



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΜΕ  
ΣΤΕΡΕΟ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ  
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

**ΔΑΛΑΒΟΥΡΑΣ**  
**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

Επιβλέπουσα  
Λέκτ. Κορωνάκη Ειρήνη

ΑΘΗΝΑ  
ΜΑΡΤΙΟΣ 2012



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. Συστήματα προσρόφησης.....</b>	<b>5</b>
1.1. Η Πορεία των συστημάτων κλιματισμού με προσρόφηση.....	5
1.1.1. Απευθείας εξατμιστική ψύξη.....	5
1.1.2. Ψύξη με έμμεση εξατμηση.....	6
1.1.3. Ψύξη με τροχό αφύγρανσης.....	7
1.2. Το μέλλον των συστημάτων τροχού αφύγρανσης.....	10
1.2.1. Ελάττωση της υγρασίας προς απομάκρυνση.....	11
1.2.2. Ελάττωση της θερμοκρασίας αναγέννησης.....	15
1.2.3. Απομάκρυνση του μέσου αφύγρανσης από τον αέρα παροχής.....	16
1.2.4. Μείωση του κόστους.....	18
1.3. Σύγχρονες εξελίξεις.....	18
1.4. Πρακτικές εφαρμογές.....	24
1.5. Σύγκριση συστημάτων.....	25
1.6. Σύγχρονα και μελλοντικά προϊόντα.....	26
<b>2. Προσροφητές.....</b>	<b>28</b>
2.1. Εισαγωγή.....	28
2.2. Φυσικοί προσροφητές.....	29
2.2.1. Ενεργός άνθρακας και ενεργά ανθρακονήματα.....	29
2.2.2. Silica-gel.....	30
2.2.3. Ζεόλιθοι.....	31
2.3. Χημικοί προσροφητές.....	32
2.3.1. Χλωρίδια μετάλλων.....	32
2.3.2. Άλατα και οξειδία μετάλλων.....	33
2.3.3. Οξειδία μετάλλων.....	33
2.4. Ισοζύγιο των μοντέλων προσρόφησης.....	34
2.4.1. Ισοζύγιο για φυσική προσρόφηση.....	35
2.4.2. Ισοζύγιο για χημική προσρόφηση.....	35
2.5. Ζεύγη λειτουργίας προσρόφησης.....	36
2.5.1. Περιγραφή του κύκλου.....	36
2.5.2. Φυσική προσρόφηση.....	37
2.5.3. Ενεργός άνθρακας ή ενεργά ανθρακονήματα και μεθανόλη ή αμμωνία.....	38
2.5.4. Silica gel και νερό.....	39
2.5.5. Ζεόλιθοι/ νερό.....	39
2.6. Μέθοδοι για την μέτρηση της απόδοσης της προσρόφησης.....	40
2.7. Συμπεράσματα και προοπτικές για τα ζεύγη προσροφητή- ψυκτικού ρευστού...	43
<b>3. Εφαρμογές ανοικτού κύκλου.....</b>	<b>46</b>
3.1. Κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο Κορωπί.....	46
3.1.1. Περιγραφή της εφαρμογής.....	46
3.1.2. Γενική περιγραφή του συστήματος.....	46
3.1.3. Απόδοση συστήματος.....	47
3.1.4. Αξιοπιστία του συστήματος και γενικά επιτυχία της εγκατάστασης.....	47
3.2. Εμπορικό επιμελητήριο 'Südlicher Oberrhein' στο Freiburg της Γερμανίας.....	48
3.2.1. Περιγραφή της εφαρμογής.....	48
3.2.2. Γενική περιγραφή του συστήματος.....	49
3.2.3. Απόδοση συστήματος.....	50
3.2.4. Αξιοπιστία του συστήματος και γενικά επιτυχία της εγκατάστασης.....	51
3.3. Πληροφοριακό κέντρο ηλιακών συστημάτων SIC στο Freiburg της Γερμανίας.....	52

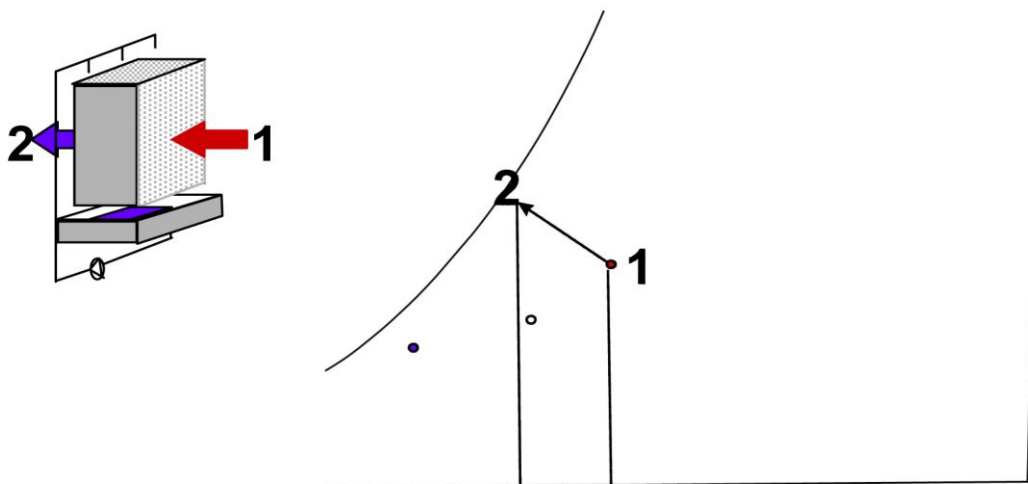
3.3.1.	Περιγραφή της εφαρμογής.....	52
3.3.2.	Γενική περιγραφή του συστήματος.....	52
3.3.3.	Απόδοση συστήματος.....	53
3.3.4.	Αξιοπιστία του συστήματος και γενικά επιτυχία της εγκατάστασης.....	54
3.4.	Κτίριο γραφείων στο Πανεπιστήμιο INETI στη Λισσαβόνα της Πορτογαλίας.....	55
3.4.1.	Περιγραφή της εφαρμογής.....	55
3.4.2.	Γενική περιγραφή του συστήματος.....	55
3.4.3.	Απόδοση συστήματος.....	56
3.5.	Βιβλιοθήκη 'Rompeu Fabra' στο Ματαρό της Ισπανίας.....	57
3.5.1.	Περιγραφή της εφαρμογής.....	57
3.5.2.	Γενική περιγραφή του συστήματος.....	58
3.5.3.	Απόδοση συστήματος.....	59
3.5.4.	Αξιοπιστία του συστήματος και γενικά επιτυχία της εγκατάστασης.....	59
3.6.	Κτίριο Γραφείων στο Hartberg της Αυστρίας.....	60
3.6.1.	Περιγραφή της εφαρμογής.....	60
3.6.2.	Γενική περιγραφή του συστήματος.....	60
3.6.3.	Απόδοση συστήματος.....	62
4.	Νευρωνικά δίκτυα και εφαρμογή τους.....	64
4.1.	Θεωρητική υλοποίηση νευρωνικών δικτύων.....	64
4.1.1.	Το νευρωνικό δίκτυο ως μαύρο κουτί.....	64
4.1.2.	Το νευρωνικό δίκτυο εμπρόσθιας διάδοσης.....	65
4.1.3.	Το νευρωνικό δίκτυο ακτινικών συναρτήσεων βάσης.....	66
4.2.	Υλοποίηση νευρωνικών δικτύων στο Matlab.....	67
4.2.1.	Νευρωνικό Δίκτυο Εμπρόσθιας Διάδοσης.....	67
4.2.2.	Νευρωνικό Δίκτυο Ακτινικών Συναρτήσεων Βάσης.....	71
4.2.3.	Υλοποίηση Νευρωνικών Δικτύων.....	71
4.3.	Υλοποίηση νευρωνικών δικτύων.....	74
4.4.	Συμπεράσματα.....	78
4.4.1.	Βιβλιογραφία.....	80

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ

### 1.1 Η ΠΟΡΕΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

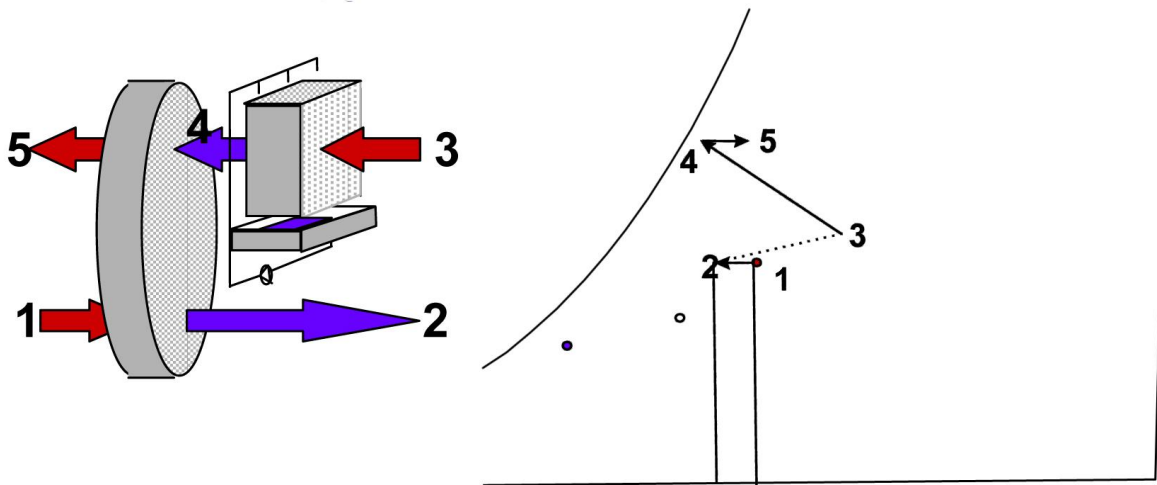
#### 1.1.1. Απευθείας εξατμιστική ψύξη (αδιαβατικός ψύκτης)



Εικόνα 1. Σύστημα απευθείας εξατμίσεως νερού στον αέρα παροχής.

Συστήματα που εξατμίζουν απευθείας το νερό στον ρεύμα αέρα παροχής. Καθώς το νερό εξατμίζεται ψύχει το ρεύμα αέρα, αλλά αυξάνει την υγρασία του. Όπως φαίνεται στο σχήμα μια τέτοια συσκευή διαθέτει ένα διαβρεχόμενο μέσο μέσα από τον οποίο περνάει ο αέρας. Το νερό συλλέγεται συνεχόμενα στην βάση της συσκευής και μέσω αντλίας ανεβαίνει και ψεκάζεται ξανά. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως σε περιοχές με πολύ ξηρό κλίμα. Για εύκρατο κλίμα ο αέρας (2) είναι πολύ ζεστός και υγρός ώστε να μπορέσουμε με αυτό τον τρόπο να επιτύχουμε συνθήκες άνεσης.

### 1.1.2. Ψύξη με έμμεση εξάτμιση



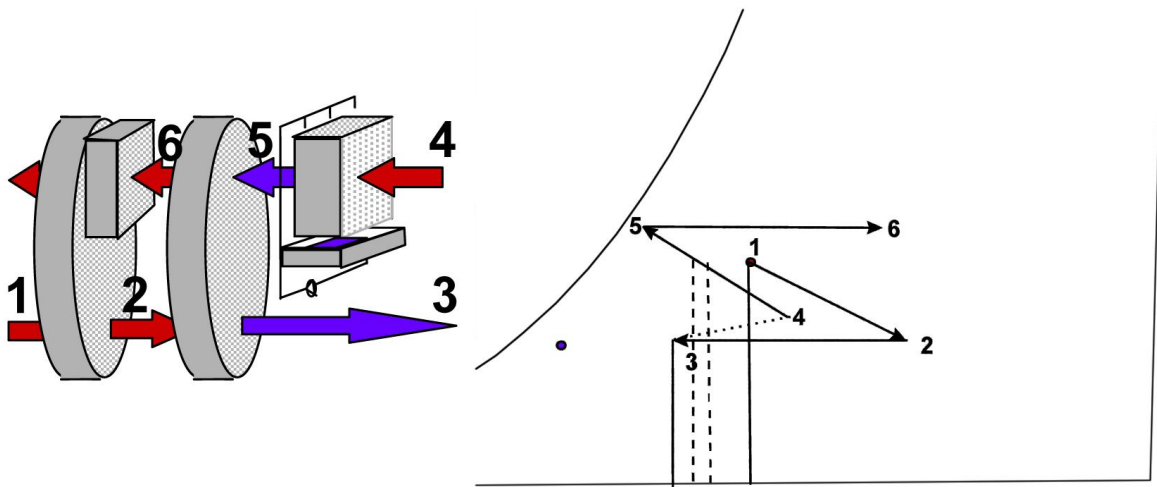
Εικόνα 2. Σύστημα ψύξης με έμμεση ψύξη

Αυτοί οι ψύκτες χρησιμοποιούν έναν εναλλάκτη θερμότητας, όπως ο τροχός που φαίνεται στο σχήμα, για την αισθητή ψύξη ενός δεύτερου ρεύματος αέρα (1-2), χωρίς να προστίθεται λανθάνουσα υγρασία. Ο αέρας επιστροφής από το χώρο (3) είναι περίπου 10 βαθμούς πιο ζεστός από τον αέρα παροχής.

Ο αέρας επιστροφής (3) περνά από έναν αδιαβατικό ψύκτη και φτάνει στην κατάσταση (4). Αυτό το κρύο και υγρό ρεύμα αέρα περνά από τον εναλλάκτη τον οποίο και ψύχει. Ο εναλλάκτης στην συνέχεια ψύχει τον φρέσκο αέρα από την κατάσταση (1) στην κατάσταση (2).

Ο αέρας παροχής θα μπορούσε να είναι ψυχρότερος αν το ρεύμα φρέσκου αέρα πέρανε από τον εναλλάκτη. Ωστόσο ο αέρας παροχής είναι συνήθως πολύ ζεστός για να επιτύχουμε τις επιθυμητές συνθήκες στον χώρο στα εύκρατα και υγρά κλίματα.

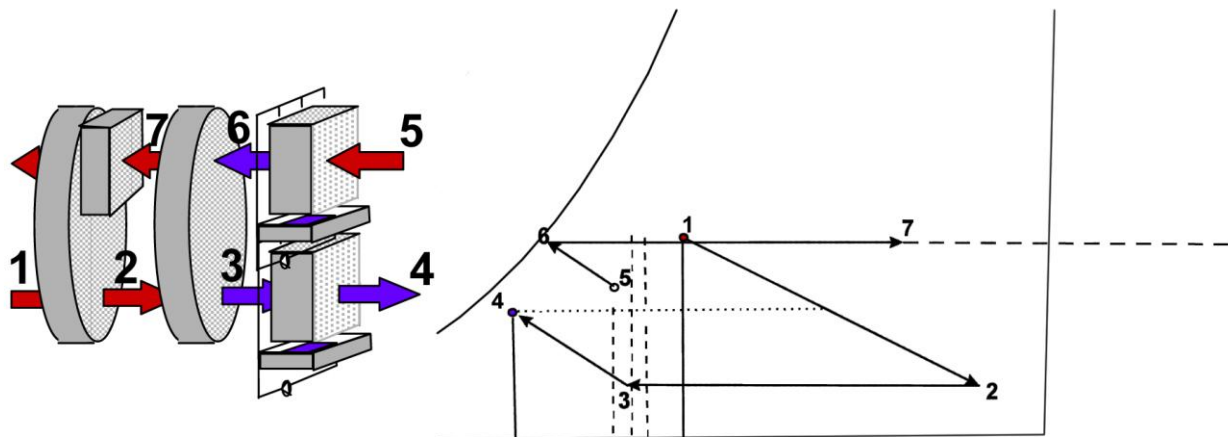
### 1.1.3. Ψύξη με τροχό αφύγρανσης



Εικόνα 3. Σύστημα ψύξης με έμμεση εξάτμιση και τροχό αφύγρανσης

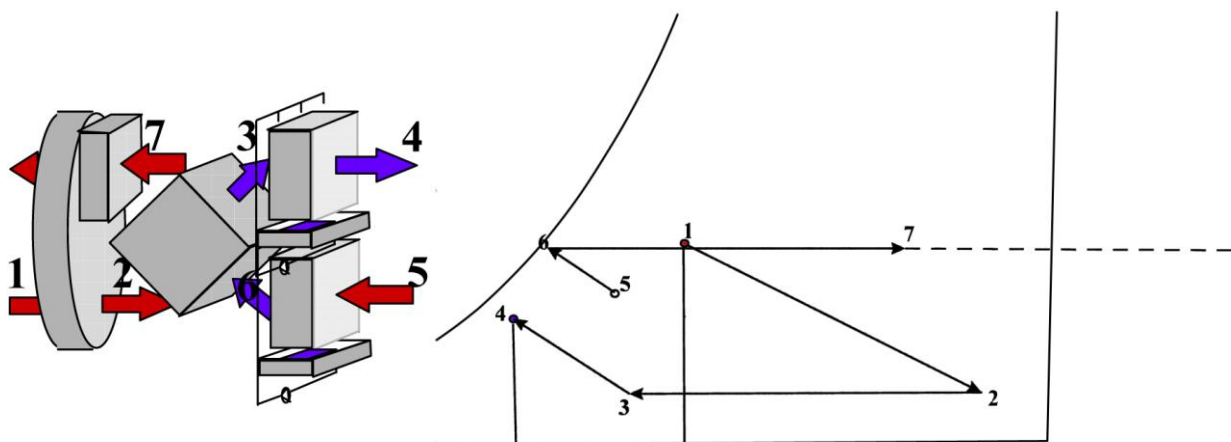
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3 μπορεί να προστεθεί μπροστά από το ψύκτη έμμεσης εξάτμισης ένα τροχός αφύγρανσης κι ένας τροχός θέρμανσης. Η συσκευή αυτή ξηραίνει τον αέρα από το 1 στο 2. Ο αέρας εξάτμισης (6) θερμαίνεται προτού περάσει από τον τροχό αφύγρανσης για την αναγέννηση του.

Ο τροχός αφύγρανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αφύγρανση του αέρα παροχής στην ιδανική υγρασία παροχής των 7.0g/kg (μπλε σημείο). Η υγρασία του δωματίου (4) θα είναι επίσης χαμηλότερη και έτσι ο αέρας που έχει ψυχθεί αδιαβατικά (5) θα είναι πιο ψυχρό από το αντίστοιχο της εικόνας 2. Ωστόσο το σύστημα αυτό δεν μπορεί να επιτύχει την ιδανική θερμοκρασία παροχής αέρα (μπλε σημείο) σε εύκρατα κλίματα.



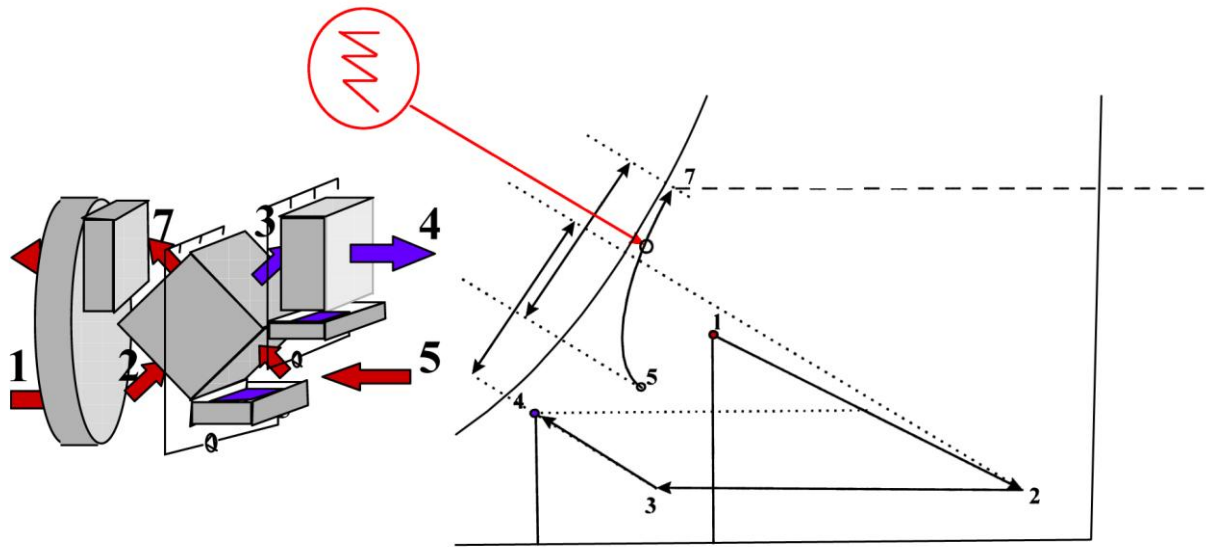
Εικόνα 4. Ο ψυκτικός κύκλος Pennington

Ο κύκλος Pennington προσθέτει άλλον ένα αδιαβατικό ψύκτη στο ρεύμα παροχή αέρα όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Αυτός ψύχει αδιαβατικά τον αέρα από το 3 στο 4. Για να αντισταθμίσει την αύξηση της υγρασίας του αέρα παροχής το κύκλος αφύγρανσης χρησιμοποιείται να αφυγράνει τον αέρα (2) ακόμα περισσότερο από ότι στην προηγούμενη περίπτωση. Ο κύκλος Pennington εφευρεθεί την δεκαετία του 1960 και πολλές εταιρείες χρησιμοποιούν στα προϊόντα τους τον κύκλο αυτό.



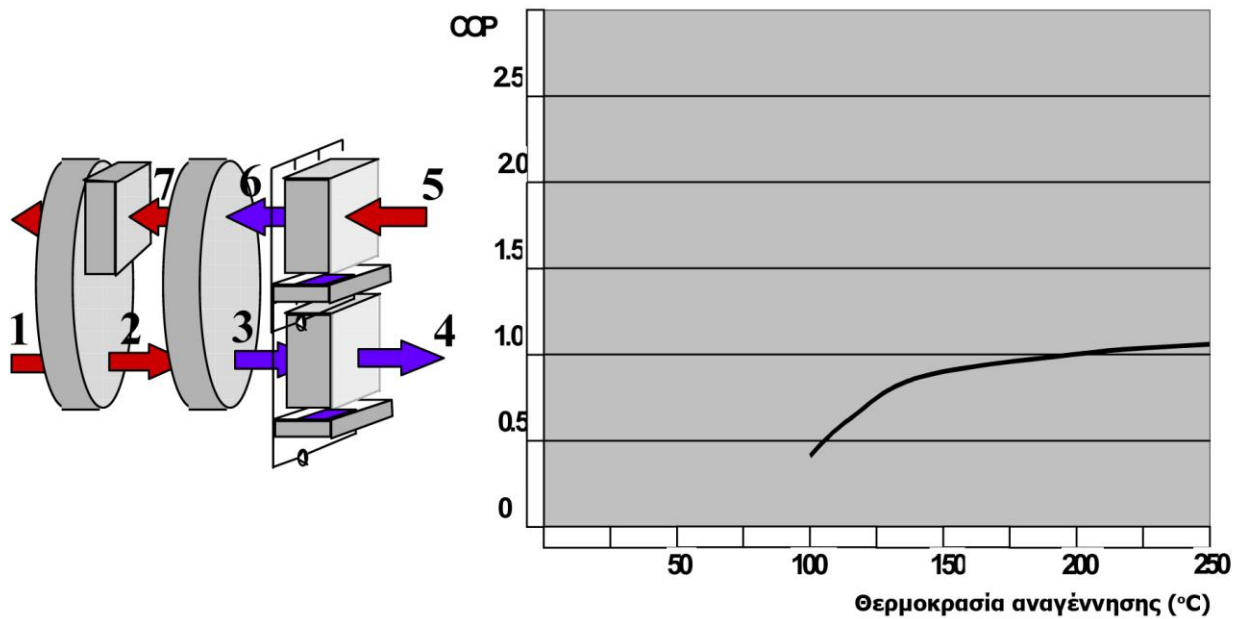
Εικόνα 5. Διαφοροποίηση του ψυκτικού κύκλου Pennington με εναλλάκτη θερμότητας

Μερικοί κατασκευαστές τώρα χρησιμοποιούν έναν εναλλάκτη θερμότητας όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 αντί για τον κύκλο θέρμανσης που είδαμε προηγουμένα. Στην ουσία τα ψυχομετρικά δεδομένα παραμένουν τα ίδια.



Εικόνα 6. Διαφοροποίηση του κύκλου Pennington με ισοθερμοκρασιακή υγρανση.

Έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί εναλλάκτες θερμότητας στους οποίους ψεκάζεται νερό στο ρεύμα επιστροφής του αέρα για την βελτίωση της απόδοσης του εναλλάκτη αλλά και για την μείωση του μεγέθους του μηχανήματος. Το ρεύμα επιστροφής του αέρα ψύχεται λόγω της εξάτμισης του νερού και θερμαίνεται από τον εναλλάκτη θερμότητας με αποτέλεσμα την σχεδόν ισοθερμοκρασιακή και όχι αδιαβατική αύξηση της υγρασίας του στην κατάσταση (7) όπως φαίνεται στην εικόνα 6.



Εικόνα 7. Επιρροή της θερμοκρασίας αναγέννησης στο COP του ψυκτικού κύκλου Pennington

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν τον κύκλο Pennington όπως αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 7 έχουν συμπαγείς διαστάσεις και δεν απαιτούν ξεχωριστό ψυκτικό σύστημα και ψυκτικό υγρό. Χρησιμοποιεί φθηνή θερμότητα σαν πηγή λειτουργίας αντί για ηλεκτρικό ρεύμα. Πρακτικά, το χαμηλότερο επίπεδο θερμοκρασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι περίπου 80 βαθμοί Κελσίου σχετικά υψηλό για χρήση με απορριπτόμενη θερμότητα από άλλη εφαρμογή.

Το κόστος λειτουργίας του κύκλου Pennington είναι περίπου το ίδιο με το συστήματα συμπίεσης ατμού. Το σύστημα έχει συντελεστή συναπόδοσης ανάλογο της θερμοκρασίας τροφοδοσίας όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Στην πράξη το COP του κινείται στα επίπεδα των συστημάτων απορρόφησης.

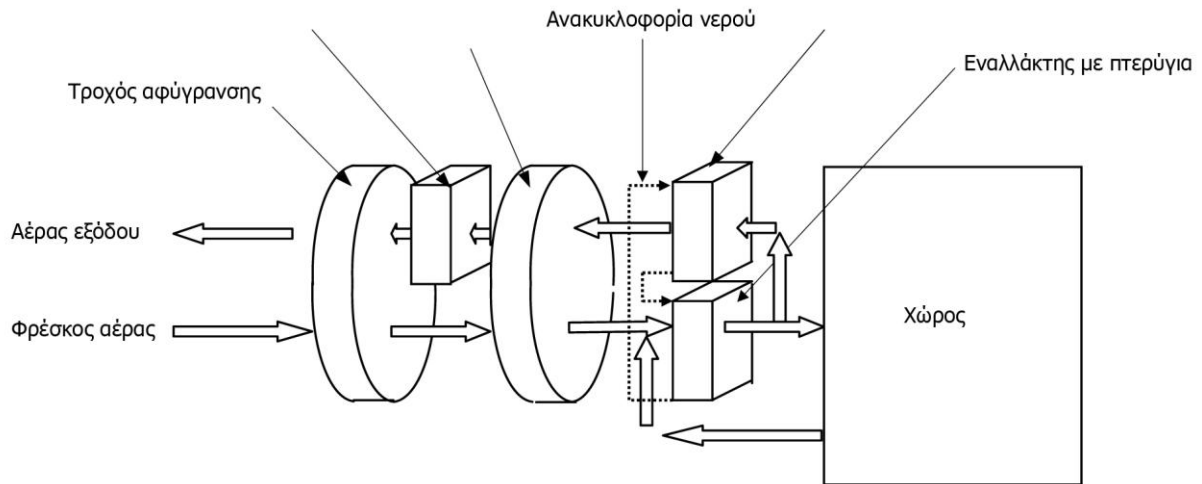
Το COP βελτιώνεται όταν ο αέρας περιβάλλοντος έχει λιγότερη υγρασία και συνεπώς απαιτείται λιγότερη αφύγρανση.

## 1.2. Το μέλλον των συστημάτων τροχού αφύγρανσης.

Οι ακόλουθες εξελίξεις αποτελούν σημαντικά βήματα στην βελτιστοποίηση των συστημάτων τροχών αφύγρανσης

### 1.2.1. Ελάττωση της υγρασίας προς απομάκρυνση.

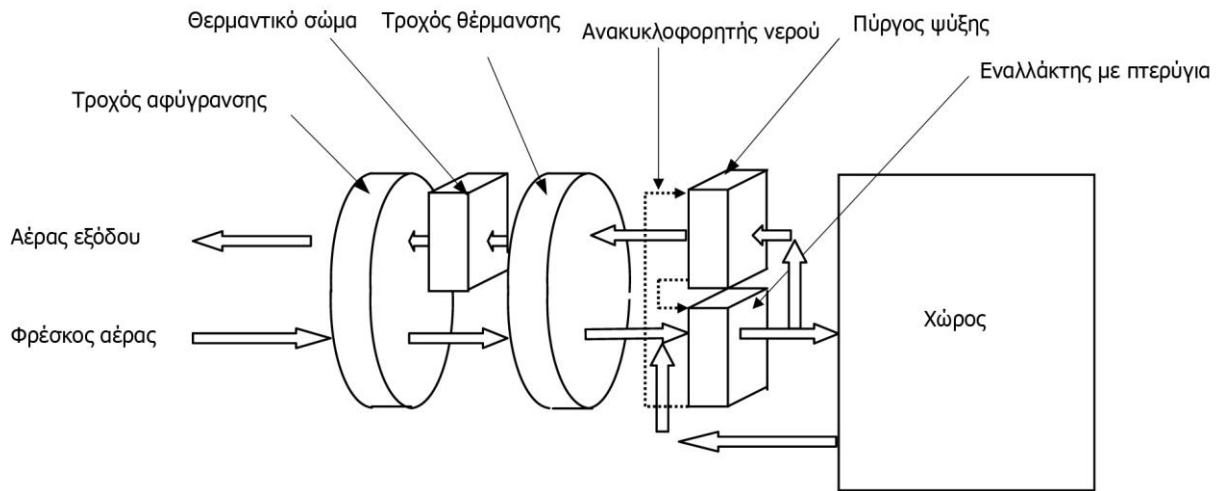
Η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη θερμότητας που θερμαίνει και υγραίνει τον αέρα επιστροφής επηρεάζει την απαιτούμενη αφύγρανση από τον τροχό αφύγρανσης. Όσο πιο κοντά είναι ο αέρας επιστροφής στην θερμοκρασία του dew point τόσο λιγότερη αφύγρανση απαιτείται επομένως απαιτείται και λιγότερη ενέργεια αναγέννησης.



Εικόνα 8. Σύστημα κατανάλωσης μικρότερης ποσότητας αφυγραντικού μέσου.

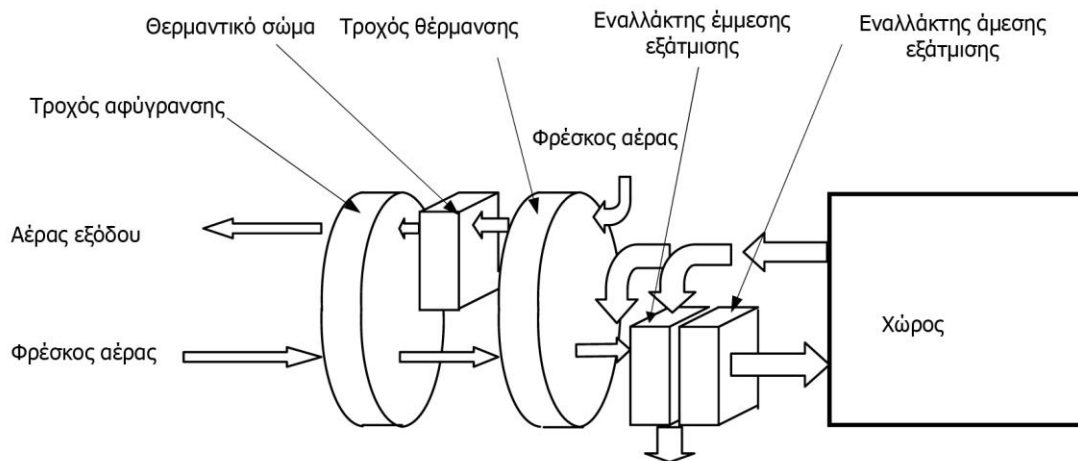
Έχουν γίνει διάφορες μετατροπές στον βασικό κύκλο Pennington για την μείωση της ανάγκης αφύγρανσης με συνεπακόλουθη την αύξηση του COP.

Οι Maclaine-Cross (1985) πρότειναν τον κύκλο REVERS που φαίνεται παρακάτω. Το προβλεπόμενο COP είναι 1.25 για συνθήκες κατά ARI και με ιδανικά εξαρτήματα. Το COP θα είναι μικρότερο υπό φυσιολογικές συνθήκες και με μη ιδανικά εξαρτήματα.



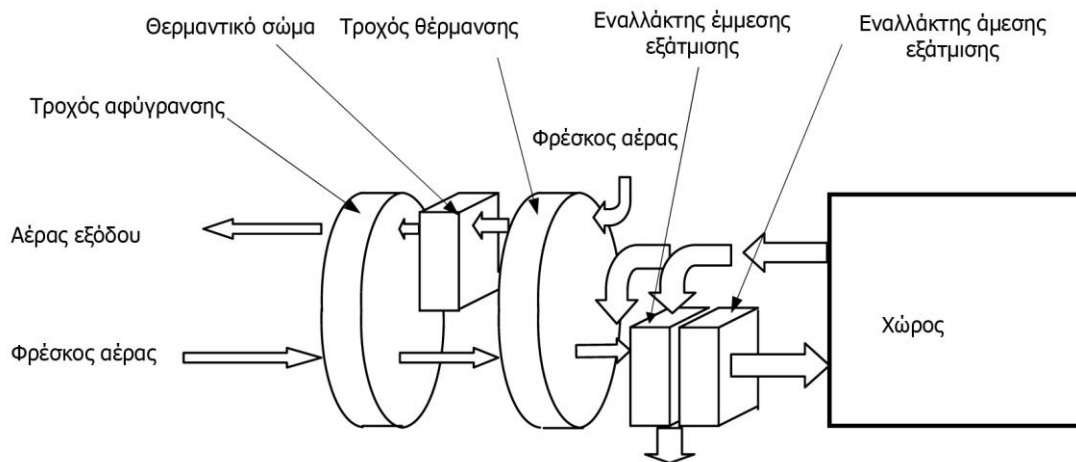
Εικόνα 9. Ψυκτικός κύκλος REVERS  
πηγή: [5]

Οι Waugaman και Kettleborough (1987) ανέπτυξαν τον ψύκτη άμεσης-έμμεσης εξάτμισης (DINC) που φαίνεται παρακάτω, χρησιμοποιώντας έναν απλό πλαστικό εναλλάκτη θερμότητας έμμεσης εξάτμισης και έναν ψύκτη άμεσης εξάτμισης. Προέβλεψαν COP 1.1-1.93 υπό συνθήκες ARI ανάλογα με το μέγεθος του αφυγραντή και το υλικό αφύγρανσης.



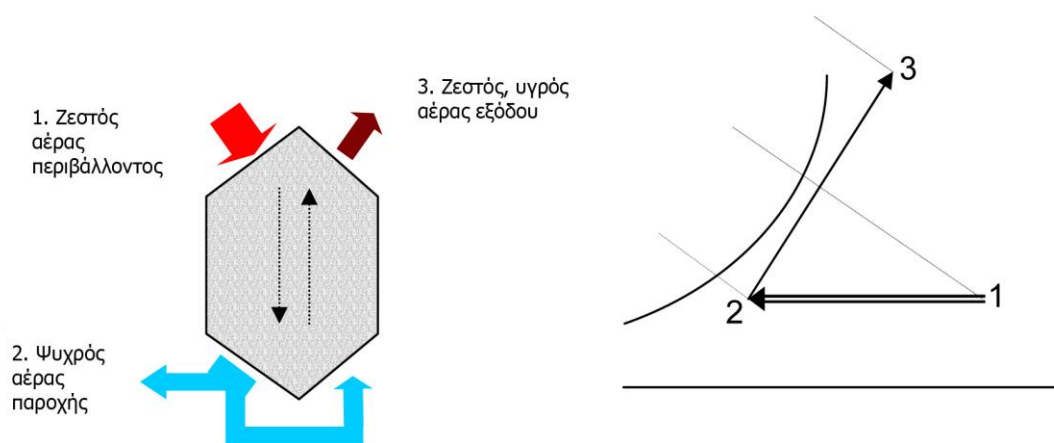
Εικόνα 10. Ψύκτης άμεσης-έμμεσης εξάτμισης DINC  
πηγή: [5]

Οι Maclaine-Cross (1988) ανέπτυξαν τον κύκλο SENS ο οποίος φαίνεται παρακάτω με την προσθήκη ενός ακόμα κύκλου θέρμανσης στον κύκλο REVERS. Αυτή η μετατροπή αυξάνει το COP για ένα σύστημα με ιδανικά εξαρτήματα στο 2,58 για συνθήκες ARI με την ανάκτηση της διαθέσιμης ψύξης στον αέρα απόρριψης στον πύργο ψύξης.



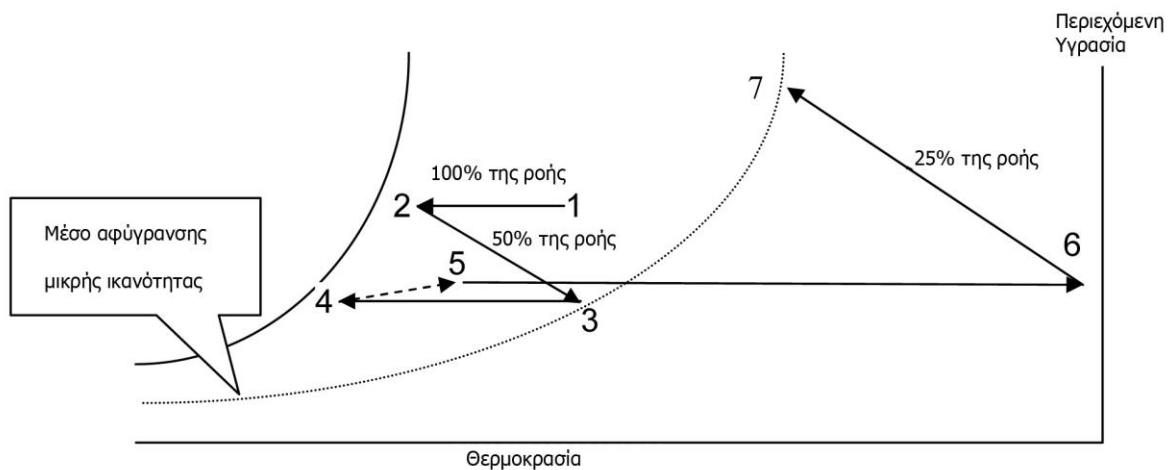
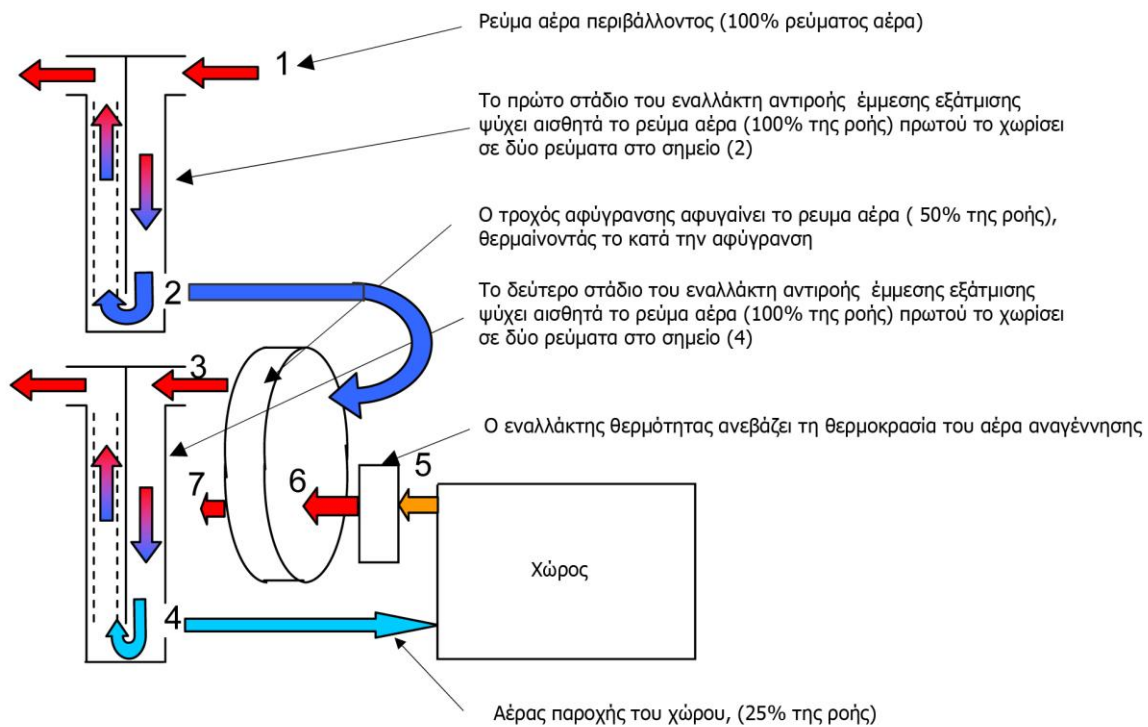
Εικόνα 11. Ψυκτικός κύκλος SENS  
πηγή: [5]

Οι Rottenburg (1993) [3] και Maisotsenko (1990)<sup>[12]</sup> ανέπτυξαν εναλλάκτες θερμότητας αντιρροής έμμεσης εξάτμισης στηριζόμενοι σε υλικό από την εργασία του Ray (1935). Με αυτό τον τρόπο επετεύχθει αισθητή ψύξη του αέρα που πλησιάζει την θερμοκρασία dew point του αέρα περιβάλλοντος. Η μέθοδος αυτή επιστρέφει ένα μέρος (περίπου το μισό) του αέρα που έχει ψυχθεί αισθητά σαν μέσο εξάτμισης.



Εικόνα 12. Εναλλάκτες θερμότητας αντιρροής έμμεσης εξάτμισης  
πηγή: [3],[12]

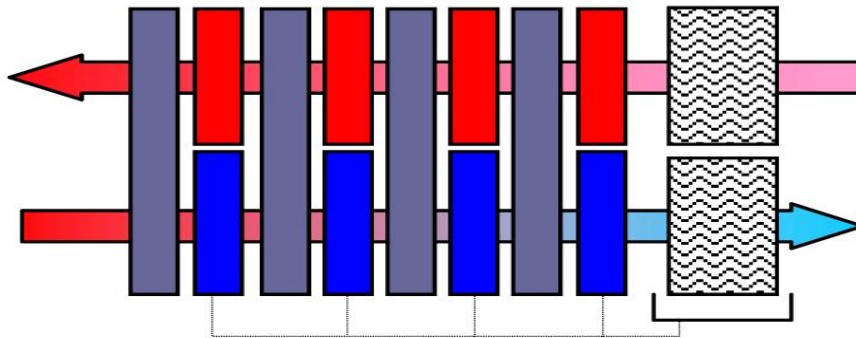
Αυτό το σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε τροχούς αφύγρανσης από τον Tsimmerman (1995) όπως φαίνεται παρακάτω για την επίτευξη πολύ χαμηλών θερμοκρασιών.



Εικόνα 13. Το σύστημα Tsimmerman και το αντίστοιχο ψυχομετρικό διάγραμμα  
πηγή [14]

### 1.2.2. Ελάττωση της θερμοκρασίας αναγέννησης

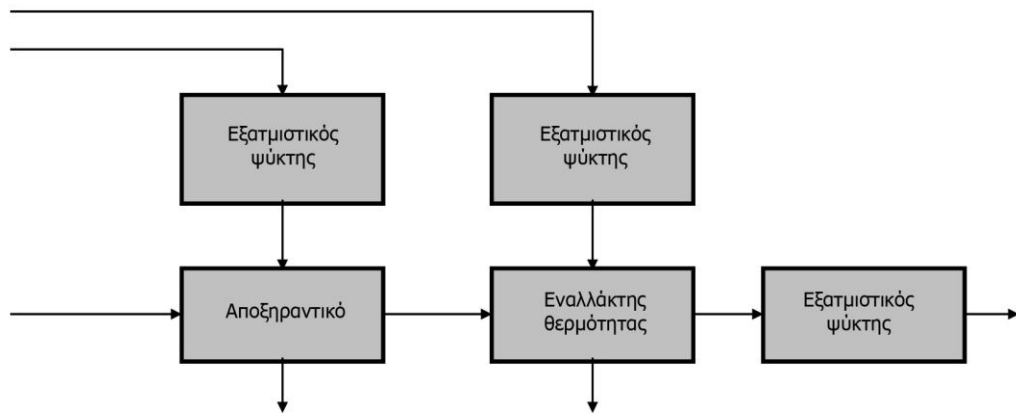
Τα υλικά αφύγρανσης απελευθερώνουν θερμότητα καθώς προσροφούν υγρασία, έτσι αυξάνουν την θερμοκρασία και ελαττώνουν την σχετική υγρασία του ρεύματος αέρα. Για να συνεχίσουν να αφυγραίνονται πρέπει να ψύχονται. Ένα σύστημα που λειτουργεί με βάση τον κύκλο Pennington θα περιελάμβανε έναν άπειρο αριθμό πολύ λεπτών τροχών αφύγρανσης με εναλλάκτες μέσα από τους οποίους περνά νερό από την αδιαβατική ψύξη.



Εικόνα 14. Ιδανικό σύστημα ψύξης με αφύγρανση

Οι ψυχόμενοι τροχοί αφύγρανσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν υλικά αφύγρανσης με πολύ υψηλά επίπεδα ισοζυγίου υγρασίας όπως το πολύ αραιό διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου. Το μέσο αφύγρανσης αυτό μπορεί να προσροφήσει πολύ μεγάλες ποσότητες υγρασίας από πολύ υγρό αέρα, αλλά δεν μπορούν να συγκρατήσουν υγρασία από τον σχετικά ξηρό αέρα. Για το λόγο αυτό δεν απαιτούν πολύ ξηρό (ζεστό) αέρα για αναγέννηση.

Οι Turner<sup>[15]</sup> και Worek πέτυχαν αφύγρανση με τροχό αφύγρανσης σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία ξηρού βολβού μέσω έμμεσης ψύξης με εξάτμιση. Η δυσκολία στο να γίνει αυτό είναι στο να βρεθεί τρόπος να μεταφέρουμε την θερμότητα από τον τροχό αφύγρανσης στον αέρα από τον εξατμιστικό ψύκτη. Εξελίσσονται πλακοειδείς εναλλάκτες που διαθέτουν επίστρωση υλικού αφύγρανσης μέσα στον ίδιο τον εναλλάκτη.

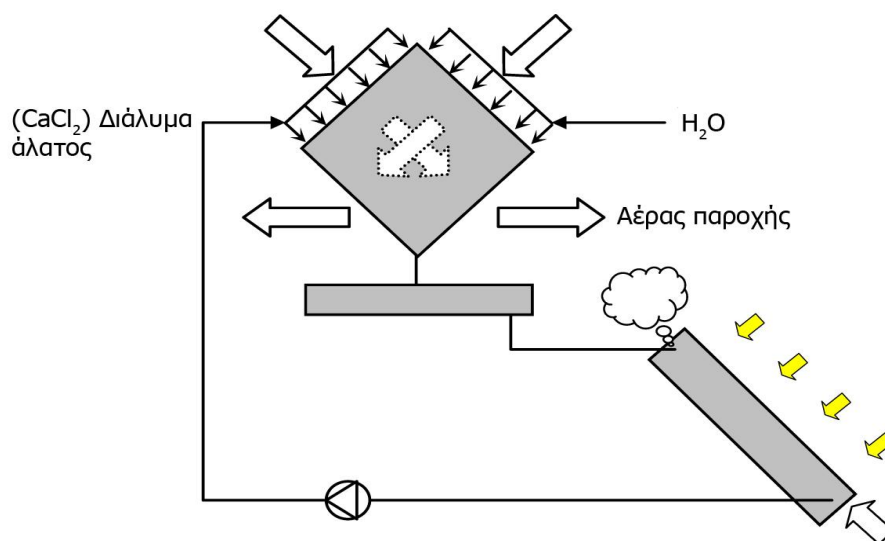


Εικόνα 16. Διάγραμμα του ιστιτούτου τεχνολογίας του Illinois για τον κύκλο ψύξης με ψυχόμενο τροχό αφύγρανσης.  
πηγή: [5]

Το ιστιτούτο τεχνολογίας του Illinois βρήκε ότι αν και αυτό βελτιώνει την διαδικασία της αφύγρανσης ωστόσο απορρίπτει την θερμότητα της αφύγρανσης που ανακτάται στον αδιαβατικό κύκλο. Για το λόγο αυτό η ολική αποδοτικότητα του συστήματος δεν βελτιώνεται και φτάνει COP 0,6.

