	77.8	79.8	81.7	83.5	85.1	86.6	87.9	89.1	90.3	91.3
	3	77.5	79.7	81.7	83.5	85.2	86.8	88.2	89.4	90.6	91.6	92.5	93.3
	4	80.7	82.7	84.5	86.2	87.7	89.1	90.3	91.4	92.3	93.2	94	94.6
	5	83.1	85	86.7	88.2	89.6	90.8	91.8	92.8	93.6	94.3	95	95.5
	6	85.1	86.9	88.4	89.8	91	92	93	93.8	94.5	95.2	95.7	96.2
	7	86.8	88.4	89.8	91	92.1	93.1	93.9	94.6	95.3	95.8	96.3	96.7



E_{dp}

ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΩΡΙΣ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Διάμετρος της εισόδου προσαγωγής του αέρα (m): $d := 0.095\text{m}$

Οπότε η διατομή της (m^2): $A_1 := \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 7.088 \times 10^{-3} \text{m}^2$

Ο μέσος όρος της θερμοκρασίας ξηρής σφαίρας ($^{\circ}\text{C}$) στην προσαγωγή του αέρα προέκυψε:

$$T_{\text{dbin}} := 22.4$$

ενώ η σχετική υγρασία είναι:

$$\text{RH}_{\text{in}} := 54\%$$

Έτσι από το ψυχομετρικό χάρτη (υπάρχει στο Reference) βρίσκουμε:

$$H_1 := h(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{dbin}}) = 45.57$$

την ενθαλπία (kJ/kg):

$$H_{\text{in}} := 1000 \cdot H_1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 45570 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

τον λόγο υγρασίας ($\text{g}_{\text{νερού}}/\text{kg}_{\text{ξηρού αέρα}}$):

$$W_1 := W(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{dbin}}) = 0.0091$$

$$W_{\text{in}} := W_1 = 9.117 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{kg}}$$

την πυκνότητα (kg/m^3):

$$\rho_{\text{in}} := \rho(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{dbin}}) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.188 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Μηχανικός βαθμός απόδοσης
φουσητήρα:

$$\eta_m := 98\%$$

Ισχύς φουσητήρα (W):

$$N_1 := \eta_m \cdot 40\text{watt}$$

Ταχύτητα αέρα (m/s)
(Θεωρητική από τη Μηχανική
Ρευστών):

$$u_{\text{th}} := \sqrt[3]{\frac{2N_1}{A_1 \cdot \rho_{\text{in}}}} = 21.04 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Σύμφωνα με το βιβλίο: **Fan
handbook: selection,
application, and design** του
Frank P. Bleier για τον
συγκεκριμένο αξονικό φουσητήρα
με τον κινητήρα στην έξοδο του
αέρα υπάρχει ένα ποσοστό
απώλειας της ταχύτητας:

$$\xi := 43\%$$

Τελική ταχύτητα αέρα (m/s):

$$u_1 := (1 - \xi) \cdot u_{\text{th}}$$

$$u_1 = 11.993 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Παροχή όγκου (m^3/s):

$$V_1 := u_1 \cdot A_1$$

$$V_1 = 0.085 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Παροχή μάζας αέρα (kg/s):

$$m_1 := V_1 \cdot \rho_{in}$$

$$m_1 = 0.1009 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Επομένως μπορούμε να βρούμε τα χαρακτηριστικά του εισερχόμενου ρεύματος αέρα:

Η ειδική υγρασία που είναι ο λόγος της μάζας του υδρατμού προς την συνολική μάζα του υγρού αέρος σχετίζεται με τον λόγο υγρασίας από την σχέση:

$$q_1 := \frac{W_1}{W_1 + 1} = 0.009$$

Παροχή μάζας υδρατμού (kg/s):

$$m_{udrat} := m_1 \cdot q_1$$

$$m_{udrat} = 0.00091 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Παροχή μάζας ξηρού αέρα (kg/s):

$$m_{dry_air} := m_1 - m_{udrat}$$

$$m_{dry_air} = 0.10004 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Προσθέσαμε επίσης νερό 3lt (20°C) το οποίο καταναλώθηκε σε περίπου 5 ώρες:

Άρα βρίσκουμε την παροχή μάζας του νερού (kg/s):

$$m_{water} := \frac{3\text{kg}}{5\text{hr}} = 1.667 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

ORIGIN ≡ 1

ΠΑΝΩ ΠΛΕΥΡΑ (WORKING AIR)

Εμβαδόν επιφανείας καθενός από τα τμήματα που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο μέτρησης:

$$A_{w.a.} := 190\text{mm} \cdot 365 \cdot \text{mm} \cdot \frac{1}{112} = 6.192 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

Πλέγμα working air:

Αριθμός γραμμών: $L_{w.a.} := 14$

Αριθμός στηλών: $C_{w.a.} := 8$

Area_{w.a.} :=

A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}
A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}	A _{w.a.}

Εκτελώντας τις μετρήσεις ελήφθησαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα παρακάτω μητρώα:

$T_{w.a.} :=$	21.7	21.2	21.5	21.8	21.4	21.3	21.1	20.4	$RH_{w.a.} :=$	95	98	99	99	97	90	95	92
	21.1	20.9	21	21	20.6	20.8	20.8	20.2		97	98	97	99	97	96	92	96
	20.6	20.6	20.3	20.2	19.7	20	20.1	19.7		99	96	96	98	94	95	93	93
	20.2	19.7	19.4	19.8	19.2	19	19.8	19.3		98	95	94	97	93	95	95	93
	19.5	19.5	19.2	19.1	18.9	18.7	19	18.8		96	94	93	94	94	93	93	93
	19.4	19.3	19.2	18.9	18.5	18.5	18.7	18.7		94	94	94	93	92	93	92	94
	18.5	18.6	18.9	18.3	17.9	18	18.3	17.7		92	93	94	92	91	93	91	91
	18.2	18.3	18.7	18.1	18	17.9	17.8	17.5		92	94	92	93	92	92	91	90
	17.9	17.7	18	17.8	17.5	17.8	17.4	17.1		91	92	92	89	93	92	92	91
	17.7	17.4	17.9	17.6	17.9	17.7	17.2	16.6		91	90	92	88	94	92	90	91
	17.7	17.3	17.7	16.9	17.4	17.2	16.9	16.5		89	91	92	90	92	91	88	90
	17.6	17.1	17.4	16.8	17.1	16.8	16.3	16		89	90	91	90	91	91	92	90
	17.4	16.8	17.2	16.8	16.4	16.6	16	15.9		91	90	91	90	91	91	92	91
	16.6	16.6	16.6	17.7	16.4	16.1	15.9	16.6		90	89	90	89	91	92	92	93

$u_{w.a.} :=$	1.47	0.58	0.76	0.62	0.95	2.2	1.47	1.45	$\frac{m}{s}$
	0.47	0.35	0.82	0.4	0.92	0.74	1.82	0.68	
	0.31	0.98	0.33	0.55	0.72	1.1	0.75	0.66	
	0.25	0.57	0.43	0.84	0.5	0.55	0.42	0.64	
	0.18	0.32	0.58	0.25	0.89	0.66	0.44	0.5	
	0.44	0.37	0.34	0.21	0.58	0.63	0.55	0.65	
	0.66	0.36	0.31	0.34	0.88	0.89	0.58	0.37	
	0.42	0.32	0.3	0.55	0.87	0.84	0.56	0.52	
	0.88	0.45	0.73	0.35	0.45	0.35	0.67	0.79	
	0.32	0.63	0.32	0.88	0.52	0.49	0.9	0.58	
	0.76	0.88	0.33	0.22	0.82	0.54	0.63	0.57	
	0.6	0.88	0.92	0.5	0.47	0.53	0.55	0.93	
	0.42	0.78	0.42	0.66	0.67	0.9	0.82	1.41	
	0.87	0.92	0.71	0.25	0.32	0.69	0.51	1.11	

ΠΛΑΓΙΑ ΠΛΕΥΡΑ (PRODUCT AIR)

Εμβαδόν επιφανείας καθενός από τα τμήματα που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο μέτρησης:

$$A_{p.a.} := 90\text{mm} \cdot 190\text{mm} \cdot \frac{1}{32} = 5.344 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Πλέγμα product:

Αριθμός γραμμών: $L_{p.a.} := 4$

Αριθμός στηλών: $C_{p.a.} := 8$

$$\text{Area}_{p.a.} := \begin{pmatrix} A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \\ A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \\ A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \\ A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \end{pmatrix}$$

Εκτελώντας τις μετρήσεις ελήφθησαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα παρακάτω μητρώα:

$$T_{p.a.} := \begin{pmatrix} 16 & 15 & 15.8 & 15.4 & 16.2 & 15.6 & 16.1 & 16.5 \\ 15.8 & 14.7 & 14.4 & 14.9 & 15 & 14.8 & 15.1 & 15.4 \\ 14.9 & 14.1 & 14.3 & 14.5 & 14.9 & 14.3 & 14.4 & 14.7 \\ 13.8 & 13.6 & 13.5 & 13.9 & 13.9 & 13.9 & 14 & 14.3 \end{pmatrix}$$

$$RH_{p.a.} := \begin{pmatrix} 85 & 83 & 79 & 77 & 75 & 74 & 73 & 74 \\ 90 & 84 & 78 & 75 & 79 & 77 & 75 & 79 \\ 91 & 85 & 76 & 77 & 77 & 79 & 79 & 77 \\ 94 & 83 & 80 & 80 & 81 & 80 & 80 & 80 \end{pmatrix} \%$$

$$u_{p.a.} := \begin{pmatrix} 1.54 & 1.6 & 4.15 & 4.65 & 2.15 & 3.75 & 3.3 & 2.6 \\ 1.59 & 1.42 & 4.2 & 3.1 & 2.95 & 2.75 & 3.9 & 1.3 \\ 0.78 & 1.1 & 2.25 & 2.75 & 0.95 & 1.65 & 3.25 & 0.95 \\ 1.35 & 1.58 & 4.35 & 3 & 1.4 & 2.45 & 2.55 & 1.8 \end{pmatrix} \frac{m}{s}$$

Βάσει των ψυχομετρικών δεδομένων, λαμβάνονται μέσω του αρχείου αναφοράς, ο λόγος υγρασίας, η ειδική ενθαλπία και ο ειδικός όγκος κάθε τμήματος.

$$i := 1, 2.. 14 \quad j := 1, 2.. 8$$

Λόγος υγρασίας:

$$W_{w.a.,i,j} := W(RH_{w.a.,i,j}, T_{w.a.,i,j})$$

$$W_{w.a.} = \begin{pmatrix} 15.52 & 15.53 & 15.99 & 16.3 & 15.56 & 14.32 & 14.95 & 13.84 \\ 15.27 & 15.24 & 15.18 & 15.5 & 14.8 & 14.83 & 14.2 & 14.28 \\ 15.11 & 14.64 & 14.37 & 14.58 & 13.54 & 13.95 & 13.73 & 13.39 \\ 14.58 & 13.69 & 13.28 & 14.07 & 12.97 & 13.09 & 13.77 & 13.06 \\ 13.66 & 13.37 & 12.97 & 13.03 & 12.87 & 12.57 & 12.81 & 12.65 \\ 13.28 & 13.2 & 13.11 & 12.73 & 12.27 & 12.41 & 12.43 & 12.7 \\ 12.27 & 12.49 & 12.87 & 12.11 & 11.68 & 12.02 & 11.98 & 11.53 \\ 12.04 & 12.38 & 12.43 & 12.09 & 11.88 & 11.81 & 11.6 & 11.25 \\ 11.68 & 11.66 & 11.88 & 11.34 & 11.64 & 11.73 & 11.43 & 11.09 \\ 11.53 & 11.18 & 11.81 & 11.07 & 12.07 & 11.66 & 11.04 & 10.74 \\ 11.27 & 11.24 & 11.66 & 10.83 & 11.43 & 11.16 & 10.58 & 10.55 \\ 11.2 & 10.97 & 11.31 & 10.76 & 11.09 & 10.88 & 10.65 & 10.21 \\ 11.31 & 10.76 & 11.16 & 10.76 & 10.6 & 10.74 & 10.44 & 10.26 \\ 10.62 & 10.5 & 10.62 & 11.27 & 10.6 & 10.51 & 10.38 & 10.98 \end{pmatrix} \frac{gm}{kg}$$

Ειδική ενθαλπία:

$$H_{w.a.i,j} := h(RH_{w.a.i,j}, T_{w.a.i,j}) 1000 \frac{J}{kg}$$

$$H_{w.a.} = \begin{pmatrix} 61.1 & 60.6 & 62.1 & 63.2 & 60.9 & 57.7 & 59.1 & 55.5 \\ 59.9 & 59.6 & 59.5 & 60.3 & 58.2 & 58.4 & 56.8 & 56.4 \\ 59 & 57.8 & 56.8 & 57.2 & 54 & 55.4 & 54.9 & 53.7 \\ 57.2 & 54.4 & 53.1 & 55.5 & 52.1 & 52.2 & 54.7 & 52.4 \\ 54.1 & 53.4 & 52.1 & 52.1 & 51.5 & 50.6 & 51.5 & 50.9 \\ 53.1 & 52.8 & 52.5 & 51.2 & 49.6 & 49.9 & 50.2 & 50.9 \\ 49.6 & 50.2 & 51.5 & 49 & 47.5 & 48.4 & 48.7 & 46.9 \\ 48.7 & 49.7 & 50.2 & 48.7 & 48.1 & 47.8 & 47.2 & 46 \\ 47.5 & 47.2 & 48.1 & 46.5 & 47 & 47.5 & 46.4 & 45.2 \\ 46.9 & 45.7 & 47.8 & 45.6 & 48.5 & 47.2 & 45.1 & 43.8 \\ 46.2 & 45.7 & 47.2 & 44.3 & 46.4 & 45.5 & 43.7 & 43.2 \\ 46 & 44.9 & 46 & 44 & 45.2 & 44.3 & 43.2 & 41.8 \\ 46 & 44 & 45.5 & 44 & 43.2 & 43.8 & 42.4 & 41.9 \\ 43.5 & 43.2 & 43.5 & 46.2 & 43.2 & 42.7 & 42.2 & 44.4 \end{pmatrix} \cdot \frac{1000J}{kg}$$

Ειδικός όγκος:

$$v_{w.a.i,j} := v(RH_{w.a.i,j}, T_{w.a.i,j}) \frac{m^3}{kg}$$

$$v_{w.a.} = \begin{pmatrix} 0.843 & 0.842 & 0.843 & 0.844 & 0.842 & 0.842 & 0.841 & 0.839 \\ 0.841 & 0.841 & 0.841 & 0.841 & 0.84 & 0.84 & 0.84 & 0.838 \\ 0.84 & 0.84 & 0.839 & 0.839 & 0.837 & 0.838 & 0.838 & 0.837 \\ 0.839 & 0.837 & 0.836 & 0.837 & 0.835 & 0.834 & 0.837 & 0.835 \\ 0.836 & 0.836 & 0.835 & 0.835 & 0.834 & 0.833 & 0.834 & 0.834 \\ 0.836 & 0.835 & 0.835 & 0.834 & 0.833 & 0.833 & 0.833 & 0.833 \\ 0.833 & 0.833 & 0.834 & 0.832 & 0.831 & 0.831 & 0.832 & 0.83 \\ 0.832 & 0.832 & 0.833 & 0.831 & 0.831 & 0.831 & 0.83 & 0.829 \\ 0.831 & 0.83 & 0.831 & 0.83 & 0.829 & 0.83 & 0.829 & 0.828 \\ 0.83 & 0.829 & 0.831 & 0.829 & 0.831 & 0.83 & 0.828 & 0.826 \\ 0.83 & 0.829 & 0.83 & 0.827 & 0.829 & 0.828 & 0.827 & 0.826 \\ 0.829 & 0.828 & 0.829 & 0.827 & 0.828 & 0.827 & 0.825 & 0.824 \\ 0.829 & 0.827 & 0.828 & 0.827 & 0.826 & 0.826 & 0.825 & 0.824 \\ 0.826 & 0.826 & 0.826 & 0.83 & 0.826 & 0.825 & 0.824 & 0.826 \end{pmatrix} \frac{m^3}{kg}$$

x := 1, 2.. 4 y := 1, 2.. 8

Λόγος υγρασίας:

$$W_{p.a.x,y} := W(RH_{p.a.x,y}, T_{p.a.x,y})$$

$$W_{p.a.} = \begin{pmatrix} 9.64 & 8.81 & 8.83 & 8.38 & 8.6 & 8.16 & 8.31 & 8.65 \\ 10.08 & 8.75 & 7.96 & 7.9 & 8.38 & 8.06 & 8.01 & 8.61 \\ 9.61 & 8.51 & 7.7 & 7.91 & 8.12 & 8.01 & 8.06 & 8.01 \\ 9.24 & 8.04 & 7.7 & 7.9 & 8 & 7.9 & 7.95 & 8.11 \end{pmatrix} \frac{gm}{kg}$$

Ειδική ενθαλπία:

$$H_{p.a.,x,y} := h(RH_{p.a.,x,y}, T_{p.a.,x,y}) \cdot 1000 \frac{J}{kg}$$

$$H_{p.a.} = \begin{pmatrix} 40.4 & 37.3 & 38.1 & 36.6 & 38 & 36.2 & 37.1 & 38.4 \\ 41.3 & 36.8 & 34.5 & 34.9 & 36.2 & 35.2 & 35.3 & 37.2 \\ 39.2 & 35.6 & 33.8 & 34.5 & 35.4 & 34.5 & 34.8 & 34.9 \\ 37.1 & 33.9 & 32.9 & 33.9 & 34.1 & 33.9 & 34.1 & 34.8 \end{pmatrix} \cdot \frac{1000J}{kg}$$

Ειδικός όγκος:

$$v_{p.a.,x,y} := v(RH_{p.a.,x,y}, T_{p.a.,x,y}) \cdot \frac{m^3}{kg}$$

$$v_{p.a.} = \begin{pmatrix} 0.824 & 0.821 & 0.823 & 0.822 & 0.824 & 0.822 & 0.824 & 0.825 \\ 0.824 & 0.82 & 0.819 & 0.82 & 0.821 & 0.82 & 0.821 & 0.822 \\ 0.821 & 0.818 & 0.818 & 0.819 & 0.82 & 0.818 & 0.819 & 0.82 \\ 0.818 & 0.817 & 0.816 & 0.817 & 0.817 & 0.817 & 0.818 & 0.819 \end{pmatrix} \frac{m^3}{kg}$$

Εκτέλεση ισολογισμών μάζας και ενέργειας

Εκτελούνται τα παρακάτω ισοζύγια:

- *ισοζύγιο διακινούμενης μάζας νερού*

Εισερχόμενο
H₂O:

$$m_{w_in} := m_{water} + u_1 \cdot W_1 \cdot A_1 \cdot \rho_{in}$$

$$m_{w_in} = 1.087 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενο
H₂O (working):

$$m_{w_out_wor} := \sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} \left(u_{w.a.,i,j} \cdot W_{w.a.,i,j} \cdot \frac{Area_{w.a.,i,j}}{v_{w.a.,i,j}} \right)$$

$$m_{w_out_wor} = 6.746 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενο
H₂O (product):

$$m_{w_out_pro} := \sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} \left(u_{p.a.,x,y} \cdot W_{p.a.,x,y} \cdot \frac{Area_{p.a.,x,y}}{v_{p.a.,x,y}} \right)$$

$$m_{w_out_pro} = 4.155 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

Απόκλιση:

$$\Delta m_w := |m_{w_in} - m_{w_out_wor} - m_{w_out_pro}|$$

$$\Delta m_w = 3.12 \times 10^{-6} \frac{kg}{s}$$

$$\sigma m_w := \frac{\Delta m_w}{m_{w_in}}$$

$$\sigma m_w = 0.287\%$$

- *ισοζύγιο διακινούμενης μάζας ξηρού αέρα*

Εισερχόμενος
αέρας:

$$m_{a_in} := m_{dry_air}$$

$$m_{a_in} = 0.1 \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενος
αέρας (working):

$$m_{a_out_wor} := \sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} \left(u_{w.a.i,j} \cdot \frac{Area_{w.a.i,j}}{v_{w.a.i,j}} \right)$$

$$m_{a_out_wor} = 0.0539 \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενος
αέρας (product):

$$m_{a_out_pro} := \sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} \left(u_{p.a.x,y} \cdot \frac{Area_{p.a.x,y}}{v_{p.a.x,y}} \right)$$

$$m_{a_out_pro} = 0.0502 \frac{kg}{s}$$

Απόκλιση:

$$\Delta m_a := |m_{a_in} - m_{a_out_wor} - m_{a_out_pro}|$$

$$\Delta m_a = 4.15 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

$$\sigma m_a := \frac{\Delta m_a}{m_{a_in}}$$

$$\sigma m_a = 4.149\%$$

- *ισοζύγιο συναλλασσόμενης ενέργειας*

Εισερχόμενος
αέρας:

$$q_{in} := \left(H_{in} + \frac{40watt}{m_{a_in}} \right) \cdot m_{a_in}$$

$$q_{in} = 4598.6 W$$

Εξερχόμενος
αέρας (working):

$$q_{out_wor} := \left[\frac{\sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} \left(H_{w.a.i,j} \cdot Area_{w.a.i,j} \right)}{\sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} \left(Area_{w.a.i,j} \right)} \right] \cdot m_{a_out_wor}$$

$$q_{out_wor} = 2696.2 W$$

Εξερχόμενος
αέρας (product):

$$q_{out_pro} := \left[\frac{\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} \left(H_{p.a.x,y} \cdot Area_{p.a.x,y} \right)}{\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} \left(Area_{p.a.x,y} \right)} \right] \cdot m_{a_out_pro}$$

$$q_{out_pro} = 1807 W$$

Απόκλιση:

$$\Delta q := q_{in} - q_{out_wor} - q_{out_pro}$$

$$\Delta q = 95.4 \text{ W}$$

$$\sigma q := \frac{|\Delta q|}{q_{in}}$$

$$\sigma q = 2.074\%$$

ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΤΟ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟ ΧΑΡΤΗ

Μέση θερμοκρασία εξόδου (product stream):

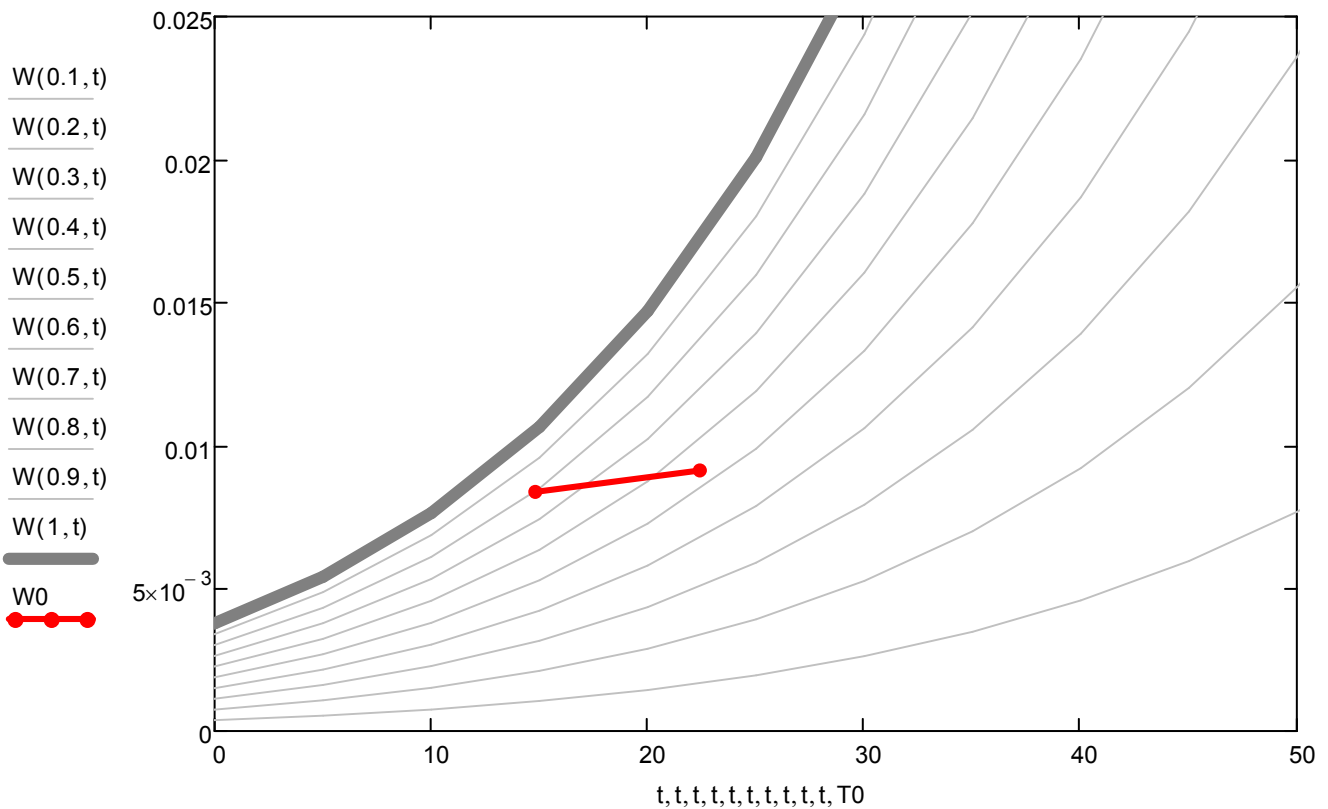
$$T_{p.mean} := \frac{\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} T_{p.a.x,y}}{L_{p.a.} \cdot C_{p.a.}} = 14.803$$