Η τεχνολογία υγρών μέσων αφύγρανσης μπορεί να δώσει λύση που διαθέτει εσωτερική ψύξη που τα καθιστά πολύ αποδοτικά για κλιματισμό.

Το εργαστήριο Egolf et al ανέπτυξε ένα εσωτερικά ψυχόμενο σύστημα με αντιρροή υγρού μέσου αφύγρανσης ως μέρος του ευρωπαϊκού προγράμματος Eureka<sup>[16]</sup>. Αν και το πραγματικό COP του συστήματος δεν είναι γνωστό μια τέτοια λύση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για κλιματισμό με τη χρήση ηλιακής ενέργειας.

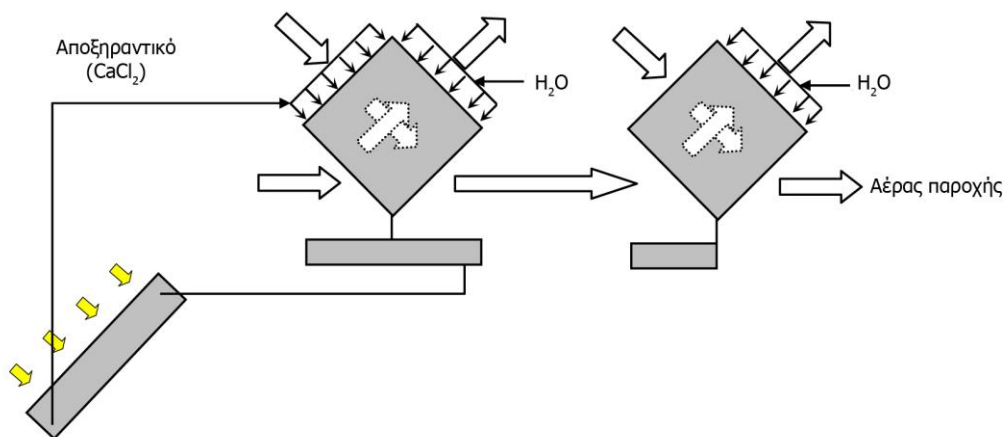


Εικόνα 17. Σύστημα ψύξης αέρα με έμμεση εξάτμιση, χρήση υγρού προσροφητικού μέσου και αναγέννηση με ηλιακά πάνελ.  
Πηγή: [16]

### 1.2.3. Απομάκρυνση του μέσου αφύγρανσης από τον αέρα παροχής.

Οι εξατμιστικοί υγραντήρες στο ρεύμα αέρα παροχής δεν είναι δημοφιλείς καθώς υπάρχει ο κίνδυνος της νόσου των λεγεωνάριων. Τα υγρά μέσα αφύγρανσης επίσης δεν είναι επιθυμητοί στο ρεύμα αέρα παροχής εξαιτίας του ενδεχόμενου μεταφοράς σταγονιδίων του μέσου αφύγρανσης στους μεταλλικούς αγωγούς με αποτέλεσμα την διάβρωση τους και για πιθανά προβλήματα υγείας για τον άνθρωπο.

Αναπτύσσονται διάφορα συστήματα που απομακρύνουν τον υγραντήρα και το μέσο αφύγρανσης από το ρεύμα αέρα παροχής. Μία εφαρμογή χρησιμοποιεί δύο εναλλάκτες θερμότητας, όπου το ρεύμα αέρα του πρώτου εναλλάκτη θερμότητας IELDAC που έχει ψυχθεί χρησιμοποιείται στον δεύτερο εναλλάκτη θερμότητας για την ψύξη ενός καθαρού ρεύματος αέρα παροχής. Αυτό το ρεύμα αέρα παροχής έτσι δεν έχει καμία επαφή ούτε με τον υγραντήρα αλλά ούτε και με το μέσο αφύγρανσης.



Εικόνα 18. Σύστημα ψύξης αέρα με έμμεση εξάτμιση, χρήση υγρού προσροφητικού μέσου και αναγέννηση με ηλιακά πάνελ και χωρίς υγραντήρα στο ρεύμα αέρα παροχής.

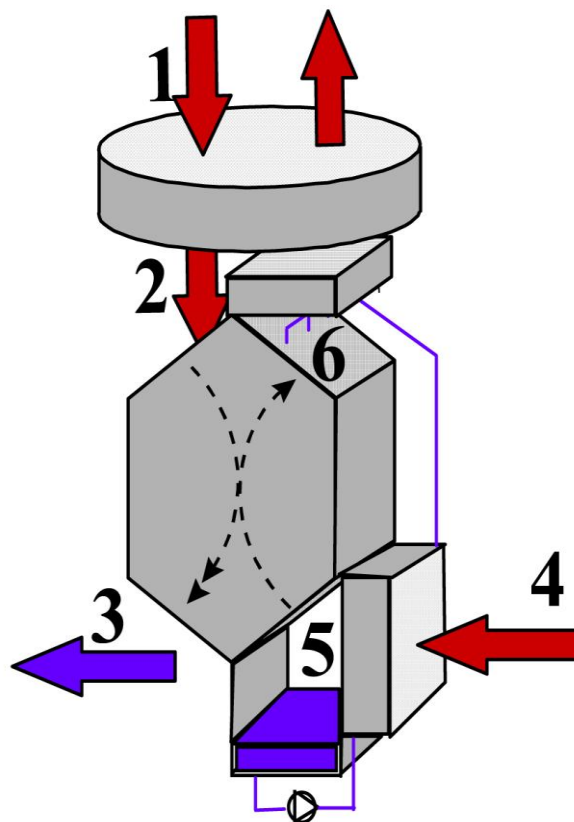
πηγή: [16]

#### 1.2.4. Μείωση του κόστους

Οι τροχοί αφύγρανσης είναι ακριβοί. Προσθέτουν περίπου 50% στο κόστος ενός συμβατικού συστήματος. Οι πλακοειδείς εναλλάκτες είναι δύσκολο να κατασκευαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να υποστηρίζουν υγρά μέσα αφύγρανσης και να ισομοιράζουν το νερό και το μέσο αφύγρανσης στην επιφάνειά τους. Με την εξέλιξη στον χώρο και στις τεχνικές κατασκευής τέτοιων εναλλακτών θα μειωθεί δραστικά το κόστος κατασκευής τους.

#### 1.3. Σύγχρονες εξελίξεις

Η σύγχρονη τεχνολογία έχει συνδυάσει τις παραπάνω απαιτήσεις δημιουργώντας ένα αποδοτικό και ταυτόχρονα φθινό και υγιεινό σύστημα.



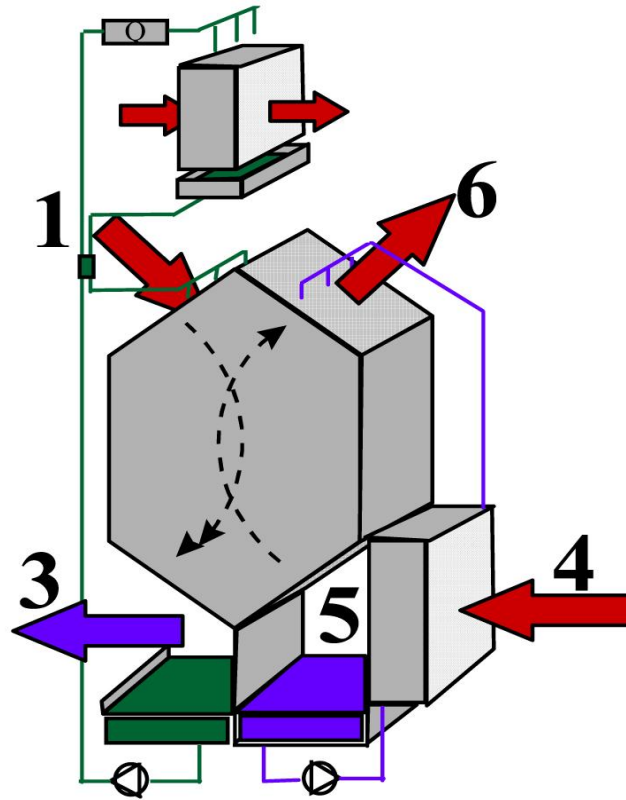
Εικόνα 19. Ο κύκλος Van-Zyl 1  
πηγή: [4]

Το σύστημα αφύγρανσης που παρουσιάζεται παραπάνω αποτελείται από:

- ▲ ένα τροχό αφύγρανσης με αναγεννητή (παρόμοιο με τον κύκλο Pennington)
- ▲ έναν πλακοειδή εναλλάκτη αντιρροής έμμεσης εξάτμισης (CIEHX)
- ▲ έναν εναλλάκτη 8-10 στηλών
- ▲ ένα δοχείο συλλογής νερού και μια μικρή αντλία για την μεταφορά του νερού στον εναλλάκτη και το ψέκασμα του CIEHX

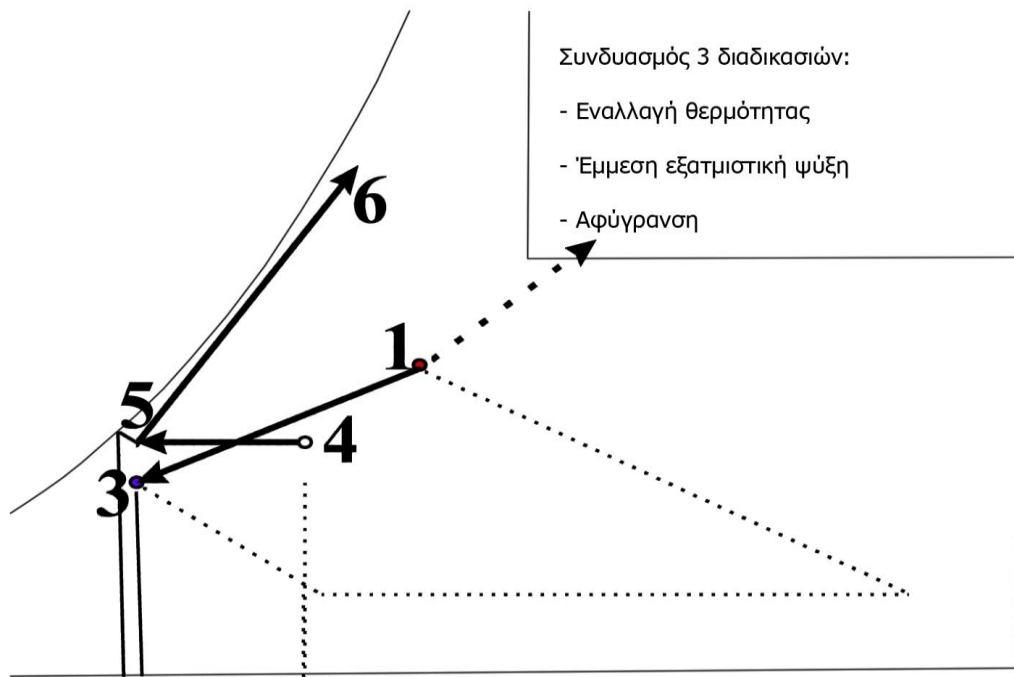


μειωμένη αφύγρυνση σημαίνει ότι απαιτείται και μικρότερη ποσότητα αέρα αναγέννησης. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πιο "αδύναμο" μέσο αφύγρυνσης κάτι που θα μειώσει την απαιτούμενη ενέργεια αναγέννησης που σημαίνει ότι βελτιώνεται η αποδοτικότητα του συστήματος.



Εικόνα 21: Κύκλος Van-Zyl 2  
πηγή: [4]

Η καινοτόμος δημιουργία που παρουσιάζεται παραπάνω χρησιμοποιεί διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου σαν υγρό μέσο προσρόφησης για την περαιτέρω βελτίωση του COP, κυρίως σε χαμηλές θερμοκρασίες αναγέννησης.



Εικόνα 22: Ψυχομετρική ανάλυση του κύκλου Van-Zyl 2  
πηγή: [4]

Το υγρό μέσο προσρόφησης στάζει στο ρεύμα αέρα κατάστασης 1 και συλλέγεται σε δοχείο συλλογής στην κατάσταση 3. Το μέσο προσρόφησης αναγεννάται με την θέρμανση του και τον ψεκάσμό του στον ρεύμα αέρα εξόδου (6) ή σε νέα ποσότητα φρέσκου αέρα όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα.

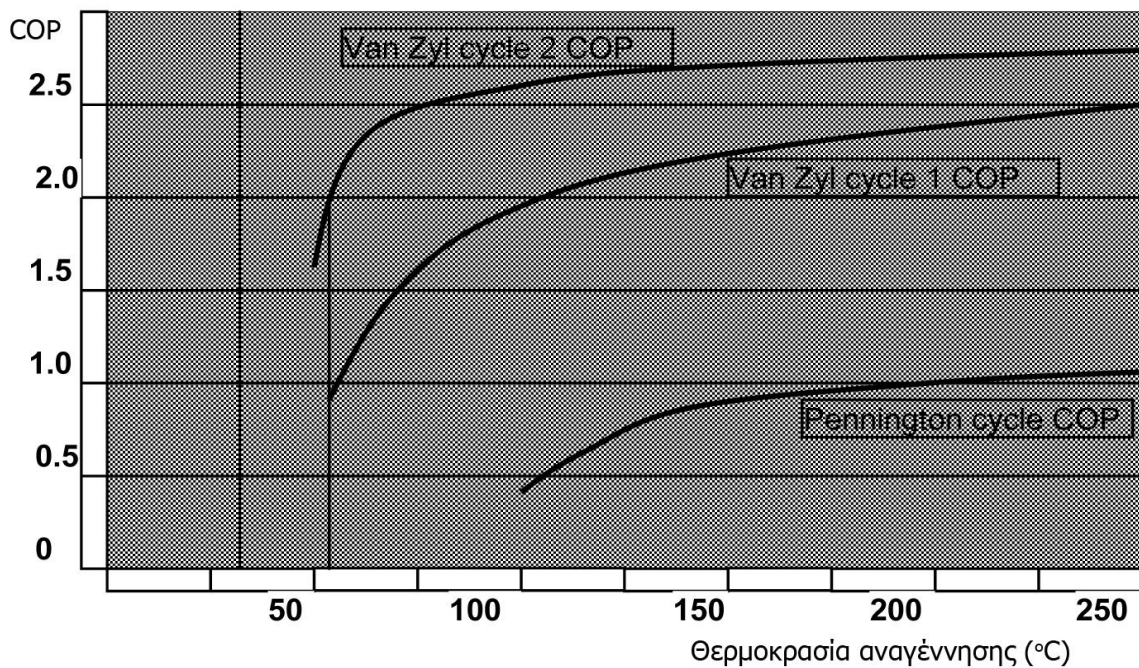
Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της καινοτομίας είναι η μεγάλη αποδοτικότητα της μονάδας ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Ο αέρας ψύχεται και ταυτόχρονα αφυγραίνεται από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 3 στον εναλλάκτη θερμότητας. Με αυτό τον τρόπο η σχετική υγρασία του αέρα στο ρεύμα αέρα 1-3 αυξάνεται αντί να μειώνεται κατά την αφύγρανση. Αυτή η αύξηση της σχετικής υγρασίας έχει κάποιες πολύ σημαντικές επιπτώσεις:

- ✦ Η ικανότητα του μέσου προσρόφησης να προσροφά υγρασία από το ρεύμα αέρα παραμένει υψηλή, κάτι που μειώνει σημαντικά την απαιτούμενη ποσότητα μέσου προσρόφησης που απαιτείται να χρησιμοποιηθεί.
- ✦ Δεύτερον, καθώς η διαδικασία πραγματοποιείται σε υψηλότερη σχετική υγρασία από τον αέρα περιβάλλοντος, το μέσο προσρόφησης μπορεί θεωρητικά να αναγεννηθεί από τον αέρα περιβάλλοντος χωρίς να απαιτείται να του προσδώσουμε θερμότητα
- ✦ Τρίτον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα προσρόφησης με μεγάλη ικανότητα προσρόφησης καθώς θα απαιτούν πολύ μικρότερη ενέργεια για την αναγέννηση τους.

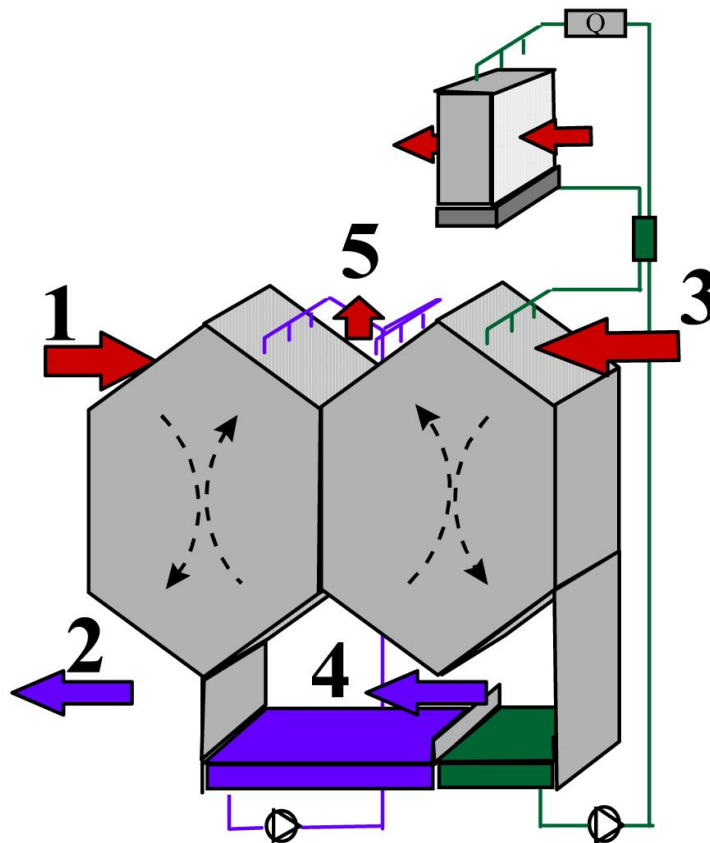
Η βελτίωση του COP φαίνεται παρακάτω. Όταν ο καιρός είναι πιο ξηρός, απαιτείται μικρότερη ποσότητα μέσου προσρόφησης έως του σημείου που δεν απαιτείται καθόλου. Κατά την διάρκεια του χειμώνα ο εναλλάκτης θερμότητας αντιρροφεί προσφέρει ανάκτηση θερμότητας.

Ο συντελεστής συναπόδοσης του συστήματος παρουσιάζεται στο γράφημα παρακάτω. Η καλή αποδοτικότητα του συστήματος στις χαμηλές θερμοκρασίες το κάνει ιδανικό για χρήση με θερμότητα από λέβητες, φωτοβολταϊκά και στην συμπαραγωγή εργοστασίων.



Εικόνα 23: Γράφημα COP σε σχέση με την θερμοκρασία αναγέννησης  
πηγή: [4]

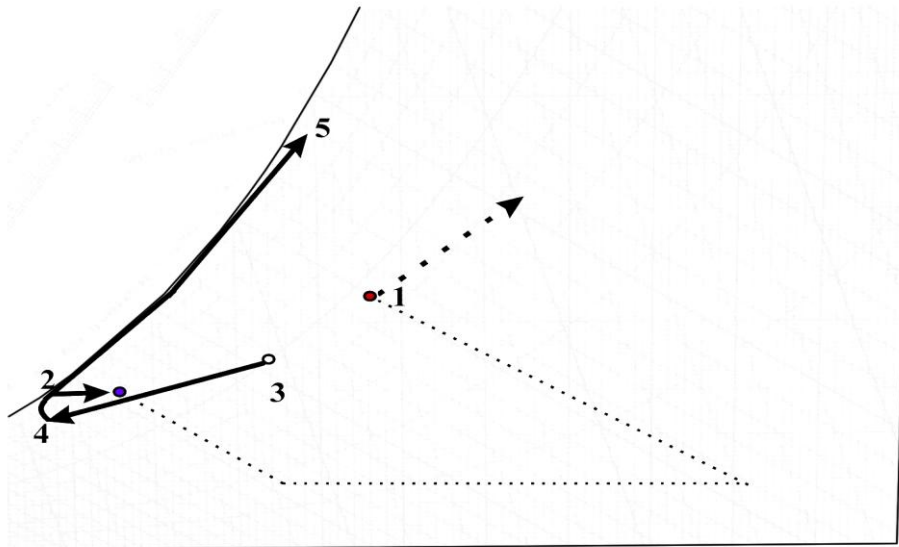
Το σύστημα παρακάτω παρέχει λύση στο να μην περνάει το μέσο προσρόφησης στο ρεύμα παροχής αέρα. Το ρεύμα αέρα παροχής ψύχεται και αφυγραίνεται από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 χωρίς καμία επαφή με το νερό ή το μέσο προσρόφησης.



Εικόνα 24. Σύστημα ψύξης με αφύγρανση αντιρροής με έμμεση εξάτμιση.  
Πηγή [4]

Σε αυτή την διαφοροποίηση του δεύτερου κύκλου Van-Zyl χρησιμοποιούνται δύο μονάδες CIEHX. Το ρεύμα εξόδου του αέρα (3) αφυγραίνεται από ένα υγρό μέσο προσρόφησης και ψύχεται στην δεξιά μονάδα CIEHX (4). αυτό το ψυχρό ρεύμα αέρα διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα τα οποία ρέουν προς τα πάνω μέσα από τις πλευρές υγρού των δύο εναλλακτών θερμότητας (5). καθώς αυτά τα δύο ρεύματα αέρα ρέουν προς τα πάνω το νερό εξατμίζεται παρέχοντας έμμεση ψύξη με εξάτμιση του ρεύματος αέρα που κατεβαίνει. Το μέσο προσρόφησης αναγεννάτε με θέρμανση του και ψεκασμό σε ένα ρεύμα αέρα περιβάλλοντος ή στο ρεύμα εξόδου αέρα κατάστασης 5.

Το πλεονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι ότι αφαιρούμε το μέσο προσρόφησης από το ρεύμα αέρα παροχής. Έτσι αυτή η εφαρμογή καθίσταται μια πολύ καλή μέθοδος για την υγιεινή ψύξη και αφύγρανση του αέρα.



Εικόνα 25. Ψυχομετρική απεικόνιση του συστήματος ψύξης με αφύγρανση αντιρροής με έμμεση εξάτμιση.

#### 1.4. Πρακτικές εφαρμογές

Είναι γεγονός ότι πολλά υλικά αφύγρανσης συλλέγουν κοινούς ρυπαντές καθώς απορροφούν τους ατμούς νερού από τον αέρα. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πολλά υποσχόμενο για τις εφαρμογές κλιματισμού όπου η ποιότητα του αέρα του χώρου είναι πολύ σημαντική.

Όπως ο εξαερισμός των κτιρίων πρέπει να διατηρείται σε κάποιο επίπεδο για την εξασφάλιση υγιεινού περιβάλλοντος έτσι και το επίπεδο υγρασίας θα πρέπει να διατηρείται επαρκώς χαμηλά ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη μικροοργανισμών που προκαλούν ασθένειες και αναπνευστικά προβλήματα.

Ο διεθνής οργανισμός υγείας προτείνει μέγιστο επίπεδο υγρασίας 7g/kg για την αποφυγή ανάπτυξης μικροοργανισμών.

Ο ρυθμός εξαερισμού στους χώρους γραφείων δεν έχει υπολογιστεί με βάση τις ανάγκες της αναπνοής των ανθρώπων αλλά για τον έλεγχο των οσμών, της υγρασίας και άλλων λιγότερο σημαντικών λόγων. Το κόστος ενέργειας του μηχανικού εξαερισμού υπολογίζεται περίπου στα 10 ευρώ ανά τετραγωνικό μέτρο τον χρόνο, την στιγμή που ο μέσος μισθός των υπαλλήλων που δουλεύουν στους χώρους αυτούς αντιστοιχεί σε 2500 ευρώ ετησίως. Είναι φανερό ότι αξίζει να δαπανηθεί μεγαλύτερο ποσό για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας αέρα που θα παρέχει ένα υγιές περιβάλλον για τους εργαζομένους το οποίο θα βελτιώσει και την παραγωγικότητα του.