Μέση λόγος υγρασίας εξόδου (product stream):

$$W_{p.mean} := \frac{\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} W_{p.a.x,y}}{L_{p.a.} \cdot C_{p.a.}} = 8.372 \times 10^{-3}$$

$$W_0 := \begin{pmatrix} W_{in} \\ W_{p.mean} \end{pmatrix}$$

$$T_0 := \begin{pmatrix} T_{dbin} \\ T_{p.mean} \end{pmatrix}$$



ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ 900W

ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Διάμετρος της εισόδου προσαγωγής του αέρα (m): $d := 0.095\text{m}$

Οπότε η διατομή της (m^2): $A_1 := \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 7.088 \times 10^{-3} \text{m}^2$

Ο μέσος όρος της θερμοκρασίας ξηρής σφαίρας ($^{\circ}\text{C}$) στην προσαγωγή του αέρα προέκυψε:

$$T_{\text{dbin}} := 42.3$$

ενώ η σχετική υγρασία είναι:

$$\text{RH}_{\text{in}} := 20\%$$

Έτσι από το ψυχομετρικό χάρτη (υπάρχει στο Reference) βρίσκουμε:

$$H_1 := h(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{dbin}}) = 69.132$$

την ενθαλπία (kJ/kg):

$$H_{\text{in}} := 1000 \cdot H_1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 69132 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

τον λόγο υγρασίας ($\text{g}_{\text{νερού}}/\text{kg}_{\text{ξηρού αέρα}}$):

$$W_1 := W(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{dbin}}) = 0.0104$$

$$W_{\text{in}} := W_1 = 10.411 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{kg}}$$

την πυκνότητα (kg/m^3):

$$\rho_{\text{in}} := \rho(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{dbin}}) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.112 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Μηχανικός βαθμός απόδοσης
φουσητήρα:

$$\eta_m := 98\%$$

Ισχύς φουσητήρα (W):

$$N_1 := \eta_m \cdot 40\text{watt}$$

Ταχύτητα αέρα (m/s)
(Θεωρητική από τη Μηχανική
Ρευστών):

$$u_{\text{th}} := \sqrt[3]{\frac{2N_1}{A_1 \cdot \rho_{\text{in}}}} = 21.508 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Σύμφωνα με το βιβλίο: **Fan
handbook: selection,
application, and design** του
Frank P. Bleier για τον
συγκεκριμένο αξονικό φουσητήρα
με τον κινητήρα στην έξοδο του
αέρα υπάρχει ένα ποσοστό
απώλειας της ταχύτητας:

$$\xi := 43\%$$

Τελική ταχύτητα αέρα(m/s):

$$u_1 := (1 - \xi) \cdot u_{\text{th}}$$

$$u_1 = 12.259 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Παροχή όγκου (m^3/s):

$$V_1 := u_1 \cdot A_1$$

$$V_1 = 0.0869 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Παροχή μάζας αέρα (kg/s):

$$m_1 := V_1 \cdot \rho_{in}$$

$$m_1 = 0.0966 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Επομένως μπορούμε να βρούμε τα χαρακτηριστικά του εισερχόμενου ρεύματος αέρα:

Η ειδική υγρασία που είναι ο λόγος της μάζας του υδρατμού προς την συνολική μάζα του υγρού αέρος σχετίζεται με τον λόγο υγρασίας από την σχέση:

$$q_1 := \frac{W_1}{W_1 + 1} = 0.0103$$

Παροχή μάζας υδρατμού (kg/s):

$$m_{udrat} := m_1 \cdot q_1$$

$$m_{udrat} = 0.001 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Παροχή μάζας ξηρού αέρα (kg/s):

$$m_{dry_air} := m_1 - m_{udrat}$$

$$m_{dry_air} = 0.09561 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Προσθέσαμε επίσης νερό 7lt (20°C) το οποίο καταναλώθηκε σε περίπου 5 ώρες:

Άρα βρίσκουμε την παροχή μάζας του νερού (kg/s):

$$m_{water} := \frac{7\text{kg}}{5\text{hr}} = 3.889 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

ORIGIN = 1

ΠΑΝΩ ΠΛΕΥΡΑ (WORKING AIR)

Εμβαδόν επιφανείας καθενός από τα τμήματα που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο μέτρησης:

$$A_{w.a.} := 190\text{mm} \cdot 365 \cdot \text{mm} \cdot \frac{1}{112} = 6.192 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

Πλέγμα working air:

Αριθμός γραμμών: $L_{w.a.} := 14$

Αριθμός στηλών: $C_{w.a.} := 8$

$$\text{Area}_{w.a.} := \begin{pmatrix} A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \end{pmatrix}$$

Εκτελώντας τις μετρήσεις ελήφθησαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα παρακάτω μητρώα:

$$T_{w.a.} := \begin{pmatrix} 36.3 & 37.6 & 38.7 & 38.2 & 37.2 & 38.9 & 40.3 & 39.2 \\ 34.5 & 34.7 & 35.6 & 36.1 & 36 & 37 & 37.5 & 36 \\ 33.2 & 33.4 & 32.6 & 33.2 & 33.8 & 34.1 & 33.5 & 33.4 \\ 32.1 & 31.7 & 29.7 & 30.3 & 31.2 & 31.5 & 32.9 & 32.4 \\ 30 & 28.9 & 27.8 & 28.4 & 30.6 & 29.2 & 30.8 & 30.7 \\ 27.2 & 27.3 & 27 & 27.1 & 29.2 & 28.5 & 29.4 & 30.3 \\ 27.1 & 25.4 & 25.9 & 26.5 & 27.2 & 27.5 & 28.4 & 29.7 \\ 25.8 & 24.8 & 24 & 25.1 & 25.6 & 25.3 & 26.8 & 30 \\ 25.5 & 24.5 & 23.7 & 23.7 & 24.7 & 24.8 & 25.5 & 27.4 \\ 25.3 & 23.8 & 23.4 & 22.8 & 23.9 & 24.2 & 25.4 & 26.2 \\ 24.2 & 23.1 & 23.3 & 22.9 & 22.8 & 23.5 & 23.9 & 23.2 \\ 23.8 & 21.4 & 22.8 & 22.4 & 22.2 & 22.9 & 23.7 & 22.3 \\ 23.2 & 23 & 22.3 & 21.8 & 22.1 & 22.2 & 21.9 & 21.3 \\ 22.5 & 22.6 & 21.2 & 21.4 & 21.7 & 21.8 & 21.4 & 21.9 \end{pmatrix}$$

$$RH_{w.a.} := \begin{pmatrix} 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 99 & 99 & 99 & 100 & 99 & 100 \\ 98 & 100 & 97 & 98 & 96 & 99 & 99 & 97 \\ 98 & 99 & 97 & 97 & 98 & 98 & 97 & 98 \\ 96 & 95 & 97 & 95 & 97 & 96 & 95 & 97 \\ 94 & 95 & 92 & 93 & 91 & 92 & 94 & 93 \\ 93 & 94 & 94 & 91 & 92 & 93 & 92 & 90 \\ 91 & 90 & 86 & 87 & 89 & 87 & 86 & 88 \\ 84 & 83 & 85 & 86 & 87 & 84 & 85 & 86 \\ 81 & 84 & 82 & 83 & 82 & 81 & 80 & 81 \\ 78 & 79 & 77 & 78 & 77 & 79 & 80 & 78 \\ 77 & 78 & 80 & 79 & 78 & 76 & 76 & 77 \\ 75 & 77 & 74 & 72 & 76 & 75 & 73 & 74 \end{pmatrix} \%$$

$$u_{w.a.} := \begin{pmatrix} 1 & 0.8 & 0.71 & 0.55 & 1.25 & 0.57 & 0.98 & 0.62 \\ 1.7 & 0.47 & 0.73 & 0.51 & 0.72 & 0.55 & 0.45 & 0.52 \\ 0.52 & 1.18 & 0.85 & 0.38 & 0.85 & 0.75 & 0.84 & 0.54 \\ 0.53 & 0.92 & 0.67 & 0.58 & 0.73 & 0.62 & 1.47 & 0.22 \\ 0.25 & 0.42 & 0.35 & 0.44 & 1.56 & 0.32 & 0.58 & 0.15 \\ 0.32 & 0.48 & 0.27 & 0.37 & 0.52 & 0.34 & 0.28 & 0.15 \\ 0.16 & 0.22 & 0.5 & 0.76 & 0.67 & 0.65 & 0.78 & 0.12 \\ 0.28 & 0.85 & 0.4 & 0.43 & 0.93 & 0.38 & 0.75 & 0.28 \\ 0.4 & 0.65 & 0.55 & 0.35 & 0.95 & 0.45 & 0.81 & 0.29 \\ 0.85 & 1.28 & 0.82 & 0.85 & 0.78 & 0.56 & 0.72 & 0.18 \\ 0.3 & 0.25 & 0.54 & 0.63 & 1.14 & 0.48 & 0.68 & 0.6 \\ 0.28 & 0.46 & 0.65 & 0.38 & 0.68 & 0.62 & 0.77 & 0.5 \\ 0.22 & 0.7 & 0.61 & 0.58 & 0.55 & 0.78 & 1.02 & 0.45 \\ 0.2 & 0.56 & 0.8 & 0.45 & 0.62 & 0.41 & 0.34 & 0.35 \end{pmatrix} \frac{m}{s}$$

ΠΛΑΓΙΑ ΠΛΕΥΡΑ (PRODUCT AIR)

Εμβαδόν επιφανείας καθενός από τα τμήματα που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο μέτρησης:

$$A_{p.a.} := 90\text{mm} \cdot 190\text{mm} \cdot \frac{1}{32} = 5.344 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Πλέγμα product:

Αριθμός γραμμών: $L_{p.a.} := 4$

Αριθμός στηλών: $C_{p.a.} := 8$

$$\text{Area}_{p.a.} := \begin{pmatrix} A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \\ A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \\ A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \\ A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \end{pmatrix}$$

Εκτελώντας τις μετρήσεις ελήφθησαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα παρακάτω μητρώα:

$$T_{p.a.} := \begin{pmatrix} 18.5 & 19.6 & 20.2 & 21.3 & 20.9 & 22.8 & 22.5 & 22.7 \\ 17.2 & 17 & 17.7 & 17.9 & 18.9 & 19.8 & 20.5 & 19.4 \\ 16.5 & 16.7 & 16.6 & 16.8 & 17 & 18.4 & 19.5 & 18.6 \\ 16.2 & 16.4 & 16.1 & 16.7 & 16.3 & 17.1 & 17.9 & 17.2 \end{pmatrix}$$

$$RH_{p.a.} := \begin{pmatrix} 45 & 43 & 48 & 49 & 47 & 46 & 48 & 49 \\ 51 & 52 & 55 & 57 & 55 & 53 & 54 & 56 \\ 54 & 57 & 56 & 54 & 58 & 55 & 57 & 54 \\ 58 & 59 & 59 & 61 & 62 & 61 & 62 & 60 \end{pmatrix} \%$$

$$u_{p.a.} := \begin{pmatrix} 1.52 & 2.42 & 1.55 & 3.7 & 3.4 & 3.25 & 2.45 & 3.85 \\ 0.95 & 2.18 & 2.84 & 3.12 & 3.25 & 2.65 & 1.75 & 1.33 \\ 1.32 & 3.32 & 3.85 & 2.18 & 2.25 & 1.25 & 1.86 & 1.82 \\ 1.58 & 2.75 & 2.42 & 2.25 & 1.35 & 2.65 & 1.97 & 2.06 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Βάσει των ψυχομετρικών δεδομένων, λαμβάνονται μέσω του αρχείου αναφοράς, ο λόγος υγρασίας, η ειδική ενθαλπία και ο ειδικός όγκος κάθε τμήματος.

$$i := 1, 2.. 14 \quad j := 1, 2.. 8$$

Λόγος υγρασίας:

$$W_{w.a.,i,j} := W(RH_{w.a.,i,j}, T_{w.a.,i,j})$$

$W_{w.a.} =$	39.47	42.57	45.37	44.08	41.59	45.9	49.75	46.7	$\frac{gm}{kg}$
	35.53	35.95	37.89	39.02	38.79	41.11	42.33	38.79	
	32.91	33.3	31.43	32.57	33.74	34.71	33.15	33.3	
	30.19	30.12	25.89	27.13	28.01	29.45	32	30.41	
	26.64	25.21	23.09	23.94	27.62	25.4	27.65	27.78	
	22.03	21.92	22	21.66	25.13	23.83	24.88	26.84	
	21.42	19.53	19.48	20.43	20.84	21.47	23.18	24.78	
	19.58	18.62	17.72	18.34	19.12	18.99	20.57	24.38	
	18.79	17.48	15.88	16.07	17.49	17.19	17.73	20.38	
	17.1	15.4	15.4	15.02	16.26	15.98	17.41	18.5	
	15.4	14.93	14.75	14.57	14.3	14.75	14.92	14.48	
	14.45	12.62	13.41	13.26	12.92	13.85	14.74	13.17	
	13.75	13.76	13.52	12.94	13.01	12.75	12.51	12.22	
	12.81	13.24	11.66	11.48	12.36	12.27	11.64	12.18	

Ειδική ενθαλπία:

$$H_{w.a.i,j} := h(RH_{w.a.i,j}, T_{w.a.i,j}) 1000 \frac{J}{kg}$$

$H_{w.a.} =$	137.6	147	155.3	151.5	144	156.9	168.3	159.3	$\frac{1000J}{kg}$
	125.6	126.9	132.8	136.2	135.5	142.6	146.2	135.5	
	117.5	118.7	113.1	116.6	120.2	123	118.4	118.7	
	109.4	108.7	95.8	99.6	102.8	106.8	114.8	110.2	
	98.1	93.3	86.7	89.5	101.2	94.1	101.5	101.7	
	83.4	83.2	83.1	82.3	93.4	89.3	93	98.9	
	81.7	75.1	75.5	78.6	80.4	82.3	87.6	93	
	75.7	72.2	69.1	71.8	74.3	73.6	79.3	92.3	
	73.4	69	64.1	64.6	69.2	68.6	70.7	79.4	
	68.8	63	62.6	61	65.3	64.9	69.7	73.4	
	63.4	61.1	60.8	59.9	59.2	61	61.9	60	
	60.6	53.4	56.9	56.1	55	58.1	61.2	55.8	
	58.2	58	56.7	54.7	55.2	54.6	53.7	52.3	
	55.1	56.3	50.8	50.6	53.1	53	51	52.8	

Ειδικός όγκος:

$$v_{w.a.i,j} := v(RH_{w.a.i,j}, T_{w.a.i,j}) \frac{m^3}{kg}$$

$$v_{w.a.} = \begin{pmatrix} 0.897 & 0.902 & 0.907 & 0.905 & 0.901 & 0.908 & 0.914 & 0.909 \\ 0.89 & 0.891 & 0.894 & 0.896 & 0.896 & 0.9 & 0.902 & 0.896 \\ 0.885 & 0.886 & 0.882 & 0.885 & 0.887 & 0.888 & 0.886 & 0.886 \\ 0.88 & 0.879 & 0.871 & 0.874 & 0.877 & 0.878 & 0.884 & 0.881 \\ 0.873 & 0.869 & 0.864 & 0.867 & 0.875 & 0.87 & 0.875 & 0.875 \\ 0.862 & 0.862 & 0.862 & 0.862 & 0.87 & 0.867 & 0.87 & 0.874 \\ 0.862 & 0.856 & 0.857 & 0.859 & 0.862 & 0.863 & 0.866 & 0.871 \\ 0.857 & 0.854 & 0.851 & 0.854 & 0.856 & 0.855 & 0.86 & 0.871 \\ 0.856 & 0.852 & 0.849 & 0.849 & 0.853 & 0.853 & 0.855 & 0.862 \\ 0.854 & 0.849 & 0.848 & 0.846 & 0.85 & 0.851 & 0.855 & 0.858 \\ 0.85 & 0.847 & 0.847 & 0.846 & 0.846 & 0.848 & 0.849 & 0.847 \\ 0.849 & 0.841 & 0.845 & 0.844 & 0.843 & 0.846 & 0.849 & 0.844 \\ 0.847 & 0.846 & 0.844 & 0.842 & 0.843 & 0.843 & 0.842 & 0.841 \\ 0.844 & 0.845 & 0.84 & 0.84 & 0.842 & 0.842 & 0.841 & 0.842 \end{pmatrix} \frac{m^3}{kg}$$

$$x := 1, 2.. 4 \quad y := 1, 2.. 8$$

Λόγος υγρασίας:

$$W_{p.a.x,y} := W(RH_{p.a.x,y}, T_{p.a.x,y})$$

$$W_{p.a.} = \begin{pmatrix} 5.94 & 6.08 & 7.06 & 7.72 & 7.22 & 7.94 & 8.14 & 8.42 \\ 6.21 & 6.25 & 6.92 & 7.26 & 7.46 & 7.61 & 8.1 & 7.85 \\ 6.29 & 6.73 & 6.56 & 6.41 & 6.98 & 7.23 & 8.04 & 7.19 \\ 6.63 & 6.83 & 6.7 & 7.2 & 7.14 & 7.39 & 7.91 & 7.32 \end{pmatrix} \frac{gm}{kg}$$

Ειδική ενθαλπία:

$$H_{p.a.x,y} := h(RH_{p.a.x,y}, T_{p.a.x,y}) 1000 \frac{J}{kg}$$

$$H_{p.a.} = \begin{pmatrix} 33.6 & 35 & 38.1 & 40.9 & 39.2 & 43 & 43.2 & 44.1 \\ 32.9 & 32.8 & 35.2 & 36.3 & 37.8 & 39.1 & 41.1 & 39.3 \\ 32.4 & 33.7 & 33.2 & 33 & 34.7 & 36.7 & 39.9 & 36.8 \\ 33 & 33.7 & 33.1 & 34.9 & 34.4 & 35.8 & 37.9 & 35.7 \end{pmatrix} \frac{1000J}{kg}$$

Ειδικός όγκος:

$$v_{p.a.x,y} := v(RH_{p.a.x,y}, T_{p.a.x,y}) \frac{m^3}{kg}$$

$$v_{p.a.} = \begin{pmatrix} 0.829 & 0.833 & 0.835 & 0.838 & 0.837 & 0.843 & 0.842 & 0.843 \\ 0.826 & 0.825 & 0.828 & 0.828 & 0.831 & 0.834 & 0.836 & 0.833 \\ 0.824 & 0.825 & 0.824 & 0.825 & 0.826 & 0.83 & 0.833 & 0.83 \\ 0.823 & 0.824 & 0.823 & 0.825 & 0.824 & 0.826 & 0.829 & 0.826 \end{pmatrix} \frac{m^3}{kg}$$

Εκτέλεση ισολογισμών μάζας και ενέργειας

Εκτελούνται τα παρακάτω ισοζύγια:

- *ισοζύγιο διακινούμενης μάζας νερού*

Εισερχόμενο
H₂O:

$$m_{w_in} := m_{water} + u_1 \cdot W_1 \cdot A_1 \cdot \rho_{in}$$

$$m_{w_in} = 1.395 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενο
H₂O (working):

$$m_{w_out_wor} := \sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} \left(u_{w.a.i,j} \cdot W_{w.a.i,j} \cdot \frac{Area_{w.a.i,j}}{v_{w.a.i,j}} \right)$$

$$m_{w_out_wor} = 1.141 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενο
H₂O (product):

$$m_{w_out_pro} := \sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} \left(u_{p.a.x,y} \cdot W_{p.a.x,y} \cdot \frac{Area_{p.a.x,y}}{v_{p.a.x,y}} \right)$$

$$m_{w_out_pro} = 3.479 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

Απόκλιση:

$$\Delta m_w := |m_{w_in} - m_{w_out_wor} - m_{w_out_pro}|$$

$$\Delta m_w = 9.461 \times 10^{-5} \frac{kg}{s}$$

$$\sigma m_w := \frac{\Delta m_w}{m_{w_in}}$$

$$\sigma m_w = 6.784\%$$

- *ισοζύγιο διακινούμενης μάζας ξηρού αέρα*

Εισερχόμενος
αέρας:

$$m_{a_in} := m_{dry_air}$$

$$m_{a_in} = 0.0956 \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενος
αέρας (working):

$$m_{a_out_wor} := \sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} \left(u_{w.a.i,j} \cdot \frac{Area_{w.a.i,j}}{v_{w.a.i,j}} \right)$$

$$m_{a_out_wor} = 0.0478 \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενος
αέρας (product):

$$m_{a_out_pro} := \sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} \left(u_{p.a.x,y} \cdot \frac{Area_{p.a.x,y}}{v_{p.a.x,y}} \right)$$

$$m_{a_out_pro} = 0.0483 \frac{kg}{s}$$

Απόκλιση:

$$\Delta m_a := |m_{a_in} - m_{a_out_wor} - m_{a_out_pro}|$$

$$\Delta m_a = 4.826 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$\sigma m_a := \frac{\Delta m_a}{m_{a_in}}$$

$$\sigma m_a = 0.505\%$$

- **ισοζύγιο συναλλασσόμενης ενέργειας**

Εισερχόμενος
αέρας:

$$q_{in} := \left(H_{in} + \frac{40\text{watt}}{m_{a_in}} \right) \cdot m_{a_in}$$

$$q_{in} = \blacksquare$$

Εξερχόμενος
αέρας (working):

$$q_{out_wor} := \left[\sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} \frac{(H_{w.a.,i,j} \cdot Area_{w.a.,i,j})}{\sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} (Area_{w.a.,i,j})} \right] \cdot m_{a_out_wor}$$

$$q_{out_wor} = 4150.1 \text{ W}$$

Εξερχόμενος
αέρας (product):

$$q_{out_pro} := \left[\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} \frac{(H_{p.a.,x,y} \cdot Area_{p.a.,x,y})}{\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} (Area_{p.a.,x,y})} \right] \cdot m_{a_out_pro}$$

$$q_{out_pro} = 1767.4 \text{ W}$$

Απόκλιση:

$$\Delta q := q_{in} - q_{out_wor} - q_{out_pro}$$

$$\Delta q = 732.3 \text{ W}$$

$$\sigma q := \frac{|\Delta q|}{q_{in}}$$

$$\sigma q = 11.013 \cdot \%$$

ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΤΟ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟ ΧΑΡΤΗ

Μέση θερμοκρασία εξόδου (product stream):