Ας θεωρήσουμε ένα τυπικό χώρο γραφείων όπου αντιστοιχούν 10 τετραγωνικά μέτρα χώρου για κάθε ένα άτομο και η διείσδυση αέρα το καλοκαίρι είναι 0,5 αλλαγές αέρα/ώρα. Το λανθάνον φορτίο που προστίθεται στον χώρο είναι περίπου 9,6 W/m<sup>2</sup> με την χρήση εξαερισμού 1,8l/s ανά τετραγωνικό μέτρο (θεωρώντας 50% παραπάνω από τις ελάχιστες απαιτήσεις εξαερισμού) σημαίνει

ότι στο χώρο προστίθεται υγρασία 1,8g/kg αέρα.

Πυκνότητα ατόμων ανά m <sup>2</sup>	Πρόσθετο λανθάνον φορτίο w/m <sup>2</sup>	Προσθήκη υγρασίας σε g/kg	Σημείο δρόσου του χώρου	Σχετική υγρασία του χώρου %
0	-	-	6	38
1 ανά 10	9,6	1,8	9	45
1 ανά 7,5	11,3	2,12	9,6	48
1 ανά 5	15,1	2,64	10	50
1 ανά 2,5	26,1	4,9	14,1	65

Πίνακας 1

Αν αναγάγουμε αυτά τα δεδομένα για διάφορες τιμές τετραγωνικών μέτρων που αντιστοιχούν ανά άτομο παρατηρούμε πώς αυτό επιδρά στο σημείο δρόσου και στην υγρασία του χώρου (πίνακας 1). Όπως φαίνεται η υγρασία του ρεύματος αέρα παροχής για ένα χώρο στους 21°C θα είναι 5,2g/kg (7g/kg που προτείνει ο διεθνής οργανισμός υγείας αφαιρώντας 1,8 που είναι η υγρασία που προστίθεται από τα άτομα στον χώρο). Αυτό οδηγεί σε έναν χώρο με 35% υγρασία όταν δεν βρίσκονται άτομα σε αυτόν και σε έναν χώρο με 65% σχετική υγρασία όταν υπάρχουν αρκετά άτομα σε αυτό.

Αυτό το παράδειγμα δείχνει πόσο εύκολα μπορεί να χαθεί ο έλεγχος υγρασίας και οι συνθήκες άνεσης σε κάποιο γραφείο που χρησιμοποιείται περιστασιακά για συμβούλια.

Η χρήση συστημάτων με μέσα προσρόφησης επιτυγχάνεται εύκολα το επιθυμητό επίπεδο υγρασίας και μειώνεται η ανάγκη ψύξης νερού για τον κλιματισμό.

### 1.5. Σύγκριση συστημάτων

Το COP των συστημάτων προσρόφησης σε συμβατικές εφαρμογές είναι αρκετά χαμηλό μέχρι και 0,5. Τα πρόσφατα συστήματα όμως διατείνονται ότι φτάνουν μέχρι και COP της τάξης του 3.

Τα συστήματα προσρόφησης μπορούν να διαχειριστούν περίπου το 50% των εσωτερικών φορτίων (αισθητά και λανθάνοντα) για την μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου χρησιμοποιώντας μόνο εξατμιστική ψύξη του αέρα εξόδου και ένα τροχό θέρμανσης. Κατά την διάρκεια του χειμώνα μέχρι και 85% της θέρμανσης και ύγρυνσης του αέρα περιβάλλοντος παρέχεται με την χρήση του προσροφητή για αισθητή και λανθάνουσα ανάκτηση θερμότητας.

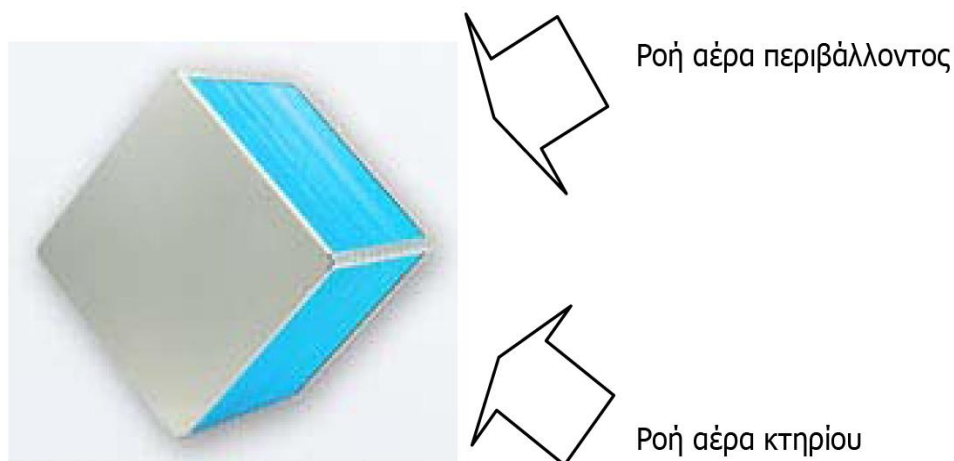
Η συνολική επένδυση σε ένα σύστημα προσρόφησης είναι περίπου 20% μικρότερο από ένα συμβατικό σύστημα, το κόστος χρήσης είναι 30% μικρότερο, ενώ καταλαμβάνουν και περίπου τον ίδιο χώρο.

Καθώς τα συστήματα προσρόφησης χρησιμοποιούν θερμότητα σαν πηγή ενέργειας έχουν μικρότερη επίπτωση στο περιβάλλον 2,5 φορές μικρότερη από τα ηλεκτρικά συστήματα. Το όφελος είναι ακόμα μεγαλύτερο όταν χρησιμοποιούνται ηλιακά πάνελ ή θερμότητα απόρριψης σε εργοστάσια συμπαραγωγής.

### 1.6. Σύγχρονα και μελλοντικά προϊόντα

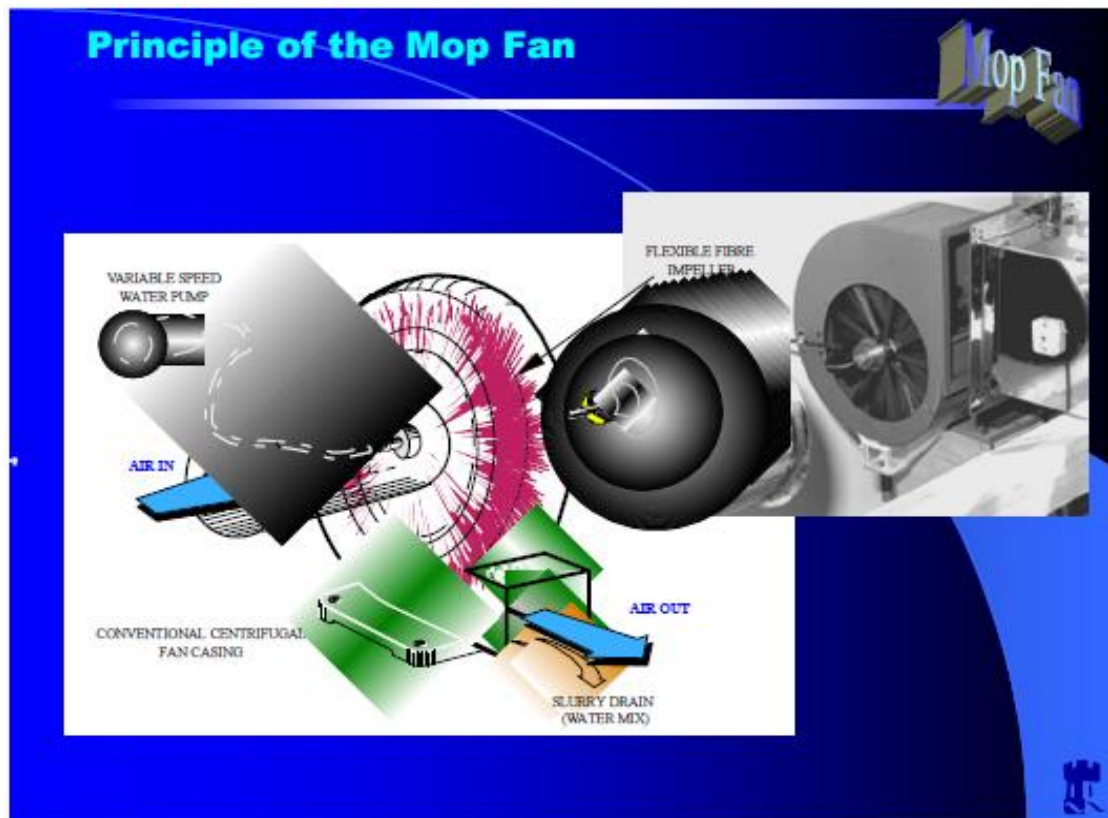
Ένας κατασκευαστής στον Καναδά δουλεύει σε έναν πλακοειδή εναλλάκτη ενθαλπίας που χρησιμοποιεί ένα νέο πολυμερές υλικό το οποίο περιλαμβάνει ένα νέο μέσο προσρόφησης. Το σύστημα αυτό έχει συνολική απόδοση μέχρι και 50% ενώ λειτουργεί σε θερμοκρασίες ως 80°C. Ο εναλλάκτης ενθαλπίας ανακτά την θερμότητα και την υγρασία από το ένα ρεύμα αέρα στο άλλο χωρίς να έχει κινούμενα μέρη.

Κατά την περίοδο θέρμανσης περνά τον αέρα περιβάλλοντος από έναν πλακοειδή εναλλάκτη στους 0°C, τον υγραίνει και τον θερμαίνει στους 18°C με τον υγρό και θερμό αέρα από το κτίριο στους 22°C. Τους καλοκαιρινούς μήνες ο υγρός θερμός αέρας από τους 35°C ψύχεται και αφυγραίνεται στους 26°C με ξηρό αέρα από το κτίριο στους 24°C.



Εικόνα 26. Πολυμερής εναλλάκτης θερμότητας αντιρροής.

Μια ακόμα πρωτοποριακή ιδέα είναι αυτή ενός ανεμιστήρα τριπλής λειτουργίας που αναπτύσσεται από το πανεπιστήμιο του Nottingham. Η τριπλή λειτουργία του ανεμιστήρα περιλαμβάνει την συγκράτηση της σκόνης στα ρεύματα αέρα, μεταφορά αέρα για ύγρανση ή αφύγρανση και ανακυκλοφορία αέρα. Αυτός ο ανεμιστήρας χρησιμοποιείται σε σύστημα προσρόφησης για ψύξη, ύγρανση, αφύγρανση, καθαρισμό και παροχή αέρα. Αυτό το σύστημα μπορεί να ψύχει τον αέρα από τους 35 στους 17°C με την χρήση ενός τέτοιου ανεμιστήρα με απόδοση 51%.



Εικόνα 27. Ανεμιστήρας τριπλής λειτουργίας του πανεπιστημίου του Nottingham.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΕΣ

### 2.1. Εισαγωγή

Στα συστήματα ψύξης με προσρόφηση τα οποία μπορούν να τροφοδοτηθούν από χαμηλής βαθμίδας θερμότητα και που χρησιμοποιούν ψυκτικά ρευστά με μηδενικούς δείκτες ODP και GWP άρχισε να υπάρχει ενδιαφέρον από την δεκαετία του 1990 ακόμα. Σε σχέση με την ψύξη με απορρόφηση που μπορεί επίσης να τροφοδοτηθεί από χαμηλής βαθμίδας θερμότητα, η ψύξη με προσρόφηση διαθέτει κάποια πλεονεκτήματα:

1. Τα συστήματα προσρόφησης έχουν πολύ μεγάλο εύρος θερμοκρασίας που μπορούν να δουλέψουν. Θερμοκρασίες της τάξεως των 50 βαθμών Κελσίου είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν σε αντίθεση με τα συστήματα απορροφήσεως τα οποία απαιτούν ελάχιστη θερμοκρασία τουλάχιστον 70 βαθμούς Κελσίου ακόμα και για τις υλοποιήσεις δύο σταδίων. Επίσης σε περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας (500 βαθμοί Κελσίου) στα συστήματα προσρόφησης δεν έχουμε κανένα πρόβλημα να χρησιμοποιήσουμε απευθείας την θερμότητα από τέτοιες πηγές ενώ στα συστήματα απορροφήσεως θα παρουσιαστεί έντονη διάβρωση από τους 200 βαθμούς Κελσίου και πάνω.
2. Τα συστήματα προσρόφησης με στερεό απορροφητή μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε συνθήκες υψηλών κραδασμών όπως για παράδειγμα στα πλοία. Τα συστήματα απορροφήσεως δεν έχουν αυτή την δυνατότητα καθότι το απορροφητικό μέσο είναι υγρό και ενδέχεται να υπάρξει ροή από το μέσο προσρόφησης προς τον συμπυκνωτή που καθιστά το ψυκτικό ρευστό μολυσμένο και το σύστημα δεν δουλεύει σωστά.
3. Τα συστήματα προσρόφησης είναι πιο απλά στην κατασκευή τους.

Η διαδικασία της προσρόφησης χωρίζεται στην φυσική προσρόφηση και την χημική προσρόφηση. Η φυσική προσρόφηση προκαλείται από τις δυνάμεις Van der Waals μεταξύ των μορίων του προσροφητή(adsorbent) και του προσροφούμενου μέσου (adsorbate). Η φυσική προσρόφηση του προσροφητή αναπτύσσει την επιλεκτικότητα του σε συγκεκριμένο προσροφούμενο μέσο μετά από ειδική επεξεργασία του τελευταίου.

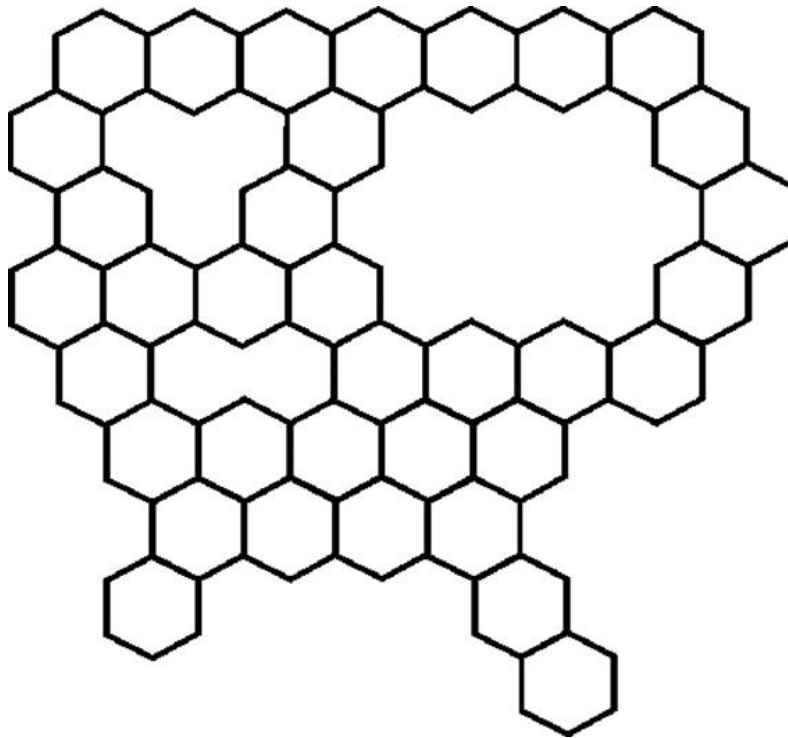
Η χημική προσρόφηση πραγματοποιείται μεταξύ του προσροφούμενου μέσου και τα μόρια της επιφάνειας του προσροφητή. Κατά την χημική προσρόφηση έχουμε πάντα μεταφορά ηλεκτρονίων, επαναδιάταξη των ατόμων και δημιουργία χημικών δεσμών. Μόνο ένα στρώμα του προσροφούμενου μέσου αντιδρά με τα μόρια της επιφάνειας του προσροφητή. Μετά την προσρόφηση όλα τα μόρια που λαμβάνουν μέρος δεν κρατούν ποτέ την αρχική τους κατάσταση.

## 2.2. Φυσικοί προσροφητές

Οι πιο συνηθισμένοι προσροφητές για τα συστήματα ψύξης με προσρόφηση είναι ο ενεργός άνθρακας, τα ενεργά ανθρακονήματα, silica gel και οι ζεόλιθοι.

### 2.2.1. Ενεργός άνθρακας και ενεργά ανθρακονήματα

Ο ενεργός άνθρακας αποτελείται από υλικά όπως ξύλο, άνθρακας, ορυκτό πετρέλαιο, κόκκαλα, τύρφη. Η δομή του ενεργού άνθρακα φαίνεται στην εικόνα 28. Οι μικροκρύσταλλοι ενεργού άνθρακα από κόκκαλα είναι δακτύλιοι έξι ατόμων άνθρακα και η ικανότητα προσρόφησης τους επηρεάζεται από τις ενώσεις αυτόν τον δακτυλίων άνθρακα. Για παράδειγμα οι ενώσεις αρενίου αυξάνουν την ικανότητα προσρόφησης ενώ οι σουλφονικές ενώσεις την ελαττώνουν. Οι όξινες ενώσεις αυξάνουν την ικανότητα προσρόφησης επιλεκτικά. Η ειδική επιφάνεια του ενεργού άνθρακα είναι μεταξύ 500 και 1500 m<sup>2</sup>/g



Εικόνα 28. Δομή του ενεργού άνθρακα  
πηγή: [29]

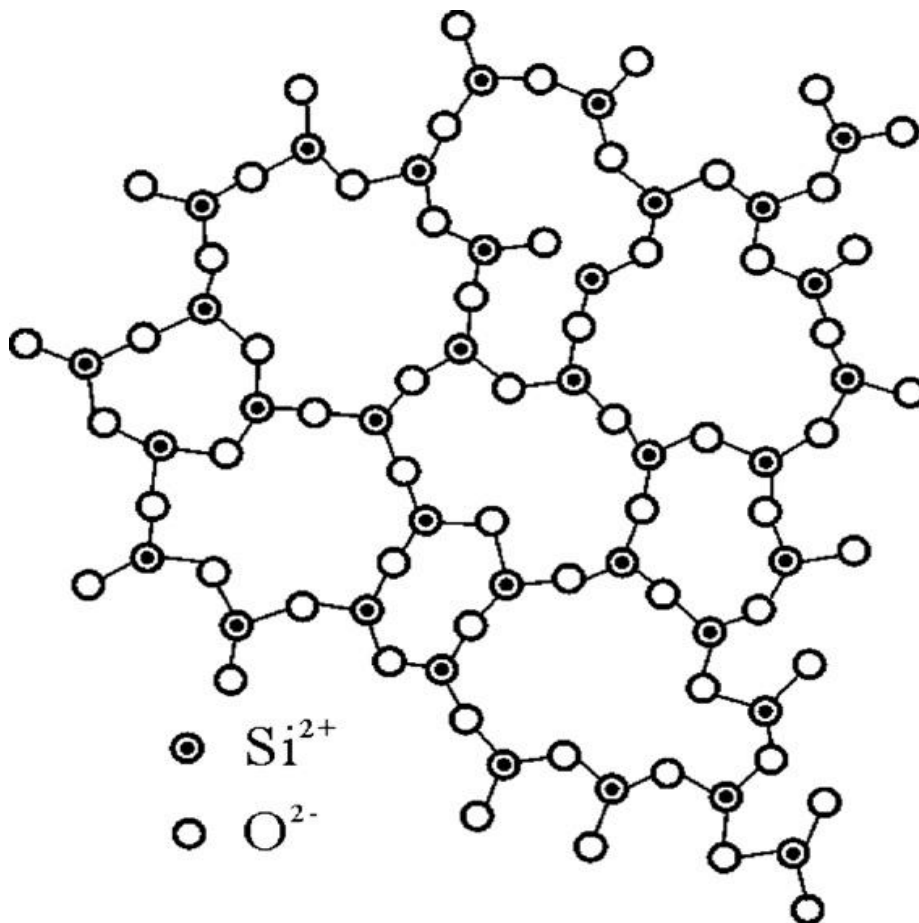
Η δομή των πόρων του ενεργού άνθρακα αποτελείται από ακανόνιστα κανάλια τα οποία έχουν μεγαλύτερες πορώδεις περιοχές στην επιφάνεια της δομής και μικρότερες πορώδεις περιοχές μέσα στην δομή. Η διαφορά του ενεργού άνθρακα από άλλους προσροφητές είναι αυτό η επιφάνειά του. Όλη η επιφάνεια του ενεργού άνθρακα καλύπτεται από οξειδία και κάποια ανόργανα υλικά που σημαίνει ότι δεν έχει πολικότητα ή έχει πολύ μικρή. Η θερμότητα προσρόφησης των ζευγών με ενεργό άνθρακα είναι χαμηλότερη των άλλων ζευγών φυσικών

προσροφητών.

Τα ενεργά ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται στην παραγωγή υφασμάτων όπως ρούχα, χαρτομάντιλα κτλ. Σε σύγκριση με τον ενεργό άνθρακα σε κόκκους, τα ενεργά ανθρακονήματα έχουν μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια, οι πόροι των ενεργών ανθρακονημάτων είναι πιο ομοιόμορφη από τον ενεργό άνθρακα και η μεταφορά θερμότητας είναι επίσης καλύτερη. Τα μειονεκτήματα των ενεργών ανθρακονημάτων είναι η ανισοτροπική θερμική αγωγιμότητα και η μεγαλύτερη θερμική αντίσταση μεταξύ των ινών και του προσροφητή σε σχέση με τον ενεργό άνθρακα σε μορφή κόκκων.

### 2.2.2. Silica-gel

Το silica-gel είναι ένας τύπου άμορφου συνθετικού πυριτίου. Είναι ένα άκαμπτο συνεχές δίκτυο κολλοειδούς πυριτίου (εικόνα 29), που συνδέεται με πολύ μικρούς κόκκους  $\text{SiO}_4$ . Το υδροξύλιο στην δομή είναι το κέντρο προσρόφησης γιατί είναι πολικό και μπορεί να δημιουργήσει δεσμούς υδρογόνου με πολικά οξείδια όπως το νερό και οι αλκοόλες. Η ικανότητα προσρόφησης του silica-gel αυξάνει όσο αυξάνει η πολικότητά του. Ένα υδροξύλιο μπορεί να απορροφήσει ένα μόριο νερού.

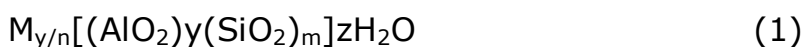


Εικόνα 29. Συστοιχία των  $\text{SiO}_4$  στο silica-gel  
πηγή: [31]

Κάθε είδος silica-gel έχει μόνο έναν τύπο πόρων οι οποίοι συνήθως περιορίζονται σε στενά κανάλια. Η διάμετρος των πόρων του silica-gel είναι 2 με 3 nm (τύπος A) και 0,7nm (τύπος B), και η ειδική επιφάνειά του είναι περίπου 100-1000 m<sup>2</sup>/g. Το silica-gel χρησιμοποιείται ευρέως για αφύγρανση λόγω της μεγάλης ικανότητας προσρόφησης που έχει. Το silica-gel τύπου A μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις συνθήκες ενώ ο τύπος B μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν η σχετική υγρασία είναι μεγαλύτερη από 50%.

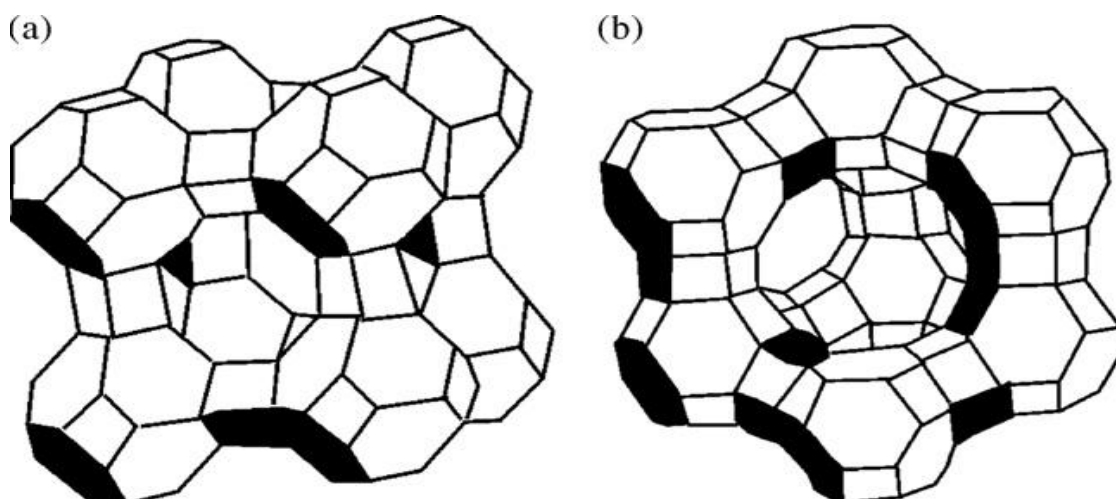
### 2.2.3. Ζεόλιθοι

Οι ζεόλιθοι είναι ένας τύπος αργιλοपुरιτικών κρυστάλλων που αποτελούνται από αλκάλια. Ο χημικό τύπος των ζεόλιθων είναι:



όπου  $y$  και  $m$  είναι ακέραιοι αριθμοί και το πηλίκιο  $m/y$  είναι μεγαλύτερο του 1.  $n$  είναι το χημικό σθένος των θετικών ιόντων του  $M$ ,  $z$  είναι ο αριθμός των μορίων νερού μέσα σε ένα κρυσταλλικό κελί.

Ένα κρυσταλλικό κελί ζεόλιθου φαίνεται στην εικόνα 30. Τα ανιόντα πρέπει να έχουν ηλεκτρική ισορροπία με το ηλεκτρικό φορτίο του ατόμου του αργιλίου. Το καθαρό ηλεκτρικό φορτίο του κάθε ατόμου αργιλίου είναι -1. Το νερό μπορεί να αφαιρεθεί με θέρμανση. Ο αργιλοपुरιτικός σκελετός έχει διαμόρφωση κελιού και συνδέεται συνήθως με τρόπο που δημιουργεί έξι παράθυρα και μπορούν να απορροφήσουν μεγάλες ποσότητες επιπλέον μορίων.



Εικόνα 30. Κρυσταλλικά κελιά ζεόλιθου: α) ζεόλιθος τύπου A, β) ζεόλιθος τύπου X ή Y

πηγή: [29]

Υπάρχουν περίπου 40 τύποι φυσικών ζεόλιθων και οι κυριότεροι τύποι για ψύξη με προσρόφηση είναι chabazite, sodium chabazite, cowlesite και faujasite. Περίπου 150 τύποι ζεόλιθων μπορούν να συντεθούν τεχνητά και ονομάζονται με ένα γράμμα ή ένα γκρουπ γραμμάτων όπως τύπος A, τύπος X, τύπος Y, τύπος ZSM κτλ.

Οι τεχνητά κατασκευασμένοι ζεόλιθοι είναι πιο ακριβοί από τους φυσικούς, αλλά έχουν καλύτερη μεταφορά θερμότητας. Η ικανότητα προσρόφησης των ζεόλιθων σχετίζεται με το ποσοστό μεταξύ πυριτίου και αργίλιο και είναι μεγαλύτερο όσο αυτή η αναλογία είναι μικρότερη.

Το μέγεθος των πόρων των ζεόλιθων καθορίζει την επιλεκτικότητα προσροφούμενων μέσων και η δομή κελιού των μικροπόρων επιτρέπει την διαδικασία της προσρόφησης σε μικρό εύρος. Οι τεχνητά κατασκευασμένοι ζεόλιθοι έχουν μικροπόρους με ομοιόμορφα μεγέθη και διάφορα μεγέθη μπορούν να επιτευχθούν με διαφορετικές μεθόδους κατασκευής. Οι 4A, 5A, 10X και 13X είναι οι κύριοι τύποι που χρησιμοποιούνται για ψύξη με προσρόφηση. Η θερμότητα προσρόφησης και εκρόφησης των ζευγών ζεόλιθων είναι υψηλές. Η θερμοκρασία εκρόφησης είναι επίσης υψηλή και περίπου 250-300°C. Η δομή των περισσότερων ζεόλιθων αποδομείται σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 600-700°C. Οι ζεόλιθοι χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα κλιματισμού με προσρόφηση με πηγές θερμότητας μεταξύ 200 και 300°C.

### 2.3. Χημικοί προσροφητές

Οι χημικοί προσροφητές αποτελούνται κυρίως από χλωρίδια, υδρίδια και οξειδία μετάλλων.

#### 2.3.1. Χλωρίδια μετάλλων

Τα χλωρίδια μετάλλων για ψύξη με προσρόφηση είναι κυρίως το χλωρίδιο του ασβεστίου, το χλωρίδιο του στρόντιου, το χλωρίδιο του μαγνησίου και το χλωρίδιο του βáriου. Η αντίδραση προσρόφησης μεταξύ των χλωριδίων μετάλλων και των ψυκτικών ρευστών είναι μία χημική αντίδραση που δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς.

Ο ομοιοπολικός δεσμός είναι διαφορετικός αν το στοιχείο είναι σε άλλη περίοδο στον πίνακα στοιχείων. Σύμφωνα με την θεωρία των ομοιοπολικών δεσμών το κεντρικό άτομο παρέχει από κοινού τροχιά για ένα ζεύγος ηλεκτρονίων που παρέχεται από έναν υποκαταστάτη για τον σχηματισμό του δεσμού. Για τα χημικά στοιχεία που ανήκουν στην δεύτερη περίοδο για παράδειγμα Li(I), Be(II), B(III) έχουν 4 ελεύθερες τροχιές με 2s, 2px, 2py και 2pz. Οι

προσοφητές για ψύξη με προσρόφηση όπως οι  $K(I)$ ,  $Rb(I)$ ,  $Cs(I)$ ,  $Ca(II)$ ,  $Sr(II)$  είναι κυρίως στοιχεία της τέταρτη πέμπτης και έκτης περιόδου και η αντίδραση μεταξύ του προσροφητή και του προσροφούμενου μέσου είναι πιο πολύπλοκη γιατί αποτελούν μεταβατικά μέταλλα. Για τα χλωρίδια των μετάλλων που έχουν κανονική δωδεκαεδρική δομή μπορεί να σχηματιστεί η τροχιά  $sp^3d^4$ .

Η αμμωνία είναι το σύνηθες προσροφούμενο μέσο των χλωριδίων μετάλλων. Κατά την διαδικασία προσρόφησης παρατηρείται συσσώρευση αλάτων που επηρεάζει την μεταφορά μάζας και θερμότητάς τους.

### **2.3.2. Άλατα και οξειδία μετάλλων**

Το υδρογόνο μπορεί να αντιδράσει σχεδόν με όλα τα στοιχεία και σχηματίζει 3 ειδών υδρίδια. Ο πρώτος τύπος αποτελείται από υδρίδια αλάτων, όπως το  $LiH$  και το  $CaH_2$ , που μπορούν να σχηματιστούν από την αντίδραση μεταξύ των υδρογόνων και των στοιχείων των ομάδων IA και IIA εξαιτίας της χαμηλής ηλεκτραρνητικότητας τους και της υψηλής χημικής δραστηριότητας. Τα υδρίδια των μετάλλων είναι ο δεύτερος τύπος. Άτομα υδρογόνου διεισδύουν στον δικτύωμα ενός μετάλλου αντιδρούν με τα μεταβατικά μέταλλα και σχηματίζουν υδρίδια μετάλλων. Οι άλλοι τύποι υδριδίων είναι τα ομοιοπολικά υδρίδια και τα υδρίδια μη μεταλλικών μορίων.

Τα υδρίδια αλάτων και μετάλλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ψύξη με προσρόφηση. Τα υδρίδια αλάτων έχουν εξαγωνική δικτυωτή κρυσταλλική δομή με μεγάλη πυκνότητα. Κατά την διαδικασία της προσρόφησης άτομα H μετατρέπονται σε πρωτόνια όταν εισέρχονται στον χώρο μεταξύ των εξαγωνικών κρυστάλλων. Η κίνηση των ηλεκτρονίων είναι παρόμοια με αυτή στους μεταλλικούς δεσμούς.

### **2.3.3. Οξειδία μετάλλων**

Τα οξειδία μετάλλων χρησιμοποιούνται συνήθως σαν καταλύτες για την οξείδωση και αποοξείδωση. Όταν τα μεταλλικά οξειδία σαν προσροφητές σε αντλίες θερμότητας με προσρόφηση τότε το οξυγόνο είναι το ψυκτικό ρευστό. Στην επιφάνεια των οξειδίων των μετάλλων τα στοιχεία που επηρεάζουν την απόδοση της προσρόφησης είναι η κατεύθυνση των χημικών δεσμών στην επιφάνεια του χημικού υλικού, τα χαρακτηριστικά συμμετρίας των μεταβατικών μετάλλων, ο αριθμός ηλεκτρονίων του μετάλλου και η δομή τους.

## 2.4. Ισοζύγιο των μοντέλων προσρόφησης

Το ισοζύγιο μάζας προσρόφησης είναι η ποσότητα ψυκτικού ρευστού που απορροφάται από τον προσροφητή όταν ο χρόνος τείνει στο άπειρο, και είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τα ζεύγη προσρόφησης. Τα ισοζύγια προσρόφησης για τους φυσικούς και τους χημικούς προσροφητές είναι διαφορετικά. Στην φυσική προσρόφηση το ισοζύγιο είναι διβάθμιο και εξαρτάται από την πίεση και την θερμοκρασία ενώ στην χημική προσρόφηση είναι μονοβάθμιο και εξαρτάται μόνο από μία παράμετρο.

### 2.4.1. Ισοζύγιο για φυσική προσρόφηση

Το ισοζύγιο για την φυσική προσρόφηση είναι μία συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης του απορροφούμενου μέσου και η γενική της μορφή είναι

$$x_{\infty} = f(p, T) \quad (2)$$

Ισοζύγια με διαφορετικές σταθερές παραμέτρους είναι τα

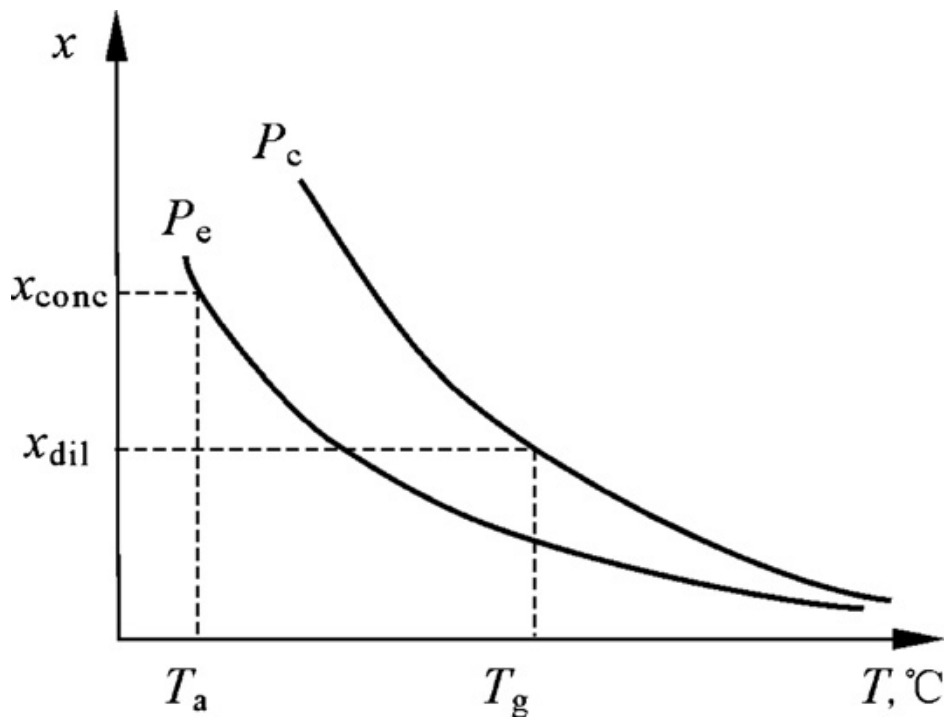
$$x_{\infty} = f(p)_T \quad \text{ισοθερμοκρασιακό} \quad (3)$$

$$x_{\infty} = f(T)_p \quad \text{ισοβαρές} \quad (4)$$

$$p = f(T)_x \quad \text{ισόογκο} \quad (5)$$

Το ισοθερμοκρασιακό μοντέλο χρησιμοποιείται μόνο για πολύ μικρές ποσότητες γιατί δεν μπορεί να επιτευχθεί αν η ποσότητα προσρόφησης είναι μεγάλη γιατί τότε και η θερμότητα προσρόφησης είναι μεγάλη. Το ισοβαρές μοντέλο είναι πιο κατάλληλο για τον σχεδιασμό ψυκτικών συστημάτων με προσρόφηση γιατί η ποσότητα που εκροφάται και προσροφάται κατά την διάρκεια ενός κύκλου είναι εύκολο να υπολογιστεί. Το ισόογκο μοντέλο είναι βολικό για τον υπολογισμό της θερμότητας προσρόφησης και συνήθως χρησιμοποιείται για την επιλογή του κατάλληλου ζεύγους λειτουργίας.

Οι καμπύλες του ισοζυγίου προσρόφησης για φυσική προσρόφηση φαίνονται στην εικόνα 31, όπου  $P_e$  είναι η πίεση εξάτμισης και  $P_c$  είναι η πίεση συμπύκνωσης. Όπως παρατηρούμε στην εικόνα 31 η ποσότητα προσρόφησης εξαρτάται από δύο παραμέτρους, την πίεση και την θερμοκρασία.



Εικόνα 31. Καμπύλες ισοζυγίου προσρόφησης υπό σταθερή πίεση συμπύκνωσης και εξάτμισης  
πηγή: [39-41]

Το ισοζύγιο της ποσότητας προσρόφησης εκρόφησης των φυσικών προσροφητών υπολογίζεται συνήθως με τις σχέσεις Dubinin-Astakhov (D-A):

$$x = x_0 \exp[-k(T/T_s - 1)^n] \quad (6)$$

$$\text{ή} \\ x = x_0 \exp[-D(\ln P_s/P)^n] \quad (7)$$

όπου  $x_0$ ,  $k$ ,  $D$  και  $n$  είναι συντελεστές που είναι διαφορετικοί όχι μόνο για διαφορετικά ζεύγη αλλά και για το ίδιο ζεύγος λειτουργίας ανάλογα με τον τύπο του προσροφητή.  $T$  είναι η θερμοκρασία προσρόφησης (K),  $T_s$  είναι η θερμοκρασία κορεσμού του ψυκτικού ρευστού (K),  $P_s$  είναι η πίεση κορεσμού του ψυκτικού μέσου,  $P$  είναι η πίεση του συστήματος (PA) και  $x$  είναι η ποσότητα προσρόφησης του ψυκτικού μέσα στον προσροφητή (kg/kg)

#### 2.4.2. Ισοζύγιο για χημική προσρόφηση

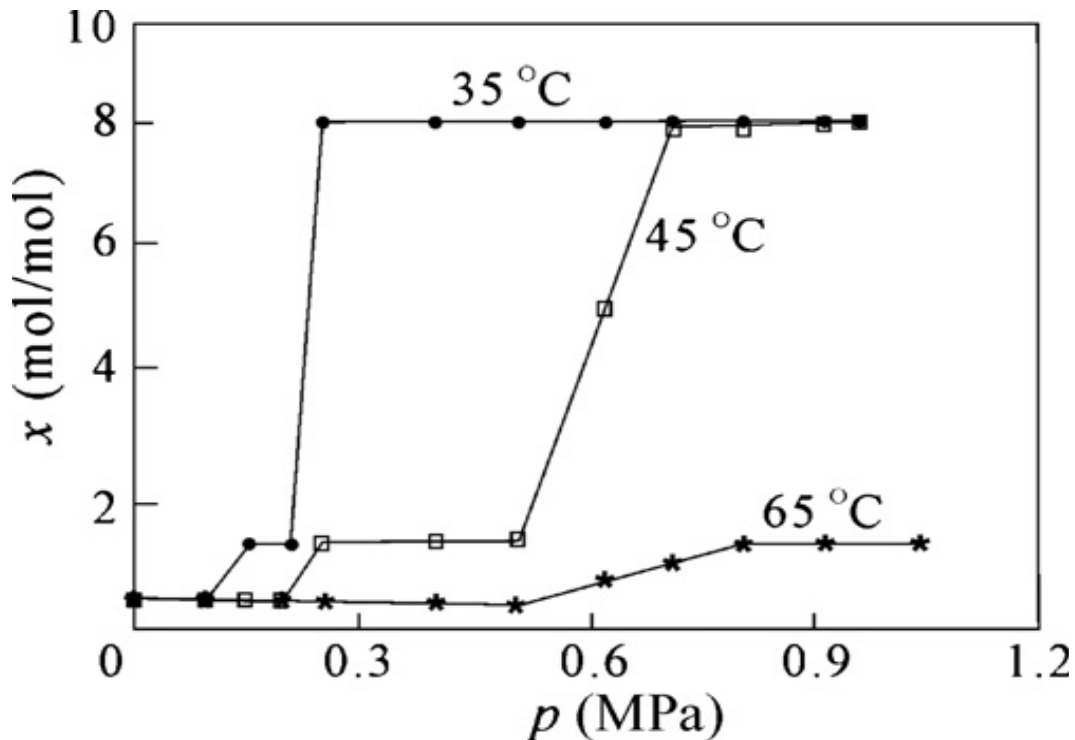
Το ισοζύγιο για χημική προσρόφηση είναι:

$$p = f(T)_{\text{προσροφητή}} \quad x_\infty = x_n \quad (8)$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός mole ψυκτικού ρευστού που προσροφάται.

Η αλλαγή της ποσότητας που προσροφάται στην χημική προσρόφηση γίνεται σε βήματα όπως φαίνεται στην εικόνα 32. Η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να

προσροφηθεί δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την στοιχειομετρική τιμή δηλαδή, όταν το σύστημα ισορροπήσει σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία, η αύξηση της πίεσης δεν αυξάνει την ποσότητα που προσροφάται.

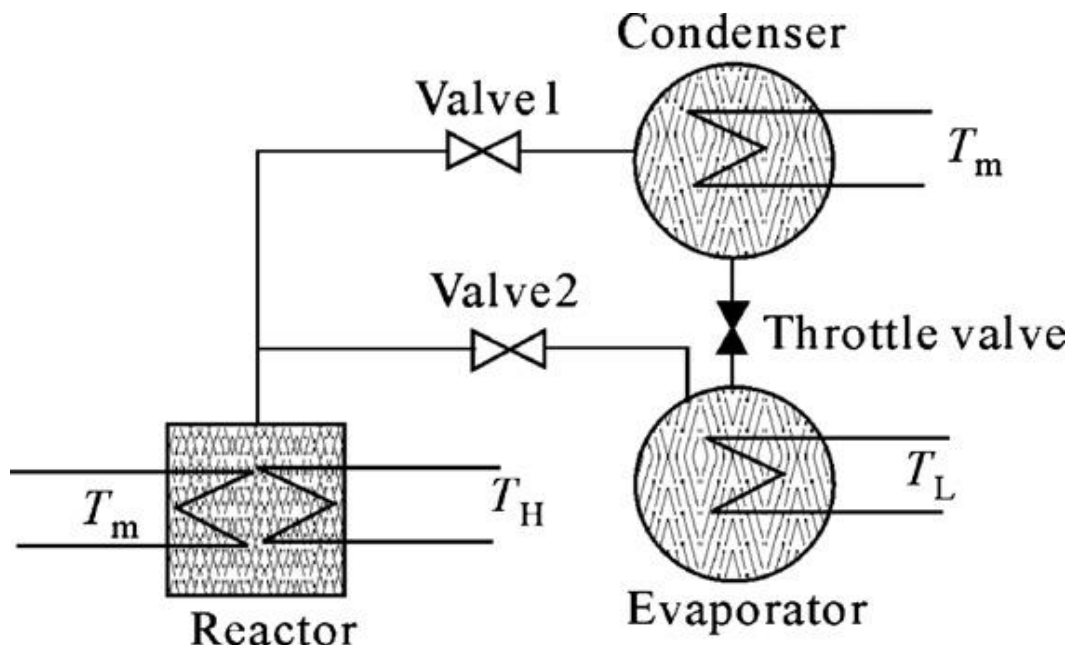


Εικόνα 32. Οι καμπύλες προσρόφησης για το ζεύγος  $\text{SrCl}_2\text{-NH}_3$   
πηγή: [68]

## 2.5. Ζεύγη λειτουργίας προσρόφησης

### 2.5.1. Περιγραφή του κύκλου

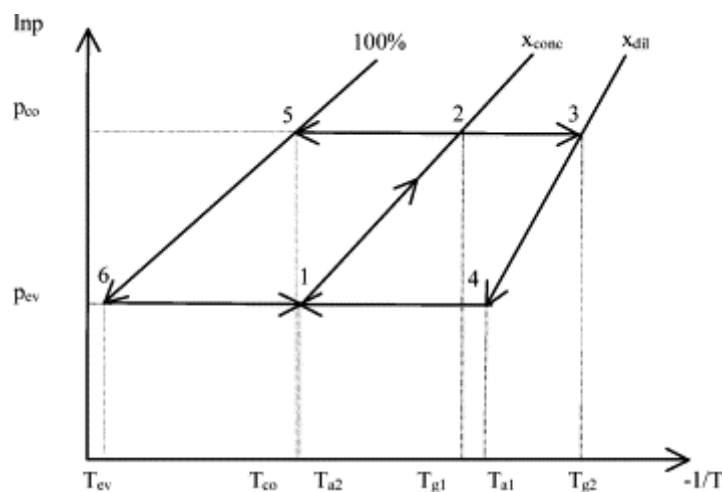
Ένας κύκλος προσρόφησης αποτελείται από 4 βήματα και χωρίζεται σε 2 φάσεις: εκρόφηση και συμπύκνωση, εξάτμιση και προσρόφηση. Στην πρώτη φάση ένας προσροφητής σε συνδυασμό με έναν συμπυκνωτή θερμαίνεται από μία πηγή θερμότητας σε θερμοκρασία  $T_H$ . Η βαλβίδα 1 (εικόνα 33) ανοίγει και ο ατμό ψυκτικού ρευστού ρέει από τον προσροφητή στον συμπυκνωτή. Θεωρητικά, αυτή η φάση τελειώνει όταν η εκρόφηση έχει ολοκληρωθεί. Στην αρχή της δεύτερης φάσης η βαλβίδα μεταξύ του εναλλάκτη και του συμπυκνωτή είναι κλειστή. Ο προσροφητής ψύχεται από ένα ρευστό ψύξης σε θερμοκρασία  $T_m$  και η πίεση πέφτει, όταν η πίεση είναι χαμηλότερη από την πίεση εξάτμισης η βαλβίδα που συνδέει τον εξατμιστή και τον προσροφητή ανοίγει και ξεκινά η φάση της προσρόφησης. Το αέριο που καταναλώνεται από την προσρόφηση δίνεται από την εξάτμιση του ψυκτικού ρευστού στον εξατμιστή, όπου παράγεται ψύξη σε θερμοκρασία  $T_L$ . Θεωρητικά αυτή η φάση τερματίζεται όταν ο προσροφητής κορεστεί.



Εικόνα 33. Βασικός κύκλος ψύξης με προσρόφηση

### 2.5.2. Φυσική προσρόφηση

Οι δυνάμεις προσρόφησης που παρατηρούνται στους φυσικούς προσροφητές είναι δυνάμεις van de Waals. Δεν περιλαμβάνουν μεταβολή των τροχιών των ηλεκτρονίων. Το διάγραμμα Clapeyron για τους φυσικούς προσροφητές φαίνεται στην εικόνα 34. Οι φάσεις θέρμανσης και ψύξης είναι ισόογκες σε ιδανικές συνθήκες ενώ οι φάσεις προσρόφησης και εκρόφησης είναι ισοβαρείς.



Εικόνα 34. Ψυκτικό κύκλος προσρόφησης (διάγραμμα Clapeyron)

Τα ζεύγη που έχουν μελετηθεί περισσότερο είναι ενεργός άνθρακας(ή ενεργά ανθρακονήματα)/ μεθανόλη, ενεργός άνθρακας/ αμμωνία, silica-gel/ νερό και ζεόλιθοι/ νερό.

### 2.5.3. Ενεργός άνθρακας ή ενεργά ανθρακονήματα και μεθανόλη ή αμμωνία.

Η διαδικασία προσρόφησης των ζευγών ενεργού άνθρακα/μεθανόλης και ενεργού άνθρακα/αμμωνίας είναι παρόμοια και περιλαμβάνουν την πλήρωση και συμπύκνωση του προσροφούμενου μέσου μέσα στους πόρους του προσροφητή. Η προσρόφηση συντελείται κυρίως σε μικροπόρους με ειδικό όγκο περίπου  $0,15-1.5\text{cm}^3\text{g}^{-1}$ , σε έκταση περίπου 95% της συνολικής επιφάνειας του ενεργού άνθρακα. Οι μέσοι και μεγάλοι πόροι εξυπηρετούν στην μεταφορά των μορίων του προσροφούμενου μέσου στους μικροπόρους.