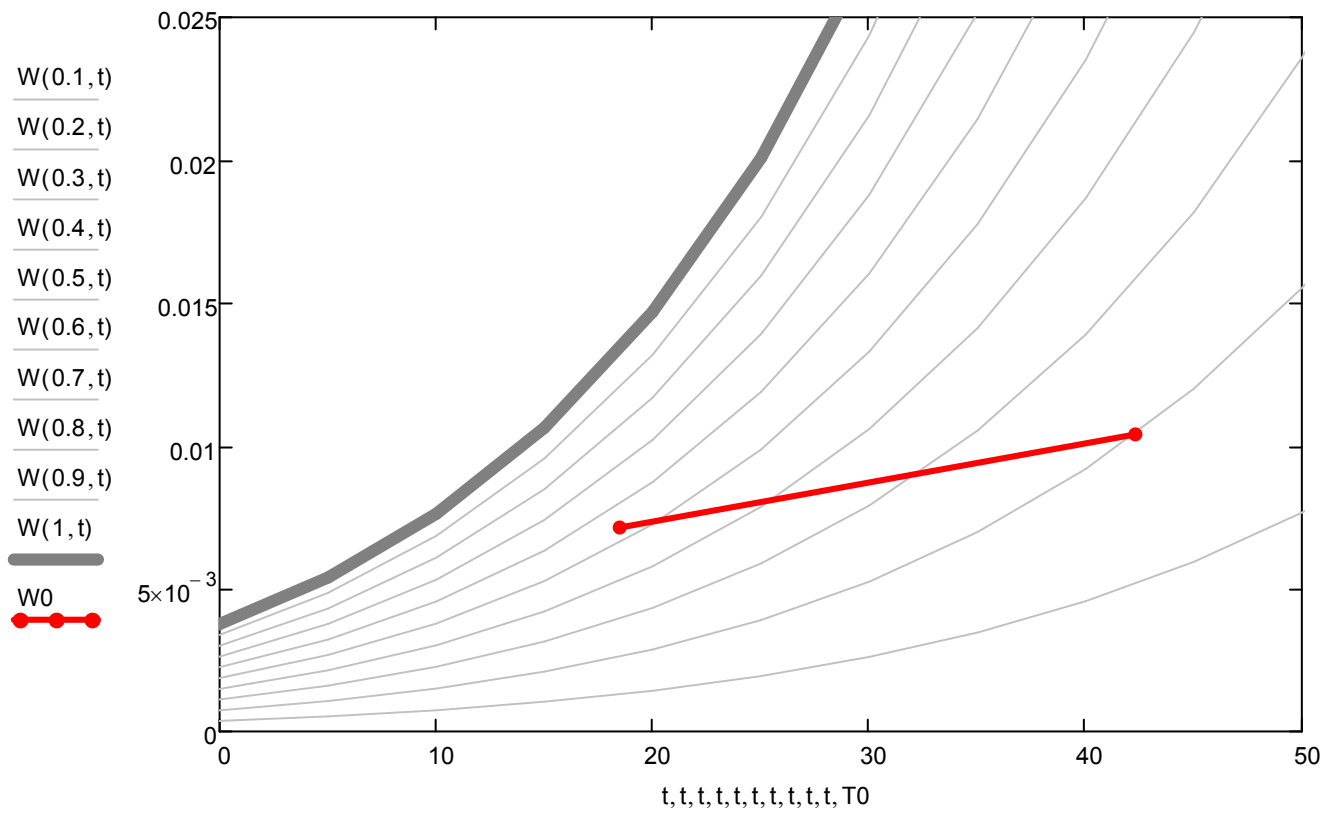
$$T_{p.mean} := \frac{\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} T_{p.a.,x,y}}{L_{p.a.} \cdot C_{p.a.}} = 18.466$$

Μέση λόγος υγρασίας εξόδου (product stream):

$$W_{p.mean} := \frac{\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} W_{p.a.,x,y}}{L_{p.a.} \cdot C_{p.a.}} = 7.147 \times 10^{-3}$$

$$W0 := \begin{pmatrix} W_{in} \\ W_{p.mean} \end{pmatrix}$$

$$T0 := \begin{pmatrix} T_{dbin} \\ T_{p.mean} \end{pmatrix}$$



ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ 1800W

ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Διάμετρος της εισόδου προσαγωγής του αέρα (m): $d := 0.095\text{m}$

Οπότε η διατομή της (m^2):

$$A_1 := \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 7.088 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$Z := 15$$

Ο μέσος όρος της θερμοκρασίας ξηρής σφαίρας ($^{\circ}\text{C}$) στην προσαγωγή του αέρα προέκυψε:

$$X := Z$$

$$Y := Z$$

$$T_{\text{dbin}} := 52.4 \left(1 - \frac{X}{100} \right)$$

ενώ η σχετική υγρασία είναι:

$$\text{RH}_{\text{in}} := 18 \left(1 - \frac{Y}{100} \right) \%$$

Έτσι από το ψυχομετρικό χάρτη (υπάρχει στο Reference) βρίσκουμε:

$$H_1 := h(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{dbin}}) = 67.585$$

την ενθαλπία (kJ/kg):

$$H_{\text{in}} := 1000 \cdot H_1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 67585 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

τον λόγο υγρασίας ($\text{g}_{\text{νερού}}/\text{kg}_{\text{ξηρού αέρα}}$):

$$W_1 := W(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{dbin}}) = 0.0089$$

$$W_{\text{in}} := W_1 = 8.927 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{kg}}$$

την πυκνότητα (kg/m^3):

$$\rho_{\text{in}} := \rho(\text{RH}_{\text{in}}, T_{\text{dbin}}) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.105 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Μηχανικός βαθμός απόδοσης
φουσητήρα:

$$\eta_m := 98\%$$

Ισχύς φουσητήρα (W):

$$N_1 := \eta_m \cdot 40\text{watt}$$

Ταχύτητα αέρα (m/s)
(Θεωρητική από τη Μηχανική
Ρευστών):

$$u_{\text{th}} := \sqrt[3]{\frac{2N_1}{A_1 \cdot \rho_{\text{in}}}} = 21.552 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Σύμφωνα με το βιβλίο: **Fan handbook: selection, application, and design** του **Frank P. Bleier** για τον συγκεκριμένο αξονικό φουσητήρα με τον κινητήρα στην έξοδο του αέρα υπάρχει ένα ποσοστό απώλειας της ταχύτητας:

$$\xi := 43\%$$

Τελική ταχύτητα αέρα (m/s):

$$u_1 := (1 - \xi) \cdot u_{\text{th}}$$

$$u_1 = 12.285 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Παροχή όγκου (m^3/s):

$$V_1 := u_1 \cdot A_1$$

$$V_1 = 0.0871 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Παροχή μάζας αέρα (kg/s):

$$m_1 := V_1 \cdot \rho_{in}$$

$$m_1 = 0.0962 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Επομένως μπορούμε να βρούμε τα χαρακτηριστικά του εισερχόμενου ρεύματος αέρα:

Η ειδική υγρασία που είναι ο λόγος της μάζας του υδρατμού προς την συνολική μάζα του υγρού αέρος σχετίζεται με τον λόγο υγρασίας από την σχέση:

$$q_1 := \frac{W_1}{W_1 + 1} = 0.0088$$

Παροχή μάζας υδρατμού (kg/s):

$$m_{udrat} := m_1 \cdot q_1$$

$$m_{udrat} = 0.00085 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Παροχή μάζας ξηρού αέρα (kg/s):

$$m_{dry_air} := m_1 - m_{udrat}$$

$$m_{dry_air} = 0.09536 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Προσθέσαμε επίσης νερό 12lt (20°C) το οποίο καταναλώθηκε σε περίπου 5 ώρες:

Άρα βρίσκουμε την παροχή μάζας του νερού (kg/s):

$$m_{water} := \frac{12\text{kg}}{5\text{hr}} = 6.667 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

ORIGIN = 1

ΠΑΝΩ ΠΛΕΥΡΑ (WORKING AIR)

Εμβαδόν επιφανείας καθενός από τα τμήματα που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο μέτρησης:

$$A_{w.a.} := 190\text{mm} \cdot 365 \cdot \text{mm} \cdot \frac{1}{112} = 6.192 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

Πλέγμα working air:

Αριθμός γραμμών: $L_{w.a.} := 14$

Αριθμός στηλών: $C_{w.a.} := 8$

$$\text{Area}_{w.a.} := \begin{pmatrix} A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \\ A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} & A_{w.a.} \end{pmatrix}$$

Εκτελώντας τις μετρήσεις ελήφθησαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα παρακάτω μητρώα:

$$T_{w.a.} := \begin{pmatrix} 49.9 & 50.3 & 50.8 & 49.2 & 51.2 & 50.3 & 49.1 & 47.2 \\ 42.3 & 43.6 & 44.4 & 46.5 & 49.8 & 47.9 & 47.2 & 46.8 \\ 41.7 & 42.1 & 42.4 & 43.6 & 47.3 & 46.1 & 45.4 & 42.7 \\ 37.3 & 40 & 40.5 & 40.2 & 43.6 & 44.2 & 42.3 & 38.1 \\ 34.8 & 36.8 & 41.3 & 39.8 & 41.9 & 42.5 & 41.6 & 35.7 \\ 31.7 & 33.5 & 37.3 & 38.6 & 40.5 & 41.3 & 39.2 & 34.5 \\ 30.2 & 32.3 & 36.5 & 37.9 & 39.2 & 39.8 & 37.1 & 31.2 \\ 27.2 & 30.1 & 33.9 & 37.2 & 38.6 & 38.4 & 35.8 & 29.6 \\ 26.5 & 29.6 & 34.1 & 35.7 & 37.1 & 37.5 & 34.4 & 28.2 \\ 24.6 & 27.8 & 32.9 & 34.1 & 35.9 & 36.2 & 33.9 & 27 \\ 24.3 & 28.1 & 29.1 & 32.5 & 33.8 & 34.6 & 31.5 & 25.9 \\ 22.7 & 26.2 & 28.9 & 30.2 & 32.5 & 33.1 & 30.2 & 24.8 \\ 21.1 & 24.6 & 26.7 & 28.3 & 31.2 & 29.5 & 28.3 & 22.2 \\ 20.4 & 24 & 23.4 & 25 & 28.1 & 26.5 & 25.9 & 22.8 \end{pmatrix}$$

$$RH_{w.a.} := \begin{pmatrix} 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 99 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 100 & 99 & 99 & 100 \\ 97 & 98 & 99 & 100 & 100 & 100 & 98 & 100 \\ 98 & 99 & 100 & 100 & 100 & 99 & 100 & 99 \\ 98 & 97 & 100 & 100 & 100 & 100 & 99 & 98 \\ 95 & 96 & 99 & 100 & 99 & 97 & 98 & 92 \\ 93 & 95 & 97 & 100 & 100 & 98 & 97 & 89 \\ 87 & 88 & 96 & 98 & 99 & 96 & 97 & 85 \\ 84 & 86 & 92 & 97 & 98 & 92 & 98 & 82 \\ 82 & 84 & 90 & 95 & 92 & 95 & 99 & 81 \\ 84 & 82 & 88 & 91 & 88 & 93 & 87 & 83 \end{pmatrix} \%$$

$$u_{w.a.} := \begin{pmatrix} 1.45 & 1.25 & 0.85 & 0.42 & 0.32 & 0.39 & 0.52 & 0.05 \\ 0.88 & 1.08 & 0.55 & 0.3 & 0.45 & 1.05 & 0.17 & 0.04 \\ 0.42 & 1.15 & 0.36 & 0.33 & 0.68 & 0.95 & 0.25 & 0.03 \\ 0.52 & 1.25 & 0.48 & 0.36 & 1.12 & 0.83 & 0.43 & 0.08 \\ 0.48 & 1.12 & 0.69 & 0.44 & 1.15 & 1.25 & 0.41 & 0.12 \\ 0.33 & 0.39 & 0.22 & 0.17 & 0.66 & 0.52 & 0.52 & 0.03 \\ 0.28 & 0.45 & 0.56 & 0.63 & 0.55 & 0.46 & 0.17 & 0.04 \\ 0.43 & 0.81 & 0.69 & 0.38 & 0.25 & 0.86 & 0.75 & 0.06 \\ 0.33 & 1.22 & 0.42 & 0.27 & 0.15 & 1.25 & 0.55 & 0.12 \\ 0.18 & 0.35 & 0.84 & 1.65 & 0.95 & 0.38 & 1.12 & 0.25 \\ 0.21 & 1.15 & 0.31 & 0.35 & 0.45 & 1.2 & 0.69 & 0.33 \\ 0.32 & 0.78 & 1.41 & 0.88 & 0.72 & 0.81 & 0.75 & 0.3 \\ 0.15 & 0.88 & 1.05 & 0.92 & 0.85 & 0.38 & 0.56 & 0.27 \\ 0.14 & 0.95 & 0.45 & 0.42 & 0.96 & 0.79 & 0.61 & 0.22 \end{pmatrix} \frac{m}{s}$$

ΠΛΑΓΙΑ ΠΛΕΥΡΑ (PRODUCT AIR)

Εμβαδόν επιφανείας καθενός από τα τμήματα που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο μέτρησης:

$$A_{p.a.} := 90\text{mm} \cdot 190\text{mm} \cdot \frac{1}{32} = 5.344 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Πλέγμα product:

Αριθμός γραμμών: $L_{p.a.} := 4$

Αριθμός στηλών: $C_{p.a.} := 8$

$$\text{Area}_{p.a.} := \begin{pmatrix} A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \\ A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \\ A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \\ A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} & A_{p.a.} \end{pmatrix}$$

Εκτελώντας τις μετρήσεις ελήφθησαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα παρακάτω μητρώα:

$$T_{p.a.} := \begin{pmatrix} 20.7 & 21.7 & 23.8 & 24.9 & 24.6 & 25.1 & 23.7 & 24.4 \\ 18.4 & 18.6 & 19.2 & 20.3 & 20.4 & 20.7 & 20.6 & 20.5 \\ 17.6 & 18.1 & 18.9 & 19.1 & 18.9 & 18.7 & 18.4 & 19.3 \\ 15.8 & 15.9 & 17.5 & 16.6 & 16.8 & 16.8 & 18.1 & 18.1 \end{pmatrix}$$

$$RH_{p.a.} := \begin{pmatrix} 45 & 52 & 52 & 51 & 50 & 46 & 52 & 49 \\ 53 & 61 & 65 & 61 & 63 & 61 & 60 & 60 \\ 60 & 65 & 64 & 69 & 68 & 70 & 70 & 62 \\ 67 & 68 & 68 & 71 & 72 & 72 & 69 & 68 \end{pmatrix} \%$$

$$u_{p.a.} := \begin{pmatrix} 1.74 & 3.65 & 2.45 & 2.31 & 4.54 & 3.72 & 2.15 & 3.45 \\ 0.83 & 3.45 & 3.15 & 2.05 & 2.12 & 1.48 & 2.08 & 2.85 \\ 0.82 & 2.57 & 1.97 & 1.41 & 1.57 & 1.96 & 2.22 & 2.65 \\ 1.77 & 2.32 & 1.85 & 1.13 & 1.44 & 2.55 & 2.52 & 2.93 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Βάσει των ψυχομετρικών δεδομένων, λαμβάνονται μέσω του αρχείου αναφοράς, ο λόγος υγρασίας, η ειδική ενθαλπία και ο ειδικός όγκος κάθε τμήματος.

$$i := 1, 2.. 14 \quad j := 1, 2.. 8$$

Λόγος υγρασίας:

$$W_{w.a.,i,j} := W(RH_{w.a.,i,j}, T_{w.a.,i,j})$$

$$W_{w.a.} = \begin{pmatrix} 85.87 & 87.83 & 90.35 & 82.54 & 92.42 & 87.83 & 82.07 & 73.71 \\ 55.79 & 60.08 & 62.88 & 70.84 & 85.39 & 76.69 & 73.71 & 72.06 \\ 53.91 & 55.15 & 56.11 & 60.08 & 74.13 & 69.25 & 66.56 & 57.08 \\ 41.84 & 48.9 & 50.32 & 48.93 & 60.08 & 62.17 & 55.79 & 43.82 \\ 35.78 & 40.21 & 52.12 & 47.82 & 54.53 & 55.81 & 53.02 & 38.12 \\ 29.17 & 32.8 & 41.39 & 45.11 & 50.32 & 52.69 & 45.69 & 35.53 \\ 26.96 & 30.88 & 39.94 & 43.32 & 46.7 & 47.82 & 41.35 & 28.93 \\ 22.5 & 26.52 & 34.3 & 41.59 & 45.11 & 44.59 & 37.93 & 26.01 \\ 20.88 & 25.46 & 34.34 & 38.12 & 40.91 & 40.97 & 34.58 & 22.39 \\ 18.19 & 22.6 & 31.32 & 34.71 & 38.56 & 38.41 & 33.22 & 20.12 \\ 16.67 & 21.26 & 24.71 & 30.92 & 33.74 & 34.23 & 28.83 & 17.95 \\ 14.57 & 18.5 & 23.36 & 26.68 & 30.92 & 29.98 & 26.96 & 16.18 \\ 12.86 & 16.38 & 19.99 & 23.29 & 26.79 & 25.03 & 24.31 & 13.61 \\ 12.62 & 15.4 & 15.96 & 18.23 & 21.26 & 20.43 & 18.39 & 14.48 \end{pmatrix} \frac{\text{gm}}{\text{kg}}$$

Ειδική ενθαλπία:

$$H_{w.a.i,j} := h(RH_{w.a.i,j}, T_{w.a.i,j}) 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$H_{w.a.} = \begin{pmatrix} 272.4 & 277.9 & 285 & 263 & 290.9 & 277.9 & 261.6 & 237.8 \\ 186.1 & 198.6 & 206.7 & 229.6 & 271 & 246.3 & 237.8 & 233.1 \\ 180.6 & 184.2 & 187 & 198.6 & 239 & 225.1 & 217.3 & 189.9 \\ 144.8 & 165.8 & 170 & 166.1 & 198.6 & 204.7 & 186.1 & 150.7 \\ 126.5 & 140 & 175.5 & 162.8 & 182.4 & 186.4 & 178.2 & 133.5 \\ 106.3 & 117.5 & 143.6 & 154.6 & 170 & 177 & 156.7 & 125.6 \\ 99.1 & 111.3 & 139 & 149.2 & 159.3 & 162.8 & 143.3 & 105.2 \\ 84.6 & 97.9 & 121.8 & 144 & 154.6 & 153 & 133.1 & 96 \\ 79.7 & 94.6 & 122.1 & 133.5 & 142.2 & 142.7 & 123 & 85.3 \\ 70.9 & 85.5 & 113.1 & 123 & 134.8 & 134.8 & 119 & 78.3 \\ 66.7 & 82.3 & 92.2 & 111.6 & 120.2 & 122.4 & 105.2 & 71.6 \\ 59.7 & 73.4 & 88.5 & 98.4 & 111.6 & 109.9 & 99.1 & 66 \\ 53.8 & 66.3 & 77.7 & 87.7 & 99.7 & 93.4 & 90.3 & 56.8 \\ 52.4 & 63.2 & 64 & 71.4 & 82.3 & 78.6 & 72.7 & 59.6 \end{pmatrix} \frac{1000\text{J}}{\text{kg}}$$

Ειδικός όγκος:

$$v_{w.a.i,j} := v(RH_{w.a.i,j}, T_{w.a.i,j}) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_{w.a.} = \begin{pmatrix} 0.959 & 0.962 & 0.964 & 0.956 & 0.966 & 0.962 & 0.955 & 0.946 \\ 0.923 & 0.928 & 0.932 & 0.942 & 0.959 & 0.949 & 0.946 & 0.944 \\ 0.92 & 0.922 & 0.923 & 0.928 & 0.946 & 0.94 & 0.937 & 0.924 \\ 0.901 & 0.913 & 0.915 & 0.913 & 0.928 & 0.931 & 0.923 & 0.904 \\ 0.891 & 0.899 & 0.918 & 0.911 & 0.921 & 0.923 & 0.919 & 0.895 \\ 0.879 & 0.886 & 0.901 & 0.907 & 0.915 & 0.918 & 0.909 & 0.89 \\ 0.873 & 0.881 & 0.898 & 0.904 & 0.909 & 0.911 & 0.9 & 0.877 \\ 0.862 & 0.873 & 0.888 & 0.901 & 0.907 & 0.906 & 0.895 & 0.871 \\ 0.86 & 0.871 & 0.888 & 0.895 & 0.9 & 0.901 & 0.889 & 0.865 \\ 0.853 & 0.864 & 0.883 & 0.888 & 0.896 & 0.896 & 0.887 & 0.861 \\ 0.851 & 0.864 & 0.869 & 0.882 & 0.887 & 0.89 & 0.878 & 0.856 \\ 0.846 & 0.858 & 0.868 & 0.873 & 0.882 & 0.883 & 0.873 & 0.852 \\ 0.84 & 0.852 & 0.86 & 0.866 & 0.876 & 0.87 & 0.867 & 0.844 \\ 0.838 & 0.85 & 0.848 & 0.854 & 0.864 & 0.859 & 0.857 & 0.846 \end{pmatrix} \frac{m^3}{kg}$$

$$x := 1, 2.. 4 \quad y := 1, 2.. 8$$

Λόγος υγρασίας:

$$W_{p.a.,x,y} := W(RH_{p.a.,x,y}, T_{p.a.,x,y})$$

$$W_{p.a.} = \begin{pmatrix} 6.82 & 8.4 & 9.56 & 10.02 & 9.65 & 9.14 & 9.5 & 9.34 \\ 6.97 & 8.13 & 9.01 & 9.05 & 9.41 & 9.28 & 9.07 & 9.02 \\ 7.51 & 8.4 & 8.7 & 9.51 & 9.25 & 9.41 & 9.23 & 8.64 \\ 7.47 & 7.64 & 8.47 & 8.35 & 8.58 & 8.58 & 8.93 & 8.8 \end{pmatrix} \frac{gm}{kg}$$

Ειδική ενθαλπία:

$$H_{p.a.,x,y} := h(RH_{p.a.,x,y}, T_{p.a.,x,y}) \cdot 1000 \frac{J}{kg}$$

$$H_{p.a.} = \begin{pmatrix} 38 & 43 & 48.1 & 50.4 & 49.2 & 48.4 & 47.9 & 48.2 \\ 36.1 & 39.2 & 42 & 43.3 & 44.3 & 44.3 & 43.6 & 43.4 \\ 36.6 & 39.4 & 41 & 43.2 & 42.4 & 42.6 & 41.8 & 41.2 \\ 34.7 & 35.2 & 38.9 & 37.7 & 38.5 & 38.5 & 40.7 & 40.4 \end{pmatrix} \cdot \frac{1000J}{kg}$$

Ειδικός όγκος:

$$v_{p.a.,x,y} := v(RH_{p.a.,x,y}, T_{p.a.,x,y}) \cdot \frac{m^3}{kg}$$

$$v_{p.a.} = \begin{pmatrix} 0.836 & 0.84 & 0.846 & 0.85 & 0.849 & 0.85 & 0.846 & 0.848 \\ 0.83 & 0.831 & 0.833 & 0.836 & 0.837 & 0.837 & 0.837 & 0.837 \\ 0.828 & 0.829 & 0.832 & 0.833 & 0.832 & 0.832 & 0.831 & 0.833 \\ 0.822 & 0.823 & 0.828 & 0.825 & 0.826 & 0.826 & 0.83 & 0.83 \end{pmatrix} \frac{m^3}{kg}$$

Εκτέλεση ισολογισμών μάζας και ενέργειας

Εκτελούνται τα παρακάτω ισοζύγια:

- *ισοζύγιο διακινούμενης μάζας νερού*

Εισερχόμενο
H₂O:

$$m_{w_in} := m_{water} + u_1 \cdot W_1 \cdot A_1 \cdot \rho_{in}$$

$$m_{w_in} = 1.526 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενο
H₂O (working):

$$m_{w_out_wor} := \sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} \left(u_{w.a.i,j} \cdot W_{w.a.i,j} \cdot \frac{Area_{w.a.i,j}}{v_{w.a.i,j}} \right)$$

$$m_{w_out_wor} = 1.877 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενο
H₂O (product):

$$m_{w_out_pro} := \sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} \left(u_{p.a.x,y} \cdot W_{p.a.x,y} \cdot \frac{Area_{p.a.x,y}}{v_{p.a.x,y}} \right)$$

$$m_{w_out_pro} = 4.165 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

Απόκλιση:

$$\Delta m_w := |m_{w_in} - m_{w_out_wor} - m_{w_out_pro}|$$

$$\Delta m_w = 7.684 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$\sigma m_w := \frac{\Delta m_w}{m_{w_in}}$$

$$\sigma m_w = 50.367\%$$

- *ισοζύγιο διακινούμενης μάζας ξηρού αέρα*

Εισερχόμενος
αέρας:

$$m_{a_in} := m_{dry_air}$$

$$m_{a_in} = 0.0954 \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενος
αέρας (working):

$$m_{a_out_wor} := \sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} \left(u_{w.a.i,j} \cdot \frac{Area_{w.a.i,j}}{v_{w.a.i,j}} \right)$$

$$m_{a_out_wor} = 0.045 \frac{kg}{s}$$

Εξερχόμενος
αέρας (product):

$$m_{a_out_pro} := \sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} \left(u_{p.a.x,y} \cdot \frac{Area_{p.a.x,y}}{v_{p.a.x,y}} \right)$$

$$m_{a_out_pro} = 0.0471 \frac{kg}{s}$$

Απόκλιση:

$$\Delta m_a := |m_{a_in} - m_{a_out_wor} - m_{a_out_pro}|$$

$$\Delta m_a = 3.272 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\sigma m_a := \frac{\Delta m_a}{m_{a_in}}$$

$$\sigma m_a = 3.432\%$$

• *ισοζύγιο συναλλασσόμενης ενέργειας*

Εισερχόμενος
αέρας:

$$q_{in} := \left(H_{in} + \frac{40\text{watt}}{m_{a_in}} \right) \cdot m_{a_in}$$

$$q_{in} = 6484.7 \text{ W}$$

Εξερχόμενος
αέρας (working):

$$q_{out_wor} := \left[\sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} \frac{(H_{w.a.i,j} \cdot \text{Area}_{w.a.i,j})}{\sum_{i=1}^{L_{w.a.}} \sum_{j=1}^{C_{w.a.}} (\text{Area}_{w.a.i,j})} \right] \cdot m_{a_out_wor}$$

$$q_{out_wor} = 6385.9 \text{ W}$$

Εξερχόμενος
αέρας (product):

$$q_{out_pro} := \left[\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} \frac{(H_{p.a.x,y} \cdot \text{Area}_{p.a.x,y})}{\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} (\text{Area}_{p.a.x,y})} \right] \cdot m_{a_out_pro}$$

$$q_{out_pro} = 1976.4 \text{ W}$$

Απόκλιση:

$$\Delta q := q_{in} - q_{out_wor} - q_{out_pro}$$

$$\Delta q = -1877.6 \text{ W}$$

$$\sigma q := \frac{|\Delta q|}{q_{in}}$$

$$\sigma q = 28.954\%$$

ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΤΟ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟ ΧΑΡΤΗ