Το ζεύγος ενεργού άνθρακα/ μεθανόλης έχει μεγάλη δυνατότητα προσρόφησης και με χαμηλή θερμότητα προσρόφησης περίπου 1800-2000 kJ/kg. Καθώς η κατανάλωση θερμότητας στην φάση εκρόφησης καθορίζεται από την θερμότητα προσρόφησης, η χαμηλή τιμή της θερμότητας προσρόφησης βελτιώνει το COP του συστήματος. Το συγκεκριμένο ζεύγος λειτουργίας είναι επίσης πολύ καλό για χρήση με ηλιακή ενέργεια καθώς έχει θερμοκρασία εκρόφησης χαμηλή περίπου  $100^\circ\text{C}$ . Θερμοκρασίες μεγαλύτερες από  $120^\circ\text{C}$  θα πρέπει να αποφεύγονται γιατί παρατηρείται αποδόμηση της μεθανόλης. Το ζεύγος ενεργού άνθρακα/ μεθανόλης ωστόσο λειτουργεί σε πίεση χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής. Αυτό καθιστά αναγκαία την δημιουργία κενού στο σύστημα που το χρησιμοποιεί κάτι που αυξάνει το κόστος κατασκευής και καθιστά και το σύστημα λιγότερο αξιόπιστο καθώς και μία μικρή ποσότητα αέρα να εισέλθει στο σύστημα επηρεάζει πολύ αρνητικά την απόδοση του συστήματος.

$$\text{COP} = Q_{\text{cool}}/Q_{\text{drive}} \quad (9)$$

όπου  $Q_{\text{cool}}$  είναι η παραγωγή ψύχους και  $Q_{\text{Drive}}$  η θερμότητα που παρέχεται

Οι συντελεστές στην εξίσωση D-A για τον ενεργό άνθρακα και την μεθανόλη είναι:

$$x_0=0.45, \quad k=13.38, \quad n=1.5 \quad (10) \quad [45]$$

Το ζεύγος ενεργού άνθρακα/ αμμωνίας έχει παρόμοια θερμότητα προσρόφησης με το ζεύγος ενεργού άνθρακα/ μεθανόλης αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι λειτουργεί σε υψηλότερη πίεση περίπου 16 bar με θερμοκρασία συμπύκνωσης  $40^\circ\text{C}$ . Χάρη στην υψηλότερη πίεση λειτουργίας η μεταφορά μάζας είναι καλύτερη και έτσι μπορεί να ελαττωθεί ο χρόνος του κύκλου προσρόφησης. Επίσης το ζεύγος ενεργού άνθρακα/ αμμωνίας έχει την δυνατότητα να εκμεταλλευτεί και πηγές θερμότητας σε θερμοκρασία  $200^\circ\text{C}$  και πάνω. Τα μειονεκτήματα αυτού του ζεύγους είναι η τοξικότητα και έντονη μυρωδιά της αμμωνίας, η ασυμβατότητα της αμμωνίας με τους χάλκινους σωλήνες και η μικρότερη ποσότητα προσρόφησης ανά κύκλο σε σχέση με το ζεύγος ενεργού άνθρακα/ μεθανόλης στις ίδιες συνθήκες.

Για τον ενεργό άνθρακα η μέγιστη ποσότητα προσρόφησης με μεθανόλη σαν ψυκτικό μέσο είναι  $0.45\text{kg/kg}$  ενώ με την αμμωνία είναι μόνο  $0.29\text{kg/kg}$ .

Οι συντελεστές της εξίσωσης D-A (6) για τον ενεργό άνθρακα και την αμμωνία είναι:

$$x_0=0.29, \quad k=3.57, \quad n=1.38 \quad (11) \quad [45]$$

#### 2.5.4. Silica gel και νερό

Στην διαδικασία προσρόφησης μεταξύ του νερού και του silica gel το μόριο του νερού ενώνεται με την υδροξύλιο του silica gel όσο η επιφάνεια κάλυψης είναι μικρή. Όσο αυτή μεγαλώνει ο δεσμός υδρογόνου είναι αυτός που συγκρατεί το νερό. Η θερμότητα προσρόφησης για αυτό το ζεύγος είναι περίπου 2500 kJ/kg και η θερμοκρασία εκρόφησης μπορεί να είναι πολύ χαμηλή από 50°C και πάνω. Περίπου 4-6% της μάζας του νερού συνδέεται με ένα υδροξύλιο στην επιφάνεια του silica gel και δεν μπορεί να αφαιρεθεί γιατί διαφορετικά το silica gel θα έχανε την ικανότητα προσρόφησης του. Για το λόγο αυτό η θερμοκρασία εκρόφησης δεν πρέπει να ξεπερνάει τους 120°C και γενικά είναι χαμηλότερη από 90°C.

Ερευνητές στην Ιαπωνία έχουν αναπτύξει ένα σύστημα προσρόφησης τριών σταδίων με χρήση silica gel/ νερού το οποίο τροφοδοτείται από πηγή θερμότητας στους 50°C. Αντίστοιχα στην Σαγκάη έχει κατασκευαστεί ψύκτης προσρόφησης που λειτουργεί με πηγή θερμότητας 55°C. Η δυνατότητα χρησιμοποίησης πηγής θερμότητας τόσο χαμηλής θερμοκρασίας κάνει το ζεύγος silica gel/ νερό ιδανικό για χρήση με ηλιακή ενέργεια.

Ένα μειονέκτημα του ζεύγους αυτού είναι η μικρή ποσότητα προσρόφησης η οποία είναι περίπου 0,2kg/kg. Επίσης δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για εξάτμιση σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από 0°C.

Οι συντελεστές στην εξίσωση D-A (7) για το ζεύγος silica-gel/ νερό είναι:

$$n=1.7 \quad x_0=0.35 \quad D=6 \times 10^{-6} \quad [44]$$

#### 2.5.5. Ζεόλιθοι/ νερό

Η δομή και ο μηχανισμός προσρόφησης των διαφόρων ζεόλιθων (zeolites) είναι διαφορετικός. Για παράδειγμα οι ζεόλιθοι τύπου A, X και Y έχουν δομή οκταέδρου και σχηματίζουν δομή κελιού. Στο εσωτερικό των κελιών μπορούν να προσροφηθούν 24 μόρια νερού. Η δομή των ζεόλιθων X και Y είναι παρόμοια με αυτή των φυσικών ζεόλιθων. Ο όγκος των πόρων των ζεόλιθων X και Y είναι μεγαλύτερος από τους άλλους τύπους και μπορούν μετά την προσρόφηση να έχουν έως και 235 μόρια νερού στην κρυσταλλική δομή τους.

Το ζεύγος αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κλιματισμό με αφύγρανση ή σε συστήματα ψύξης με προσρόφηση. Η θερμότητα προσρόφησης τους είναι μεγαλύτερη από το ζεύγος silica gel/ νερό και είναι περίπου 3300-4200 kJ/kg. Το ζεύγος ζεόλιθων/ νερού είναι σταθερό στις υψηλές θερμοκρασίες επιτρέποντας του να χρησιμοποιηθεί σε ανάκτηση θερμότητας από πηγές και πάνω από 200°C. Η ισοθερμοκρασιακή της προσρόφησης δεν επηρεάζεται πολύ

από την πίεση συμπύκνωσης κι έτσι μπορεί να λειτουργήσει σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών συμπύκνωσης χωρίς μεγάλη διαφορά στην απόδοσή του. Εξαιτίας της υψηλής θερμότητας προσρόφησης και της υψηλής θερμοκρασίας εκρόφησης το ζεύγος αυτό έχει χειρότερη απόδοση από το ζεύγος ενεργού άνθρακα / μεθανόλης σε μέσες και χαμηλές θερμοκρασίες πηγής θερμότητας αλλά αν η πηγή θερμότητας που διαθέτουμε είναι σε θερμοκρασία 200°C και πάνω έχει καλύτερο συντελεστή COP.

Τα μειονεκτήματα τους ζεύγους ζεόλιθων/ νερού είναι αντίστοιχα του ζεύγους silica gel/νερό. Δεν υπάρχει η δυνατότητα να κατέβουμε κάτω από τους 0°C εξάτμιση και εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας πηγής θερμότητας που απαιτεί και τις υψηλής θερμότητας προσρόφησης του ζεύγους για μία συγκεκριμένη πηγή ο χρόνος του ολοκλήρωσης του κύκλου για το ζεύγος ζεόλιθου/ νερού είναι μεγαλύτερος από τα άλλα ζεύγη.

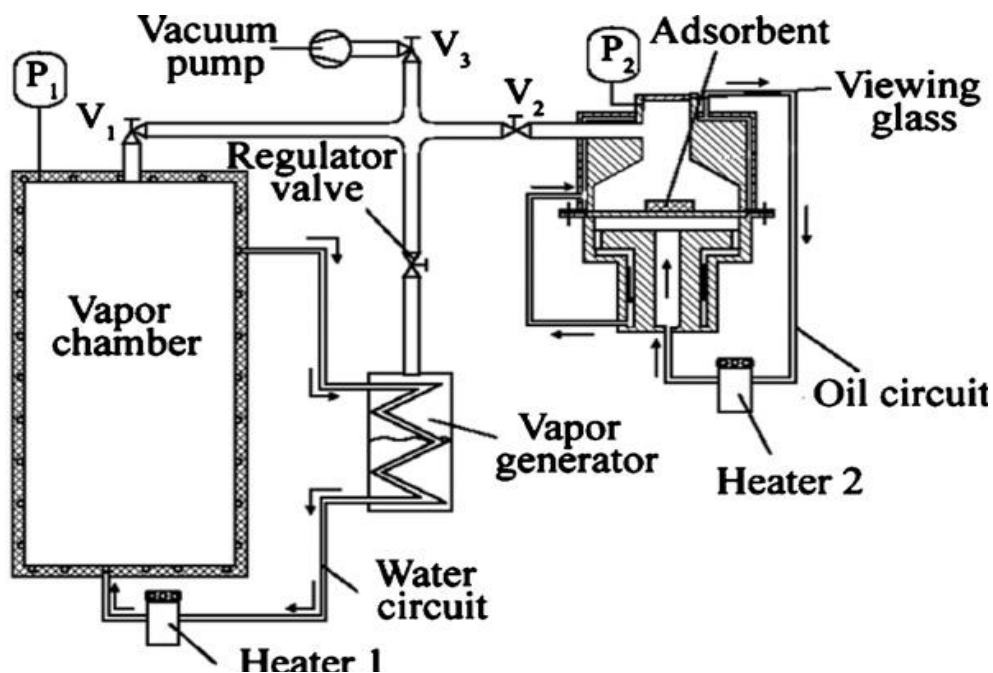
Οι συντελεστές στην εξίσωση D-A (6) για το ζεύγος ζεόλιθου νερού είναι:

$$x_0=0.261 \quad k=5.36 \quad n=1.73 \quad [50]$$

## **2.6. Μέθοδοι για την μέτρηση της απόδοσης της προσρόφησης.**

Η ποσότητα που μπορεί να προσροφηθεί πρέπει να μετρηθεί σε κατάσταση ισορροπίας αλλά και σε κατάσταση μη ισορροπίας για να εκτιμηθεί η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να προσροφηθεί/ εκροφηθεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες και σε πόσο χρόνο πραγματοποιείται αυτή η διαδικασία. Αυτή η έρευνα είναι απαραίτητη για την εκτίμηση της απόδοσης ψύξης που έχουν οι διάφοροι προσροφητές. Η μέτρηση της ποσότητας που μπορεί να προσροφηθεί μπορεί να γίνει με ογκομετρικές, βαρυτικές ή χρωματογραφικές μεθόδους. Η θερμότητα προσρόφησης μετράται συνήθως με θερμιδόμετρο. Η ογκομετρική και σταθμική μέτρηση χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του ρυθμού προσρόφησης. Το θερμιδόμετρο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των θερμοδυναμικών και κινητικών παραμέτρων των διάφορων ζευγών προσρόφησης. Η ποσότητα προσρόφησης μπορεί να εκτιμηθεί με χρωματογραφία αερίου καθότι η θερμική αγωγιμότητα του αερίου αλλάζει με την πυκνότητα, που αλλάζει κατά την προσρόφηση ή εκρόφηση. Λόγω της δυσκολίας εφαρμογής αυτής της μεθόδου συνήθως δεν χρησιμοποιείται.

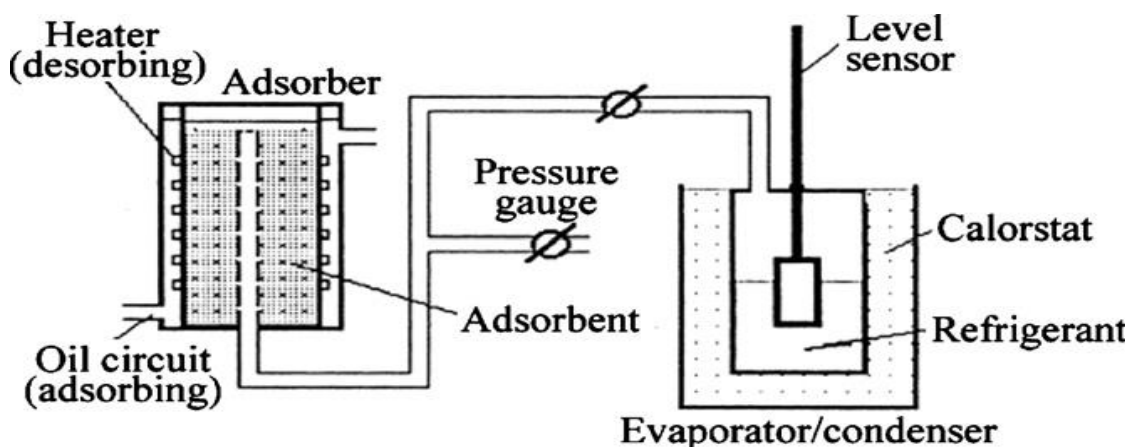
Σε έναν τύπο ογκομετρικής μεθόδου, η μεταβολή της μάζας υπολογίζεται από την μεταβολή της πίεσης σε ένα δοχείο γνωστού όγκου. Ο τρόπος λειτουργίας αυτής της μεθόδου φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 8. Η θερμοκρασία του κορεσμένου ρευστού ελέγχεται και ο ατμός που παράγεται ρέει προς τον θάλαμο αποθήκευσης. Ένας εναλλάκτης νερού ελέγχει τη θερμοκρασία μέσα στον θάλαμο. Η θερμοκρασία προσρόφησης/ εκρόφησης επίσης ελέγχεται. Η ποσότητα που προσροφάται υπολογίζεται από τις τιμές P1 και P2 κατά την προσρόφηση και εκρόφηση και τον όγκο του θαλάμου. Για να πάρουμε ακριβή αποτελέσματα, ο όγκος του θαλάμου, ο όγκος του ατμού μέσα στην προσροφητή και η μάζα του προσροφητή θα πρέπει να είναι μικρά. Η μάζα του προσροφητή στην εικόνα 35 είναι μόλις 3 γραμμάρια.



Εικόνα 35. Πειραματική μονάδα ογκομετρικής μεθόδου  
πηγή: [59]

Άλλος τρόπος ογκομετρικής μεθόδου υπολογίζει την ποσότητα που προσροφάται ή εκροφάται με την μέτρηση της διαφοράς του όγκου ενός δοχείου. Η μεταβολή του όγκου μπορεί να γίνει είτε μετρώντας την μεταβολή στην στάθμη του δοχείου είτε με μαγνητοπεριοριστικούς αισθητήρες.

Μία μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιεί αισθητήρα στάθμης παρουσιάζεται στην εικόνα 9. Η τιμή που μας δίνει ο αισθητήρας στάθμης μαζί με την τιμή της επιφάνειας του δοχείου και της πυκνότητας του ψυκτικού ρευστού μας επιτρέπουν τον υπολογισμό της ποσότητας που προσροφάται/ εκροφάται. Η ακρίβεια αυτής της μέτρησης είναι καλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του προσροφητή γιατί με αυτό τον τρόπο έχουμε μεγαλύτερες μεταβολές στην στάθμη υγρού του συμπυκνωτή/εξατμιστή.

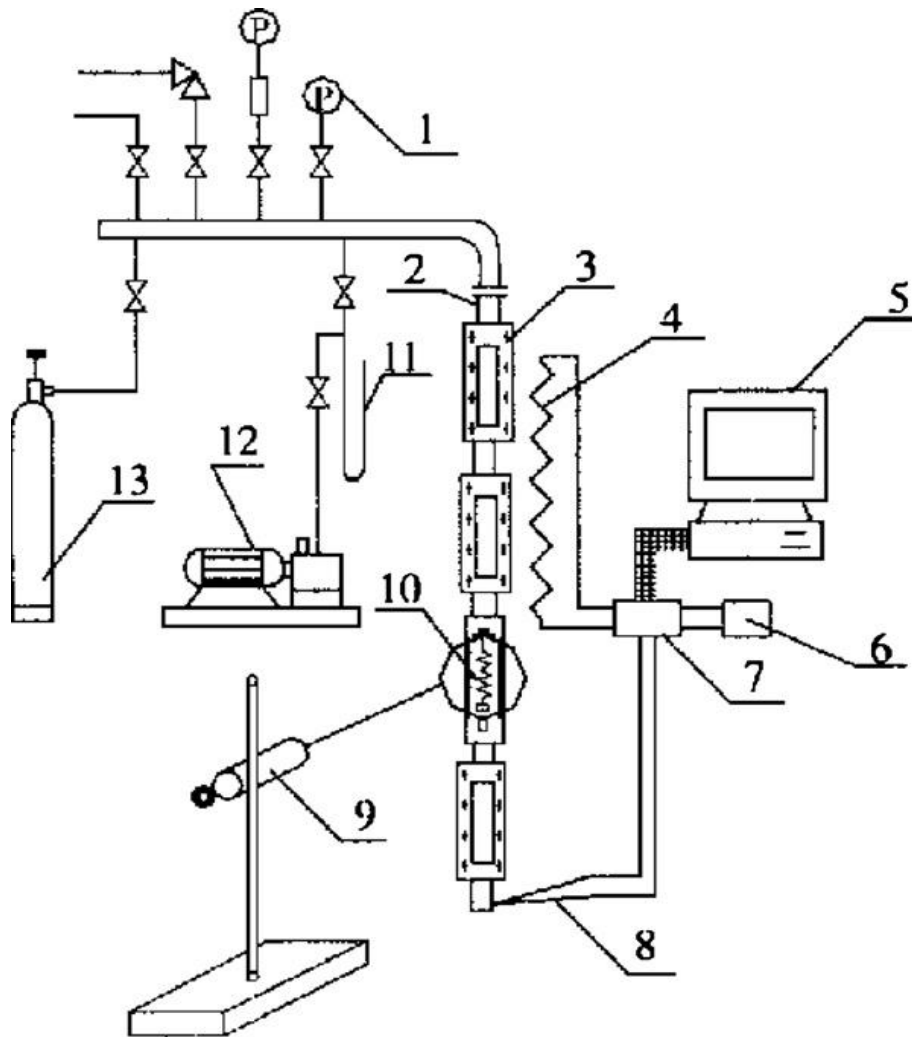


Εικόνα 36. Πειραματική μονάδα μέτρησης με στάθμη υγρού  
πηγή: [37]

Στην βαρυτική μέθοδο η απόδοση της προσρόφησης υπολογίζεται από την διαφορά μάζας του προσροφητή κατά την προσρόφηση/ εκρόφηση. Ο τρόπος λειτουργίας αυτής της μεθόδου φαίνεται στην εικόνα 37. Στο πείραμα μετράται το μήκος ενός quartz που συνδέεται με ένα άδειο καλάθι ( $h_1$ ) και το ίδιο μήκος με το καλάθι να έχει τον προσροφητή πριν και μετά την προσρόφηση,  $h_2$  και  $h_3$  αντίστοιχα. Η ποσότητα προσρόφησης είναι

$$x = (h_3 - h_2) / (h_2 - h_1)$$

Για να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια θα πρέπει η μάζα του προσροφητή να είναι της τάξης των 0.1 με 0.3 γραμμαρίων.



Εικόνα 37. Μονάδα μέτρησης βαρυτικής μεθόδου. (1) μανόμετρο, (2) σωλήνας μέτρησης, (3) γυαλάκι παρατήρησης, (4) ηλεκτρικός θερμαντής, (5) υπολογιστής, (6) παροχή ρεύματος, (7) ελεγκτής θερμοκρασίας, (8) θερμοστοιχείο, (9) Μετρητής ύψους, (10) quartz και το καλάθι με τον προσροφητή, (11) μανόμετρο σχήματος U, (12) αντλία κενού, (13) κύλινδρος υγρού αζώτου.

Πηγή: [60]

Η ογκομετρική μέθοδος που χρησιμοποιεί την μεταβολή στάθμης υγρού είναι καλύτερη από αυτή που μετρά την διαφορά πίεσης και η βαρυτική μέθοδος είναι ακόμα πιο ακριβής και είναι πιο εύκολη στην χρήση.

Για τον έλεγχο της θερμότητας προσρόφησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο τύποι θερμιδομέτρων, το ισοθερμικό και το αδιαβατικό. Η θερμότητα προσρόφησης υπολογίζεται με ισοθερμική θερμιδομετρία με την τήξη πάγου ή άλλου στερεού υλικού όπως η φαινόλη (σημείο τήξης  $-20.6^{\circ}\text{C}$ ) και τ μέτρηση της μάζας του υγρού. Για να έχουμε μεγάλη ακρίβεια με αυτή την μέθοδο θα πρέπει η ποσότητα του υγρού που παράγεται να είναι μεγάλη. Αυτή η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για μέτρηση της προσρόφησης σε συνθήκες ισορροπίας γιατί σε κάθε θερμοκρασία θα απαιτείται διαφορετικό υλικό τήξης.

Στο αδιαβατικό θερμιδόμετρο ο προσροφητής πρέπει να είναι θερμικά μονωμένος και η θερμότητα προσρόφησης υπολογίζεται από την αύξηση θερμοκρασίας του μέσου μεταφοράς θερμότητας.

## **2.7. Συμπεράσματα και προοπτικές για τα ζεύγη προσροφητή-ψυκτικού ρευστού**

Η κύρια πηγή θερμότητας για τα συστήματα προσρόφησης είναι θερμικά απόβλητα και η ηλιακή ενέργεια. Τα ζεύγη φυσικών προσροφητών συνήθως προτιμώνται όταν η πηγή θερμότητας είναι η ηλιακή ενέργεια. Το ζεύγος silica-gel/ νερό είναι κατάλληλο για χρήση με ηλιακή ενέργεια λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας εκρόφησης του αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για κλιματισμό καθώς δεν μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες κάτω από τους  $0^{\circ}\text{C}$ .

Το ζεύγος ενεργού άνθρακα/ μεθανόλης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ψύξη και μπορεί να λειτουργήσει με πηγές θερμότητας σε θερμοκρασίες μικρότερες από  $120^{\circ}\text{C}$ . Τόσο το ζεύγος silica-gel/νερό όσο και το ζεύγος ενεργού άνθρακα/ μεθανόλης είναι κατάλληλα για χρήση με θερμικά απόβλητα χαμηλής θερμοκρασίας. Για υψηλές θερμοκρασίες απόβλητης θερμότητας είναι κατάλληλα τα ζεύγη ζεόλιθων/ νερού, ενεργού άνθρακα/ αμμωνίας και χλωριδίων μετάλλων/ αμμωνίας. Για την χρήση των ζευγών silica-gel/νερού, ενεργού άνθρακα/μεθανόλης και ζεόλιθων/ νερού λειτουργούν σε συνθήκες κενού ώστε να διατηρείται η απόδοση του συστήματος. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν την αμμωνία σαν ψυκτικό έχουν θετική πίεση και η κατασκευή και συντήρησή τους είναι πολύ πιο εύκολη σε σχέση με τα συστήματα κενού.

Υπάρχουν δύο κύριες παράμετροι για την αξιολόγηση της ψύξης με προσρόφηση: το COP και το SCP. Το COP μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση εξελιγμένων ψυκτικών κύκλων προσρόφησης όπως ο κύκλος ανάκτησης θερμότητας και μάζας, ενώ το SCP βελτιώνεται με την χρήση προσροφητών με καλή απόδοση μεταφοράς μάζας και θερμότητας.

Το SCP των διάφορων ζευγών προσρόφησης παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Το SCP στον πίνακα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$SCP = W_L / m_a \quad (19)$$

όπου  $W_L$  είναι η ψυκτική ικανότητα του μισού κύκλου και  $m_a$  είναι η μάζα του προσροφητή.

Ο πίνακας 2 δείχνει ότι υπάρχουν πολλά υποσχόμενες επιδόσεις με τα σύνθετα ζεύγη προσροφητών/ αμμωνίας. Το SCP που πετυχαίνει το ζεύγος ενεργού άνθρακα/ $CaCl_2$ / αμμωνίας φτάνει τα 731W/Kg και το COP περίπου το 0.4 με 0.5 όταν η θερμοκρασία εξάτμισης είναι  $-15^\circ C$ .

Πίνακας 2 Σύγκριση απόδοσης διαφόρων ζευγών προσρόφησης			
Θερμοκρασία εξάτμισης ( $^\circ C$ )	Ζεύγος λειτουργίας	COP	SCP (W/Kg)
8	Ενεργός άνθρακας/ $NH_3$		1000
1	Ενεργά ανθρακονήματα / $CaCl_2$ / $NH_3$	0,6	330
3	Ενεργός άνθρακας/ $NH_3$	0,67	557
-10	$SrCl_2$ - $NH_3$	0,32	230
-25	( $MnCl_2$ + $NiCl_2$ )- $NH_3$	0,4	70 x 2
-10	Υδρίδιο μετάλλου/ υδρογόνο	0,43	25 x 2
3	Γραφίτης/silica gel/ νερό		35 x 2
10	Silica-gel/ νερό	0,4	85
5	Ζεόλιθοι/νερό	0,9	125 x 2
-15	$CaCl_2$ / ενεργός άνθρακας/ αμμωνία	0,41	731
-25	$CaCl_2$ / ενεργός άνθρακας/ αμμωνία	0,36	627,7
-15	$CaCl_2$ / γραφίτης/ αμμωνία	0,3	1000

Η κύρια κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα στα ζεύγη προσρόφησης σχετίζεται με την προηγμένη τεχνολογία προσροφητών με καλύτερη απόδοση μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Ήδη υπάρχουν υποσχόμενα αποτελέσματα από σύνθετους προσροφητές. Ωστόσο η βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας έχει αρνητικές συνέπειες στην μεταφορά μάζας.

Μια άλλη κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα είναι η αναζήτηση ζευγών λειτουργίας που να μπορούν να οδηγηθούν από πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες μικρότερες από  $-10^{\circ}\text{C}$ . Σε αυτές τις θερμοκρασίες οι φυσικοί προσροφητές όπως ενεργός άνθρακας/μεθανόλη και ενεργός άνθρακας/αμμωνία μπορούν να προσροφήσουν πολύ μικρές ποσότητες της τάξης των  $0.05\text{kg/kg}$  για θερμοκρασία συμπύκνωσης  $35^{\circ}\text{C}$  και πηγή θερμότητας θερμοκρασίας  $100^{\circ}\text{C}$ . Οι χημικοί προσροφητές όπως το χλωρίδιο του ασβεστίου επίσης δεν λειτουργούν επαρκώς με πηγές θερμότητας θερμοκρασίας κάτω από  $100^{\circ}\text{C}$ . Το αμμωνιούχο  $\text{BaCl}_2$  μπορεί να εκροφήσει πολύ γρήγορα σε θερμοκρασίες μεταξύ και 60 και 80 βαθμών Κελσίου αλλά δεν μπορεί να επιτύχει θερμοκρασίες χαμηλότερες των  $-10^{\circ}\text{C}$  αν η θερμοκρασία απόρριψη είναι μεγαλύτερη από  $20^{\circ}\text{C}$  οπότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πάγου τους καλοκαιρινούς μήνες.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>**

### **ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ**

#### **3.1 Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο Κορωπί**

##### **3.1.1 Περιγραφή της εφαρμογής**

Το ανοικτού κύκλου σύστημα εξατμιστικής ψύξης με αφύγρανση χρησιμοποιείται για λόγους επίδειξης και έρευνας. Χρησιμοποιείται για τη θέρμανση και ψύξη του ηλιοθερμικού κτιρίου στη θέση επίδειξης του πάρκου ΠΕΝΑ του ΚΑΠΕ.

##### **3.1.2 Γενική περιγραφή του συστήματος**

Η τεχνολογία του συστήματος είναι ανοικτού κύκλου σύστημα εξατμιστικής ψύξης με αφύγρανση. Η θερμότητα παρέχεται από ένα ηλιοθερμικό σύστημα και από εφεδρικό ηλεκτρικό θερμαντήρα που είναι εγκατεστημένος μέσα στη δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού. Το χειμώνα, το ηλιοθερμικό σύστημα τροφοδοτεί εναλλάκτη θερμότητας νερού-αέρα που είναι εγκατεστημένος στο σύστημα DEC για τη θέρμανση του χώρου.

<b>Κεντρική μονάδα κλιματισμού</b>	
Τεχνολογία	Ανοικτού κύκλου
Ονομαστική ροή όγκου αέρα	1100 m <sup>3</sup> /h
Ελάχιστη ροή όγκου αέρα	373m <sup>3</sup> /h
Τύπος συστήματος ψύξης με αφύγρανση αέρα	Στερεά αφύγρανση
Τύπος αφυγραντή	Χλωριούχο λίθιο
Ψυκτική ισχύς	-
Εταιρία κατασκευής μονάδας αφύγρανσης	Klingenburg

<b>Ηλιοθερμικό</b>	
Τύπος συλλέκτη	Με επίπεδο προφίλ
Εμπορική ονομασία συλλέκτη	Calpak
Επιφάνεια συλλέκτη	Μεικτή 10m <sup>2</sup>
Γωνία κλίσης, προσανατολισμός	45°, 0° δυτικός/ ανατολικός
Ρευστό συλλέκτη	Διάλυμα νερού-γλυκόζης
Τυπική θερμοκρασία λειτουργίας	60°C

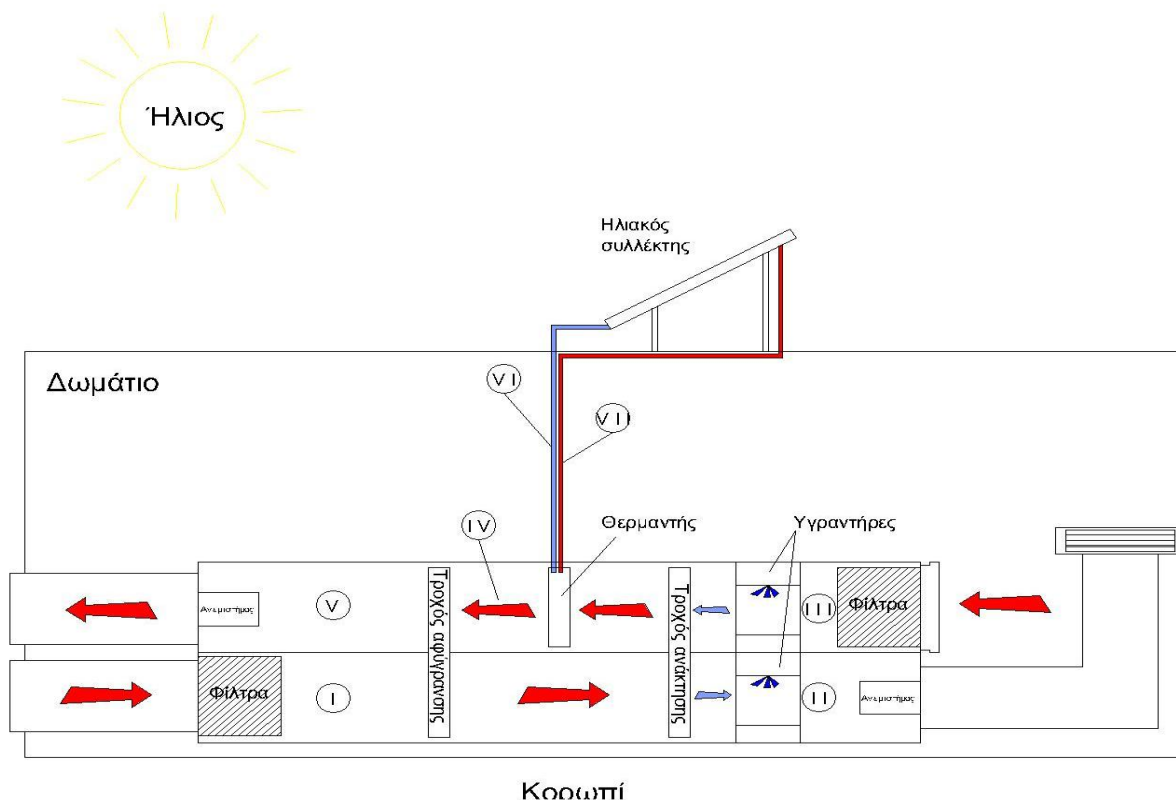
<b>Διαμόρφωση</b>	
Αποθήκευση θερμότητας	0.5 m <sup>3</sup> νερού
Αποθήκευση κρύου	Καμία
Συμπληρωματική πηγή θέρμανσης	Ηλεκτρικός θερμαντήρας
Χρήση συμπληρωματικού συστήματος θέρμανσης	Θερμαίνει άμεσα τη δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού που χρησιμεύει για θέρμανση και ψύξη
Εφεδρικός ψύκτης	όχι

### **3.1.3 Απόδοση συστήματος**

Νεοεγκατεστημένο σύστημα και συνεπώς η απόδοση του συστήματος δεν έχει ακόμα αναλυθεί.

### **3.1.4 Αξιοπιστία συστήματος και γενικά επιτυχία της εγκατάστασης**

Οι πρώτες εβδομάδες λειτουργίας έχουν δείξει αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν δεδομένα παρακολούθησης σε βάθος χρόνου. Το σύστημα υπόσχεται πολλά αφού δεν χρησιμοποιούνται ειδικά ή δαπανηρά εξαρτήματα. Οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας επιτρέπουν τη χρήση επιλεγμένων συλλεκτών με επίπεδο προφίλ και χαμηλό κόστος.



Εικόνα 38 Σχηματική παράσταση του ηλιοθερμικού συστήματος εξατμιστικής ψύξης με αφύγρανση στο Λαύριο/Κορωπί (Ελλάδα)  
Πηγή [71]

## 3.2 Εμπορικό επιμελητήριο 'Südllicher Oberrhein' στο Freiburg της Γερμανίας

### 3.2.1 Περιγραφή της εφαρμογής

Η Αίθουσα σεμιναρίων και ο χώρος καφετέριας του κτιρίου, που συχνά χρησιμοποιείται ως αίθουσα σεμιναρίων, συνδέονται στο σύστημα εξατμιστικής ψύξης με αφύγρανση για τον κλιματισμό των χώρων αυτών. Μολονότι έχουν εφαρμοστεί παθητικά μέτρα όπως η εξωτερική σκίαση, υψηλής ποιότητας υαλοπίνακες κτλ για την αποφυγή μεγάλου ηλιακού κέρδους, η λόγω της μεγάλης επιφάνειας υαλοπινάκων απαιτείται και ενεργή ψύξη. Κατά την θερινή περίοδο χρήσης της ψύξης και της αφύγρανσης, το σύστημα είναι ένα αυτόνομο ηλιακό θερμικό σύστημα. Το χειμώνα χρησιμοποιείται συμπληρωματική θερμότητα από τον λέβητα καύσης φυσικού αερίου για την παροχή μόνο θέρμανσης του αέρα.

### 3.2.2 Γενική περιγραφή του συστήματος

Η τεχνολογία του συστήματος βασίζεται στα εξατμιστικά συστήματα ανοικτού κύκλου με αφύγρανση, κάνοντας χρήση της ηλιακής θερμότητας για τον τροχό αφύγρανσης. Ο τροχός αφύγρανσης περιέχει πήκτωμα πυριτίου ως υλικό ρόφησης. Η αναπαραγωγή γίνεται αυτόνομα από την ηλιακή ενέργεια μέσω ηλιακών συλλεκτών επίπεδου προφίλ. Δεν χρησιμοποιείται αποθήκευση θερμότητας. Η ροή του όγκου αέρα στη μονάδα επεξεργασίας του αέρα παρουσιάζει ευρεία διακύμανση, σύμφωνα με τις απαιτήσεις. Η ροή του αέρα μέσω των αεροσυλλεκτών είναι ανεξάρτητη από τη ροή του όγκου προκειμένου να υπάρχει βελτιστοποιημένη λειτουργία του τροχού αφύγρανσης. Κατά το χειμώνα, ο εισαγόμενος αέρας προθερμαίνεται από τους συλλέκτες και θερμαίνεται σύμφωνα με τις ρυθμίσεις του εφεδρικού συστήματος ορυκτών καυσίμων.

<b>Κεντρική μονάδα κλιματισμού</b>	
Τεχνολογία	Ανοικτού κύκλου
Ονομαστική ροή όγκου αέρα	10200 m <sup>3</sup> /h
Ελάχιστη ροή όγκου αέρα	2500 m <sup>3</sup> /h
Τύπος συστήματος ψύξης με αφύγρανση αέρα	Στερεό απορροφητικό υλικό
Τύπος αφυγραντή	Πήκτωμα πυριτίου
Ψυκτική ισχύς	60kW
Εταιρία κατασκευής μονάδας αφύγρανσης	DehuTech

<b>Ηλιοθερμικό</b>	
Τύπος συλλέκτη	Αεροσυλλέκτης επίπεδου προφίλ
Εμπορική ονομασία συλλέκτη	Grammer
Επιφάνεια συλλέκτη	Άνοιγμα 92 m <sup>2</sup>
Γωνία κλίσης, προσανατολισμός	0° νότιος
Ρευστό συλλέκτη	Αέρας
Τυπική θερμοκρασία λειτουργίας	70°C

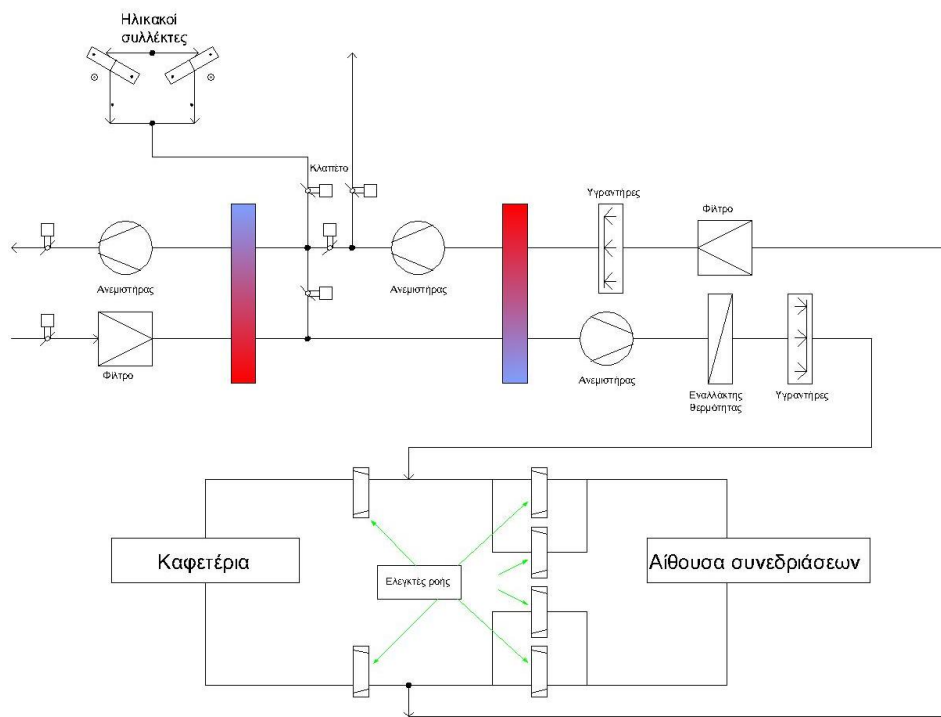
<b>Διαμόρφωση</b>	
Αποθήκευση θερμότητας	Καμία
Αποθήκευση κρύου	Καμία
Συμπληρωματική πηγή θέρμανσης	Καυστήρας φυσικού αερίου
Χρήση συμπληρωματικού συστήματος θέρμανσης	Θέρμανση εισαγόμενου αέρα το χειμώνα
Εφεδρικός ψύκτης	όχι

### **3.2.3 Απόδοση συστήματος**

Σε κατάσταση λειτουργίας ψύξης με αφύγρανση, υπήρξε ετήσιος συντελεστής απόδοσης (COP) της τάξης του 0.43. Η ηλιακή κάλυψη της συνολικής εισόδου θερμότητας (θέρμανση εισαγόμενου αέρα και αναπαραγωγή θερμότητας) ήταν κατά μέσο όρο 50%. Το ειδικό ετήσιο κέρδος του συλλέκτη ήταν 111 kWh/m<sup>2</sup>a. Η απόδοση του συστήματος είναι περιορισμένη λόγω της περιορισμένης χρήσης των αιθουσών σεμιναρίων και την επακόλουθη περιορισμένη ενεργοποίηση της μονάδας επεξεργασίας του αέρα (1080 ώρες το 2004)

### **3.2.4 Αξιοπιστία συστήματος και εν γένει επιτυχία της εγκατάστασης**

Μετά την έναρξη του συστήματος, απαιτήθηκε να γίνουν βελτιώσεις στον έλεγχο του συστήματος προκειμένου να υπάρξει επαρκής λειτουργία του συστήματος. Από την εμπειρία αυτή, είναι αναπόφευκτο να υπάρξει ένα αρχικό διάστημα προσοχής. Η σύλληψη της ιδέας του συστήματος για αυτόνομη λειτουργία ψύξης είναι η σωστή λύση στην περίπτωση αυτή. Σε χρόνο λιγότερο του 5% των ωρών λειτουργίας, οι συνθήκες αέρα του δωματίου υπερβαίνουν τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις. Η αποδοχή του συστήματος από τους χρήστες είναι πολύ καλή. Ως συνέπεια του εγκατεστημένου ηλιακού συστήματος αεροσυλλεκτών, το σύστημα των συλλεκτών συμβάλλει στο 10% του συνολικού κόστους του συστήματος μόνο.



IHK-SO, FREIBURG GERMANY



Εικόνα 39 Σχηματική παράσταση συστήματος εξατμιστικής ψύξης με στερεό αφυγραντικό (DEC) στο IHK-SO, Freiburg της Γερμανίας

Πηγή [71]

### 3.3 Πληροφοριακό κέντρο ηλιακών συστημάτων SIC στο Freiburg της Γερμανίας

#### 3.3.1 Περιγραφή της εφαρμογής

Το πληροφοριακό κέντρο ηλιακών συστημάτων στο Freiburg στεγάζει επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στον ενεργειακό τομέα. Μέρος του κτιρίου νοικιάζεται στην Fraunhofer ISE. Εντός του τμήματος αυτού, κλιματίζονται χώροι γραφείων και αίθουσα σεμιναρίων από σύστημα ψύξης με υγρό ξηραντικό υλικό που λειτουργεί από την αυτόνομη λειτουργία θερμικού ηλιακού συστήματος. Το σύστημα είναι πιλοτικό με σκοπό να επιδείξει τη δυνατότητα εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας.

#### 3.3.2 Γενική περιγραφή του συστήματος

Η τεχνολογία του συστήματος βασίζεται στα εξατμιστικά συστήματα ανοικτού κύκλου με αφύγρανση, κάνοντας χρήση της ηλιακής θερμότητας για την αναπαραγωγή του αραιού διαλύματος LiCl. Η ηλιακή θερμότητα παρέχεται από συλλέκτη επίπεδου προφίλ. Γίνεται ψύξη της διαδικασίας ρόφησης, πράγμα που αυξάνει την απόδοση της ρόφησης. Ένα πλεονέκτημα του συστήματος είναι η αποθήκευση του αραιού και συγκεντρωμένου διαλύματος σε ξεχωριστά δοχεία αποθήκευσης, πράγμα που επιτρέπει την χρονική απόζευξη ανάμεσα στην αφύγρανση και τη διαδικασία αναπαραγωγής ως ένα βαθμό. Δεν χρησιμοποιούνται εφεδρικά συστήματα θέρμανσης για την αναπαραγωγή του διαλύματος. Κατά το χειμώνα, χρησιμοποιείται θερμότητα από το σύστημα τηλεθέρμανσης του πανεπιστημιακού νοσοκομείου για τη θέρμανση του εισερχόμενου αέρα.

<b>Κεντρική μονάδα κλιματισμού</b>	
Τεχνολογία	Ανοικτού κύκλου
Ονομαστική ροή όγκου αέρα	1500 m <sup>3</sup> /h
Ελάχιστη ροή όγκου αέρα	600 m <sup>3</sup> /h
Τύπος συστήματος ψύξης με αφύγρανση αέρα	Υγρό απορροφητικό υλικό
Τύπος αφυγραντή	Χλωριούχο λίθιο
Ψυκτική ισχύς	10kW
Εταιρία κατασκευής μονάδας αφύγρανσης	Menerga

<b>Ηλιοθερμικό</b>	
Τύπος συλλέκτη	Με επίπεδο προφίλ
Εμπορική ονομασία συλλέκτη	Ufe Ecostar
Επιφάνεια συλλέκτη	Άνοιγμα 16,8 m <sup>2</sup>
Γωνία κλίσης, προσανατολισμός	30° νότιος
Ρευστό συλλέκτη	Νερό
Τυπική θερμοκρασία λειτουργίας	55-70°C

<b>Διαμόρφωση</b>	
Αποθήκευση θερμότητας	1,5 m <sup>3</sup>
Αποθήκευση κρύου	Χώροι αποθήκευσης διαλύματος
Συμπληρωματική πηγή θέρμανσης	Δίκτυο τηλεθέρμανσης
Χρήση συμπληρωματικού συστήματος θέρμανσης	Θέρμανση εισαγόμενου αέρα το χειμώνα
Εφεδρικός ψύκτης	όχι

### **3.3.3 Απόδοση συστήματος**

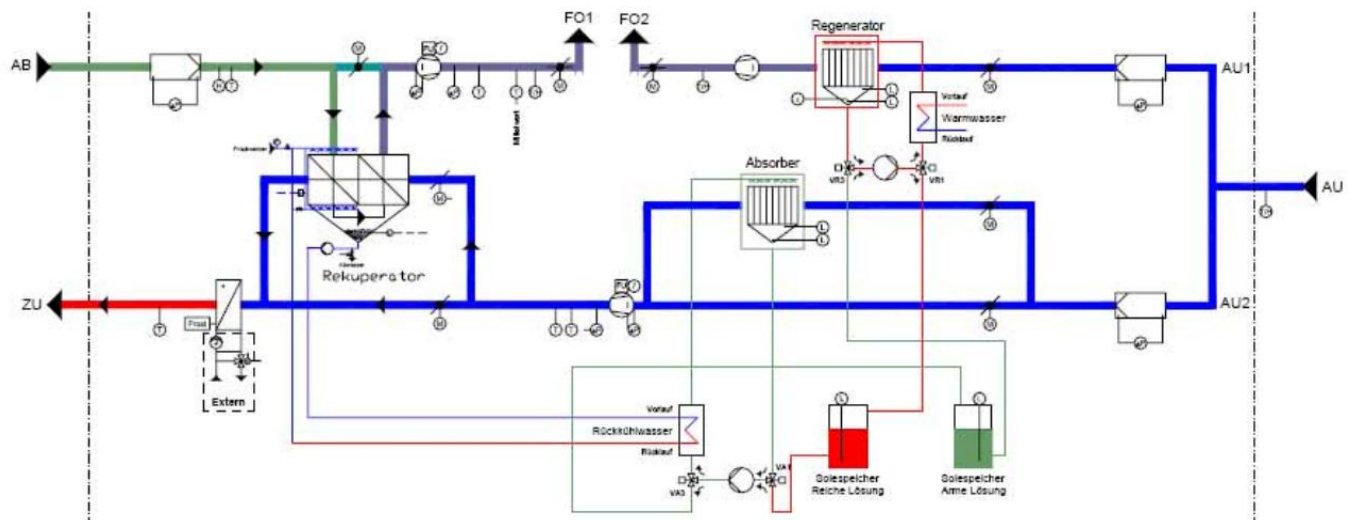
Λαμβάνοντας υπόψη την συνολική παραγωγή 'κρύου' της μονάδας επεξεργασίας αέρος (σε όλους τους τρόπους λειτουργίας: ψύξη με αφύγρανση, ελεύθερη ψύξη, αδιαβατική ψύξη) σε σχέση με την ολική αναπαραγόμενη θερμότητα εισόδου, επιτεύχθηκε μέση τιμή συντελεστή απόδοσης (COP) της τάξης του 1.0. Η ειδική ετήσια απόδοση των συλλεκτών ήταν 270 kWh/m<sup>2</sup>a.