Μέση θερμοκρασία εξόδου (product stream):

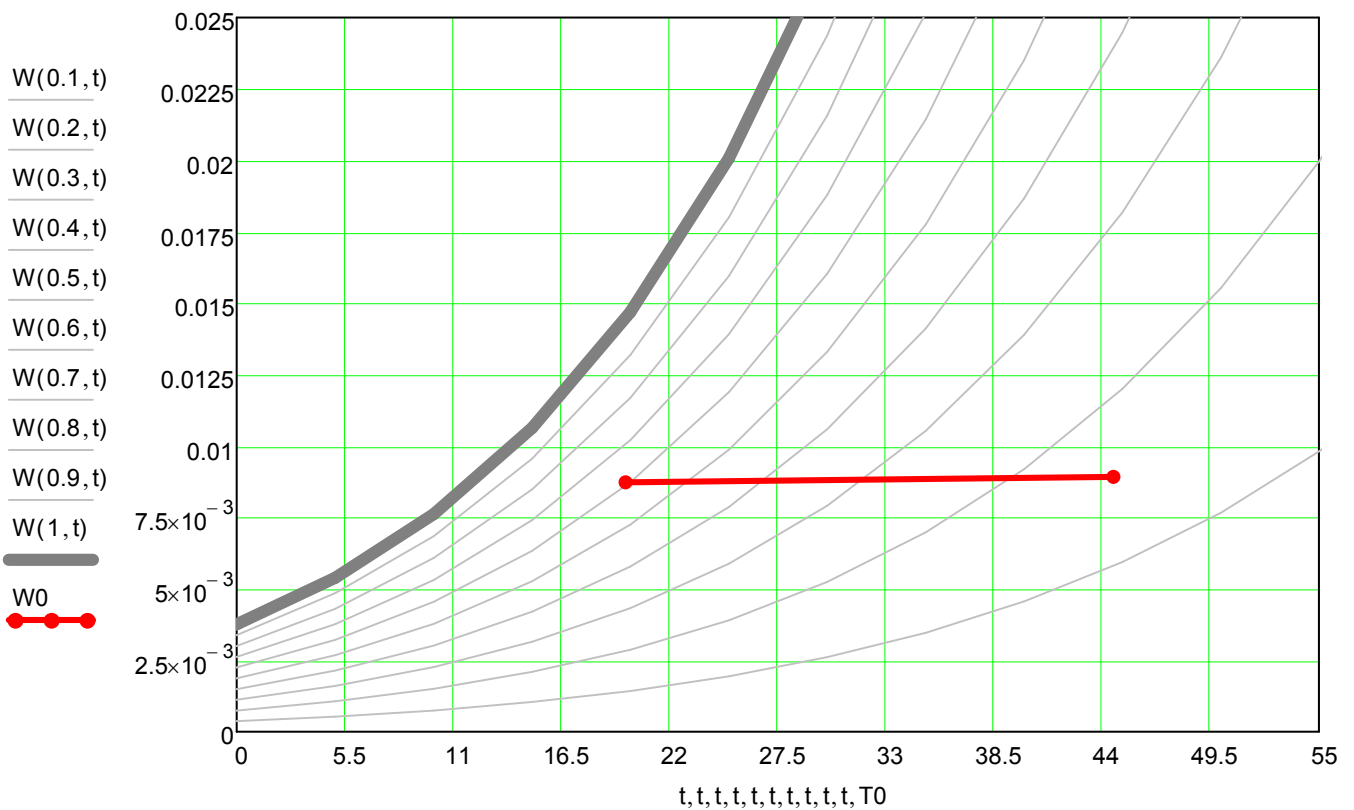
$$T_{p.mean} := \frac{\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} T_{p.a.,x,y}}{L_{p.a.} \cdot C_{p.a.}} = 19.756$$

Μέση λόγος υγρασίας εξόδου (product stream):

$$W_{p.mean} := \frac{\sum_{x=1}^{L_{p.a.}} \sum_{y=1}^{C_{p.a.}} W_{p.a.,x,y}}{L_{p.a.} \cdot C_{p.a.}} = 8.745 \times 10^{-3}$$

$$W_0 := \begin{pmatrix} W_{in} \\ W_{p.mean} \end{pmatrix}$$

$$T_0 := \begin{pmatrix} T_{dbin} \\ T_{p.mean} \end{pmatrix}$$



$$DW\% := \frac{W_{in} - W_{p.mean}}{W_{in}}$$

$$DW\% = 2.041\%$$

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Εστω σταθερή η σχετική υγρασία ($RH = 18\%$) στην εισοδο της μονάδας μειωνουμε την μετρουμενη θερμοκρασια του εισερχομενου αερα κατα ποσοστο X_s καθε φορα.

Για μειωση κατα:

$$X_s := \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 6 \\ 9 \\ 12 \\ 15 \\ 18 \\ 21 \end{pmatrix}$$

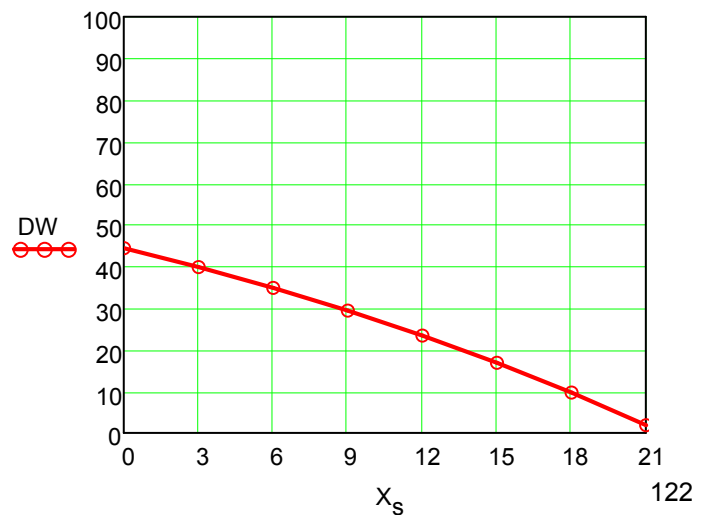
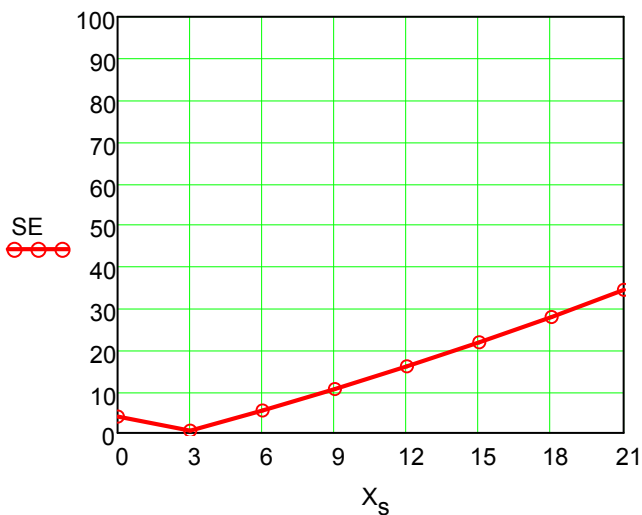
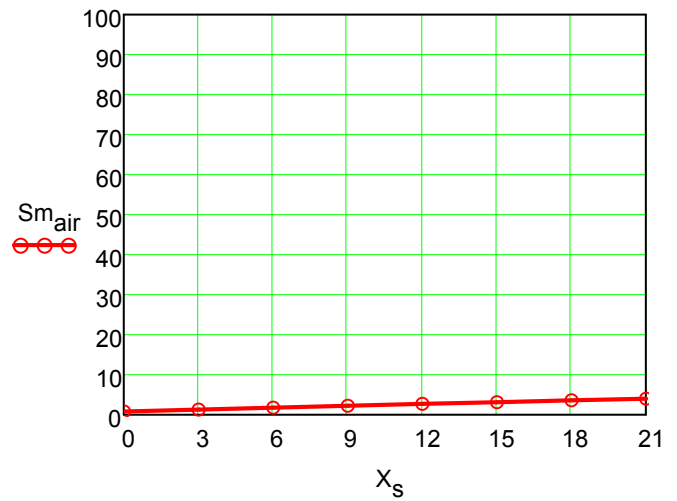
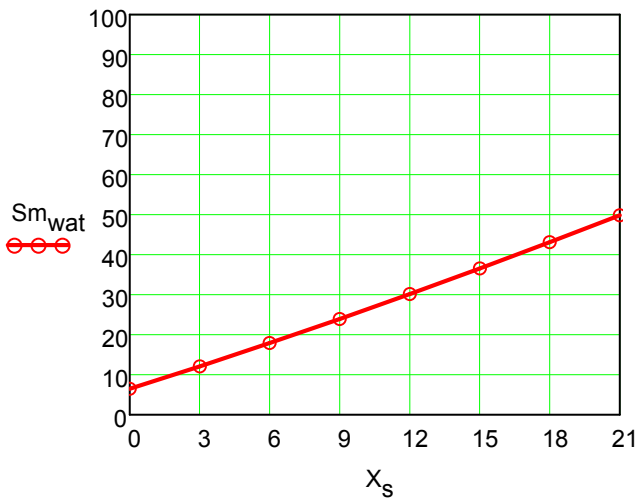
εχουμε τις εξης ποσοστιαιες αποκλισεις των ισοζυγιων (μαζας νερου, μαζας αερα, ενεργειας) και την καθε φορα κλιση της μεταβολης στο ψυχομετρικο χαρτη:

$Sm_{wat} :=$	6.53
	12.14
	17.97
	23.99
	30.22
	36.62
	43.2
	49.94

$Sm_{air} :=$	0.92
	1.40
	1.87
	2.33
	2.78
	3.22
	3.65
	4.07

$SE :=$	3.98
	0.62
	5.48
	10.62
	16.06
	21.83
	27.96
	34.49

$DW :=$	44.47
	39.91
	34.92
	29.46
	23.49
	16.95
	9.77
	1.89



Εστω σταθερή η θερμοκρασία ($T_{dbin} = 52.4^{\circ}\text{C}$) στην εισοδο της μοναδας μειωνουμε την μετρουμενη σχετικη υγρασια του εισερχομενου αερα κατα ποσοστο Y_s καθε φορα.

Για μειωση κατα:

$$Y_s := \begin{pmatrix} 0 \\ 6 \\ 12 \\ 18 \\ 24 \\ 30 \\ 36 \\ 42 \end{pmatrix}$$

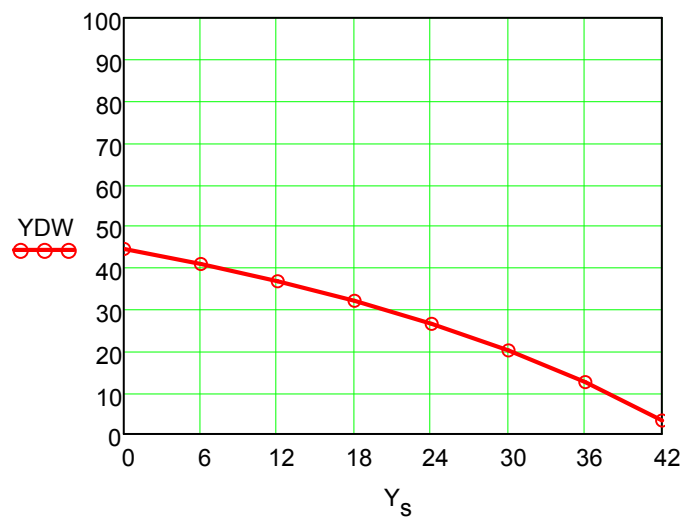
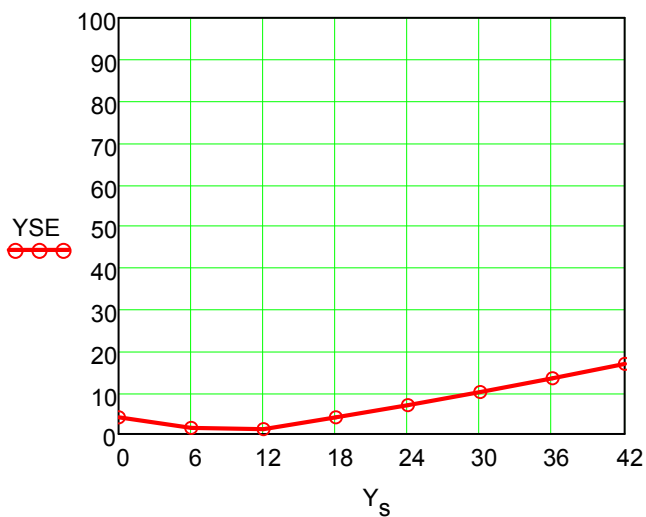
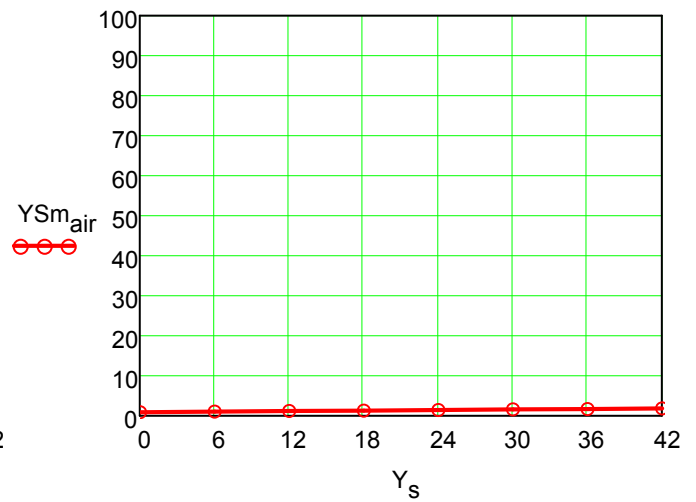
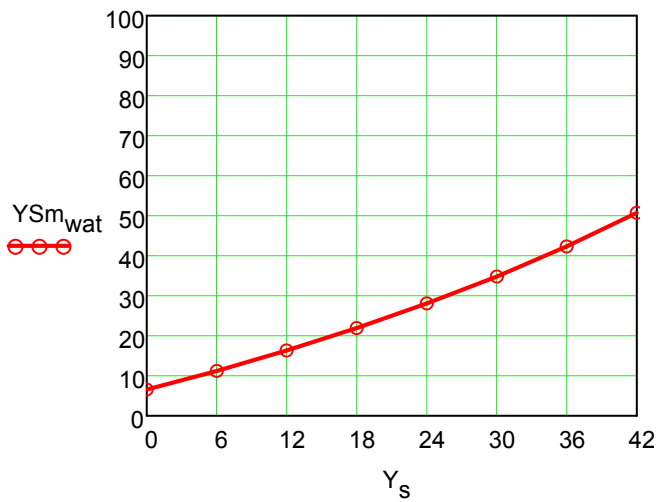
εχουμε τις εξης ποσοστιαιες αποκλισεις των ισοζυγιων (μαζας νερου, μαζας αερα, ενεργειας) και την καθε φορα κλιση της μεταβολης στο ψυχομετρικο χαρτη:

$Y_{Sm_{wat}} :=$	6.53
	11.22
	16.33
	21.91
	28.05
	34.82
	42.33
	50.70

$Y_{Sm_{air}} :=$	0.92
	1.05
	1.18
	1.31
	1.44
	1.57
	1.70
	1.83

$Y_{SE} :=$	3.98
	1.47
	1.18
	3.97
	6.92
	10.04
	13.35
	16.86

$Y_{DW} :=$	44.47
	40.84
	36.71
	31.97
	26.49
	20.07
	12.45
	3.24



Παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα ότι η ποσοστιαία μεταβολή της αποκλίσης της μάζας του νερού είναι περίπου διπλάσια στην περίπτωση μείωσης της θερμοκρασίας σε σχέση με τη μείωση της υγρασίας κατά το ίδιο ποσοστό.

Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρείται και στην ποσοστιαία μεταβολή της αποκλίσης της συναλλασσομένης ενέργειας.

Τέλος στην τρίτη περίπτωση μειώνουμε την μετρούμενη θερμοκρασία και την σχετική υγρασία του εισερχόμενου αέρα κατά το ίδιο ποσοστό Z_s κάθε φορά.

Για μείωση κατά: $Z_s := \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 6 \\ 9 \\ 12 \\ 15 \end{pmatrix}$

εχουμε τις εξής ποσοστιαίες αποκλίσεις των ισοζυγίων (μάζας νερού, μάζας αέρα, ενέργειας) και την κάθε φορά κλίση της μεταβολής στο ψυχομετρικό χαρτί:

$ZSm_{wat} :=$	$\begin{pmatrix} 6.53 \\ 14.50 \\ 22.89 \\ 31.68 \\ 40.85 \\ 50.37 \end{pmatrix}$
----------------	---

$ZSm_{air} :=$	$\begin{pmatrix} 0.92 \\ 1.46 \\ 1.98 \\ 2.48 \\ 2.96 \\ 3.43 \end{pmatrix}$
----------------	--

$ZSE :=$	$\begin{pmatrix} 3.98 \\ 1.89 \\ 8.09 \\ 14.65 \\ 21.59 \\ 28.95 \end{pmatrix}$
----------	---

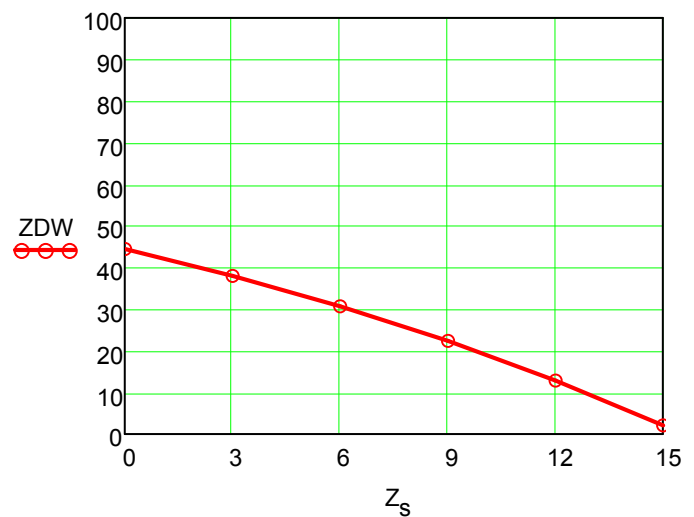
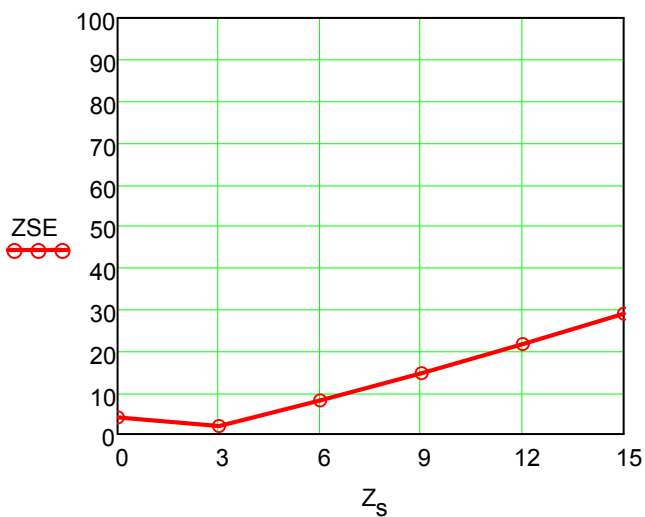
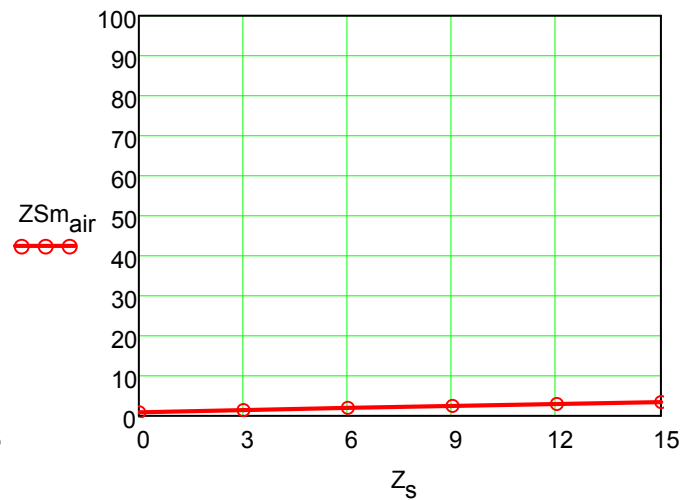
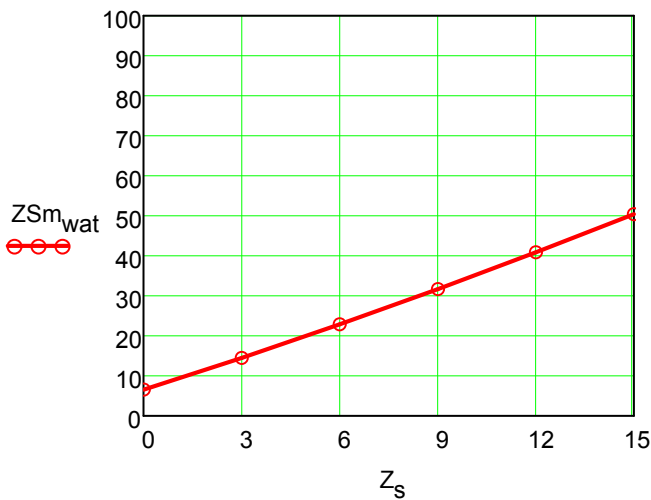
$ZDW :=$	$\begin{pmatrix} 44.47 \\ 38.00 \\ 30.67 \\ 22.35 \\ 12.87 \\ 2.04 \end{pmatrix}$
----------	---

$\sigma_{m_w} = 50.367\%$

$\sigma_{m_a} = 3.432\%$

$\sigma_q = 28.954\%$

$DW\% = 2.041\%$



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. *Technology Installation Review*, **Coolerado Cooler helps to save cooling energy and dollars**, 2005
2. *Turbine Technology*, **Life below the wet bulb: The Maisotsenko Cycle**, 2003
3. *ASME Turbo Expo*, **Maisotsenko Open Cycle used for Gas Turbine Power Generation**, 2003
4. *ASHRAE*, **Fundamentals**, 2009
5. *Ε. Κακάτσιος*, **Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης**, 2006
6. *Κ. Αντωνόπουλος*, **Κλιματισμός (Τεύχος Α')**, 2002
7. *Frank P. Bleier*, **Fan Handbook – Selection, Application and Design**, 1998
8. <http://www.coolerado.com>
9. <http://www.ypan.gr/ape/index.php>
10. <http://www.greenpeace.org/greece/press/118517/529622>
11. http://en.wikipedia.org/wiki/Evaporative_cooler