### **3.3.4 Αξιοπιστία συστήματος και γενικά επιτυχία της εγκατάστασης**

Στο σύστημα ελέγχου έγιναν πολλές βελτιώσεις εντός του πρώτου έτους λειτουργίας, κυρίως όσον αφορά την βελτιστοποίηση της λειτουργίας των αντλιών και των ανεμιστήρων. Ενδιάμεσα, η λειτουργία του συστήματος υπήρξε αξιόπιστη και πολλά υποσχόμενη, ενώ τα ποσοστά διαθεσιμότητας του συστήματος είναι αρκετά υψηλά. Έχει γίνει μεταφορά του διαλύματος στην παροχή αέρα.



Εικόνα 40



Εικόνα 41 Εγκατεστημένο σύστημα εξατμιστικής ψύξης με αφύγρανση και σχηματική παράσταση του συστήματος στο πληροφοριακό κέντρο ηλιακών συστημάτων (SIC) στο Freiburg της Γερμανίας  
Πηγή [71]

## 3.4 Κτίριο γραφείων στο Πανεπιστήμιο INETI στη Λισσαβόνα της Πορτογαλίας

### 3.4.1 Περιγραφή της εφαρμογής

Στόχος είναι ο κλιματισμός 12 γραφείων του πρώτου ορόφου του κτιρίου G του τμήματος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του πανεπιστημίου INETI. Ο σχεδιασμός που επελέγη για το σύστημα μεγιστοποιεί την άνεση των χρηστών των γραφείων οι οποίοι είναι πολύ ικανοποιημένοι από τη λειτουργία του συστήματος όλα αυτά τα χρόνια.

### 3.4.2 Γενική περιγραφή του συστήματος

Το σύστημα κλιματισμού είναι μονάδα επεξεργασίας αέρα με αφύγρανση, που ενσωματώνει αντλία θερμότητας και υποβοηθείται από ηλιακούς συλλέκτες τύπου 24 CPC οι οποίοι βρίσκονται στην επίπεδη κάλυψη του κτιρίου. Χρησιμοποιείται καυστήρας φυσικού αερίου ως εφεδρικός του ηλιοθερμικού συστήματος κατά το χειμώνα.

Παρέχεται ψύξη κατά τους θερινούς μήνες (μεταξύ Απριλίου-Μαΐου και Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου) και θέρμανση κατά τους χειμερινούς μήνες (μεταξύ Οκτωβρίου και Μαρτίου).

<b>Κεντρική μονάδα κλιματισμού</b>	
Τεχνολογία	Ανοικτού κύκλου
Ονομαστική ροή όγκου αέρα	5000 m <sup>3</sup> /h
Ελάχιστη ροή όγκου αέρα	2000 m <sup>3</sup> /h
Τύπος συστήματος ψύξης με αφύγρανση αέρα	Στερεό απορροφητικό υλικό
Τύπος αφυγραντή	Χλωριούχο λίθιο
Ψυκτική ισχύς	36kW
Εταιρία κατασκευής μονάδας αφύγρανσης	Modular AG Sachsen

<b>Ηλιοθερμικό</b>	
Τύπος συλλέκτη	CPC
Εμπορική ονομασία συλλέκτη	Ao Sol
Επιφάνεια συλλέκτη	Άνοιγμα 46,1 m <sup>2</sup>
Γωνία κλίσης, προσανατολισμός	30°, 0° δυτικός/ ανατολικός
Ρευστό συλλέκτη	Νερό
Τυπική θερμοκρασία λειτουργίας	45-60°C

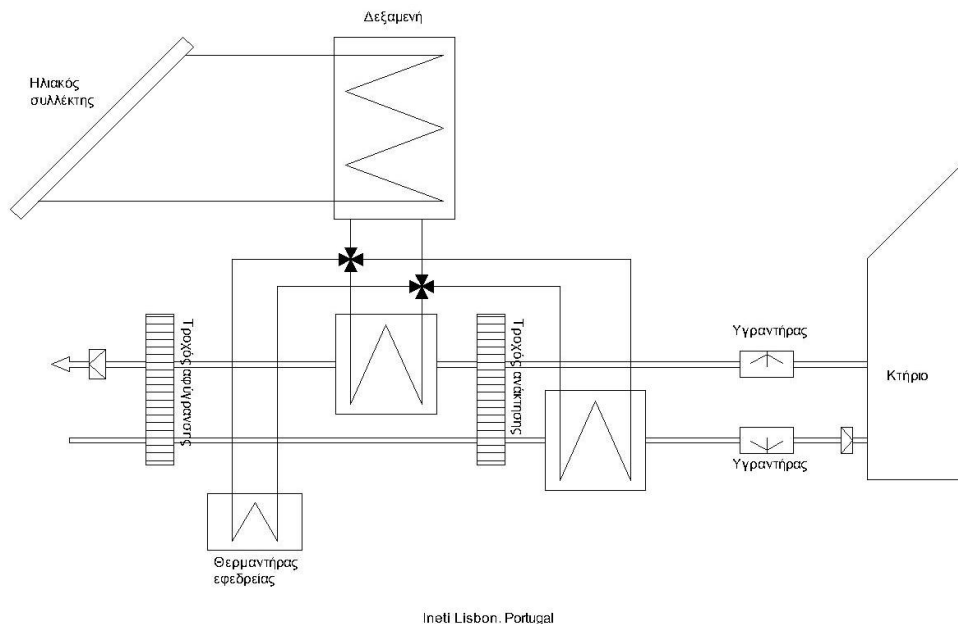
<b>Διαμόρφωση</b>	
Αποθήκευση θερμότητας	2 m <sup>3</sup>
Αποθήκευση κρύου	Καμία
Συμπληρωματική πηγή θέρμανσης	Καυστήρας φυσικού αερίου
Χρήση συμπληρωματικού συστήματος θέρμανσης	Θέρμανση χώρων αέρα το χειμώνα
Εφεδρικός ψύκτης	ναι
- τύπος	Αντλία θερμότητας
- ισχύς	16,4 kW <sub>cold</sub>

### 3.4.3 Απόδοση συστήματος

Ο πρότυπος σχεδιασμός της ηλιακά υποβοηθούμενης εξατμιστικής τεχνολογίας με αφύγραση ενσωματώνει δύο υγροποιητές: Έναν για τον αέρα κλιματισμού, μετά τον τροχό ανάκτησης θερμότητας, και έναν ακόμα για τον αέρα εξάτμισης, πριν τον τροχό ανάκτησης θερμότητας.

Το σύστημα που έχει εγκατασταθεί στο INETI τροποποιήθηκε για την ενσωμάτωση αντλίας θερμότητας στη διαδρομή του αέρα (προσαγόμενου αέρα) αντικαθιστώντας τον υγροποιητή στη διαδρομή αυτή. Η τροποποίηση οφείλεται στο περιορισμένο μέγεθος του συστήματος διανομής αέρα, που υποχρέωνε σε μειωμένο ρυθμό ροής αέρα υπό συνθήκες σχεδιασμού και παράλληλα, να καταστεί δυνατή η προσαγωγή αέρα στους χώρους σε χαμηλότερη θερμοκρασία προκειμένου να καλυφθεί το ψυκτικό φορτίο.

Η ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος έδειξε ότι ήταν απαραίτητη η ενσωμάτωση ενός υγροποιητή στον αγωγό προσαγωγής αέρα. Η αλλαγή αυτή έγινε (2007) αλλά δεν έχει ακόμα τεθεί σε λειτουργία και δεν παρακολουθείται.



*Εικόνα 42 Σχηματική παράσταση συστήματος εξατμιστικής ψύξης με αφύγρανση (άνω) και ηλιακού/εφεδρικού υποσυστήματος θέρμανσης (κάτω) στο κτίριο Ineti της Λισσαβόνας Πορτογαλίας.  
Πηγή [71]*

### **3.5 Βιβλιοθήκη 'Pompeu Fabra' στο Ματαρό της Ισπανίας**

#### **3.5.1 Περιγραφή της εφαρμογής**

Η βιβλιοθήκη Pompeu Fabra του Ματαρό είναι ένα κτίριο ο σχεδιασμός του οποίου ενσωματώνει φωτοβολταϊκά και ηλιοθερμικό σύστημα στην κατασκευή του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης σύμφωνα με τις απαιτήσεις μιας δημόσιας βιβλιοθήκης. Στη σύλληψη της ιδέας του κτιρίου αυτού εφαρμόστηκε μια προαιρετική ισορροπία ανάμεσα στην ενέργεια, άνεση, φυσικό φωτισμό, αισθητική και οικονομικούς πόρους.

### 3.5.2 Γενική περιγραφή του συστήματος

Μεταξύ 2000 και 2002 πραγματοποιήθηκε ένα νέο έργο στα πλαίσια του προγράμματος JOULE III, το αποκαλούμενο AIRCOOL, για την ανάπτυξη μονάδας ψύξης με αφύγρανση που ενσωματώνει φωτοβολταϊκά υποσυστήματα και ένα νέο πεδίο ηλιακών αεροσυλλεκτών, με τον αέρα ως το μόνο μέσο θερμότητας και ψύξης για τον κλιματισμό του οπτικο-ακουστικού χώρου παιδών. Την ευθύνη του έργου ανέλαβαν: HfT Stuttgart, TFM SA, Grammer, πανεπιστήμιο Loughborough, Siegle+Erple και Sauter Ibérica. Το νέο σύστημα σχεδιάστηκε για βελτιωμένη με στόχο την γενική ενεργειακή απόδοση του κτιρίου καθώς και την άνεση των χώρων στη δυτική του πλευρά, λαμβάνοντας υπόψη τα οφέλη του υφιστάμενου ηλιακού εξοπλισμού. Η νέα μονάδα ψύξης είναι ισχύος 55 kW, με πεδίο ηλιακών αεροσυλλεκτών 105 m<sup>2</sup>, προσανατολισμό δυτικό και γωνία κλίσης 20°. Η συνολική ροή αέρα είναι 12.000 m<sup>3</sup>/h. Μια μονάδα ψύξης συμπίεσης και ένας καυστήρας φυσικού αερίου λειτουργούν ως εφεδρικά συστήματα προς στήριξη της παραγωγής ηλιακής ψύξης και θερμότητας.

<b>Κεντρική μονάδα κλιματισμού</b>	
Τεχνολογία	Ανοικτού κύκλου
Ονομαστική ροή όγκου αέρα	12000 m <sup>3</sup> /h
Ελάχιστη ροή όγκου αέρα	6000 m <sup>3</sup> /h
Τύπος συστήματος ψύξης με αφύγρανση αέρα	Στερεό απορροφητικό υλικό
Τύπος αφυγραντή	Πήκτωμα πυριτίου
Ψυκτική ισχύς	81kW
Εταιρία κατασκευής μονάδας αφύγρανσης	Siegle+Erple (ATU), Seibu Giken (wheel)

<b>Ηλιοθερμικό</b>	
Τύπος συλλέκτη	αεροσυλλέκτης
Εμπορική ονομασία συλλέκτη	Grammer
Επιφάνεια συλλέκτη	Άνοιγμα 88 m <sup>2</sup>
Γωνία κλίσης, προσανατολισμός	20°, 5° δυτικός
Ρευστό συλλέκτη	Αέρας
Τυπική θερμοκρασία λειτουργίας	65°C

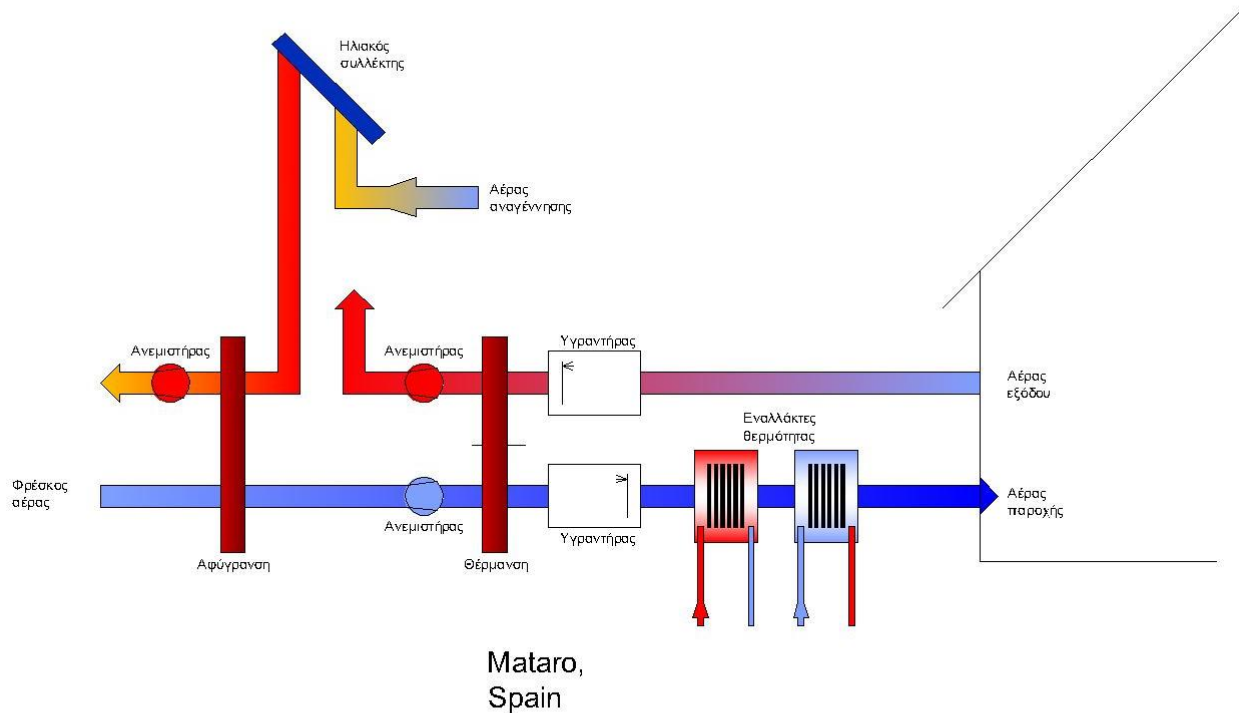
<b>Διαμόρφωση</b>	
Αποθήκευση θερμότητας	Καμία
Αποθήκευση κρύου	Καμία
Συμπληρωματική πηγή θέρμανσης	Καμία
Χρήση συμπληρωματικού συστήματος θέρμανσης	-
Εφεδρικός ψύκτης	ναι
- τύπος	Ηλεκτρικός ψύκτης συμπίεσης
- ισχύς	246 kW <sub>cold</sub>

### **3.5.3 Απόδοση συστήματος**

Σχετικά με τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, παρατηρείται ότι έχουν αποφευχθεί τα προβλήματα θορύβου που υπήρχαν κατά την αρχική περίοδο. Η τεχνολογία εγγυάται μεγάλη εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας μέσω χρήσης της ηλιακής ενέργειας. Το σημαντικότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα είναι η μεγάλη κατανάλωση νερού. Οι υγραντές πρέπει να διατηρούνται καθαροί για ελαχιστοποίηση του προβλήματος. Επιπλέον, ο ιδιοκτήτης θα πρέπει να εξετάσει ορισμένες προτάσεις σχετικά με την ανακύκλωση του νερού του υγραντήρα. Η κατανάλωση νερού δεν παρακολουθείται από το σύστημα αλλά μια σύγκριση των λογαριασμών πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος δείχνει αύξηση της τάξης του 217%. Το σύστημα εξατμιστικής ψύξης με αφύγρανση και εφεδρική συμπίεση των ατμών για ψύξη είναι μια τεχνολογία που δουλεύει καλά σε υγρά και ζεστά κλίματα όπως αυτό των ακτών της Μεσογείου.

### **3.5.4 Αξιοπιστία συστήματος και γενικά επιτυχία της εγκατάστασης**

Το σύστημα λειτουργεί καλά, οι εσωτερικές συνθήκες άνεσης είναι καλύτερες από αυτές που υπήρχαν με την προηγούμενη εγκατάσταση λόγω του γεγονότος ότι αυξήθηκε η ψυκτική ισχύς ενώ, παράλληλα, τα φορτία μειώθηκαν με τη χρήση διατάξεων σκιασμού πάνω από τα παράθυρα της δυτικής πλευράς. Οι χρήστες είναι ικανοποιημένοι με το σύστημα. Κατά τη λειτουργία του συστήματος το 2004, οι χρήστες δεν ένοιωσαν ενοχλητικές κλιματιστικές συνθήκες. Εκτός από τις βελτιώσεις στο σύστημα κλιματισμού του κτιρίου, η εγκατάσταση λειτουργεί και ως επίδειξη μιας φιλικής προς το περιβάλλον τεχνολογίας.



*Εικόνα 43 Σχηματική παράσταση του συστήματος εξατμιστικής ψύξης με αφύγραση της δημόσιας βιβλιοθήκης Ματαρό στην Ισπανία  
Πηγή [71]*

## 3.6 Κτίριο Γραφείων στο Hartberg της Αυστρίας

### 3.6.1 Περιγραφή της εφαρμογής

Δροσισμός κτιρίου γραφείων (και θέρμανση και ζεστό νερό).

### 3.6.2 Γενική περιγραφή του συστήματος

Το σύστημα με αφυγραντή, ισχύος 30.4 kW, λαμβάνει τη θερμική ενέργεια παροχής από συλλέκτες 12m<sup>2</sup> επίπεδου προφίλ και λέβητα καύσης βιομάζας ισχύος 30 kW ως συμπληρωματική πηγή θερμότητας. Το φορτίο ψύξης αιχμής του κτιρίου είναι 20 kW ενώ το φορτίο θέρμανσης αιχμής είναι 24 kW. Ο αριθμός των ωρών ζήτησης για θέρμανση είναι 3560 ετησίως. Η παροχή θέρμανσης και ψύξης διανέμεται μέσω αεραγωγών με ανάκτηση θερμότητας.

<b>Κεντρική μονάδα κλιματισμού</b>	
Τεχνολογία	Ανοικτού κύκλου
Ονομαστική ροή όγκου αέρα	6000 m <sup>3</sup> /h
Ελάχιστη ροή όγκου αέρα	- m <sup>3</sup> /h
Τύπος συστήματος ψύξης με αφύγρανση αέρα	Στερεό απορροφητικό υλικό
Τύπος αφυγραντή	Πήκτωμα πυριτίου
Ψυκτική ισχύς	30,4 kW
Εταιρία κατασκευής μονάδας αφύγρανσης	-

<b>Ηλιοθερμικό</b>	
Τύπος συλλέκτη	Με επίπεδο προφίλ
Εμπορική ονομασία συλλέκτη	Συλλέκτης κενού
Επιφάνεια συλλέκτη	Καλύπτει 12 m <sup>2</sup>
Γωνία κλίσης, προσανατολισμός	70°, νότιος
Ρευστό συλλέκτη	Διάλυμα νερού-γλυκόζης
Τυπική θερμοκρασία λειτουργίας	-

<b>Διαμόρφωση</b>	
Αποθήκευση θερμότητας	3 m <sup>3</sup> νερού
Αποθήκευση κρύου	Καμία
Συμπληρωματική πηγή θέρμανσης	βιομάζα
Χρήση συμπληρωματικού συστήματος θέρμανσης	Θέρμανση και ψύξη
Εφεδρικός ψύκτης	όχι

<b>Απόδοση συστήματος</b>	
Ετήσιο COP = ετήσιο ψυκτικό φορτίο/ετήσια αναπαραγωγή θερμότητας	0,6
Ηλιακό κλάσμα =kWh πρωτογενούς ενέργειας/kWh ψύξη	1,66
Ημερήσιο ηλιακό κέρδος	60 kWh
Κέρδος επιφάνειας συλλέκτη	430 kWh/ m <sup>2</sup> επιφάνειας συλλέκτη
Ημερήσια ζήτηση ηλεκτρισμού	65 kWh
Μέση απόδοση συλλέκτη	40,00%

Ο αδιαβατικός τρόπος λειτουργίας, ο οποίος δεν χρειάζεται αναπαραγωγή θερμότητας, έχει μεγάλη σημασία για την αύξηση του COP στο 0.6.

### **3.6.3 Αξιοπιστία συστήματος και εν γένει επιτυχία της εγκατάστασης**

Οι χρήστες καθώς και οι ιδιοκτήτες των κτιρίων είναι ικανοποιημένοι. Η χρήση της μονάδας DEC είναι κανονική, ικανοποιητική. Σε περίπτωση ύπαρξης προβλήματος, δεν υπάρχουν ακόμα τα κατάλληλα άτομα για την επιδιόρθωση λόγω του ότι η τεχνολογία δεν είναι καλά γνωστή. Το σημαντικότερο πρόβλημα είναι η υγιεινή των ανοικτών λεκανών νερού. Ο βιολογικός καθαρισμός του νερού με βιοκτόνο και UV (254 nm) παράλληλα με τη διενέργεια ελέγχων ποιότητας νερού είναι ένας πρακτικός τρόπος. Το κεντρικό σύστημα ψύξης απαιτεί μεγάλη ποσότητα ηλεκτρισμού για εξαερισμό. Εάν για τον αναγεννητή χρησιμοποιηθεί ανανεώσιμη θερμότητα, μειώνονται σημαντικά οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Τα διδάγματα από το σύστημα DEC στο Hartberg είναι τα εξής:

1. Η στρατηγική ελέγχου για λειτουργία καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως.
2. Η επεξεργασία του νερού πρέπει να περιλαμβάνει και τον βιολογικό καθαρισμό (βιοκτόνο και ακτινοβολία UV) του νερού. Με τον καιρό, ιδίως μετά από μεγάλα διαστήματα χωρίς λειτουργία, οι εγκαταστάσεις αφύγρανσης χρειάζεται να καθαρίζονται.
3. Τα διαστήματα μεταξύ συντηρήσεων χρειάζεται να είναι προκαθορισμένα και είναι αναγκαίο να υπάρχει μορφωμένο προσωπικό.
4. Όσον αφορά τον έλεγχο, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα προστασίας από κεραυνούς, ιδίως στην επαρχία.
5. Η θερμοκρασία αναπαραγωγής πρέπει να είναι αρκετή προς αποφυγή υγρασίας στον αέρα εσωτερικών χώρων.



Εικόνα 44. Κτίριο Γραφείων στο Hartberg της Αυστρίας  
Πηγή [71]

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ**

#### **4.1. Θεωρητική υλοποίηση νευρωνικών δικτύων**

Το πρώτο βήμα για την υλοποίηση της άσκησης είναι η κατανόηση των δύο νευρωνικών δικτύων. Αυτά είναι το εμπρόσθιας διάδοσης νευρωνικό δίκτυο με οπισθοδρομική διάδοση του σφάλματος (feed forward neural network with error back propagation) και το νευρωνικό δίκτυο ακτινικών συναρτήσεων βάσης (radial basis function neural network). Στην συνέχεια θα δούμε πώς αυτά τα δύο νευρωνικά χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματός μας, το οποίο αφορά την μοντελοποίηση του τροχού αφύγρανσης που παρουσιάζεται με νευρωνικά δίκτυα.

##### **4.1.1. Το νευρωνικό δίκτυο ως μαύρο κουτί**

Ως αρχή της υλοποίησης, αρκεί να σκεφτούμε το νευρωνικό δίκτυο σαν ένα «μαύρο κουτί», το οποίο δέχεται σαν είσοδο έναν αριθμό  $i$  εισόδων  $x_i$  και δίνει σαν έξοδο  $j$  εξόδους  $y_j$ . Για να λειτουργήσει ένα τέτοιο μαύρο κουτί πρέπει να ορίσουμε τα χαρακτηριστικά του (κάθε είδος νευρωνικού έχει διαφορετικά) και στην συνέχεια να το εκπαιδεύσουμε με έναν αριθμό γνωστών παραδειγμάτων (εισόδους με τις αντίστοιχες γνωστές εξόδους τους). Αφού έχουμε κάνει αυτά τα βήματα, μπορούμε πλέον να εισάγουμε νέες τιμές εισόδων και το νευρωνικό δίκτυο θα μας εξάγει τιμές εξόδων, οι οποίες εφόσον α) η εκπαίδευση είναι ικανοποιητική και β) το σύστημα που προσπαθούμε να εξομοιώσουμε, μπορεί να εξομοιωθεί επαρκώς από το νευρωνικό δίκτυο που επιλέχθηκε, θα είναι κοντά στις επιθυμητές (πραγματικές) τιμές εξόδων.

Στην περίπτωση του συστήματος που καλούμαστε να υλοποιήσουμε, το νευρωνικό δίκτυο θα είναι ένα μαύρο κουτί 4 εισόδων και 4 εξόδων, όπως στην εικόνα 45.



Εικόνα 45. Το Νευρωνικό Δίκτυο ως μαύρο κουτί.

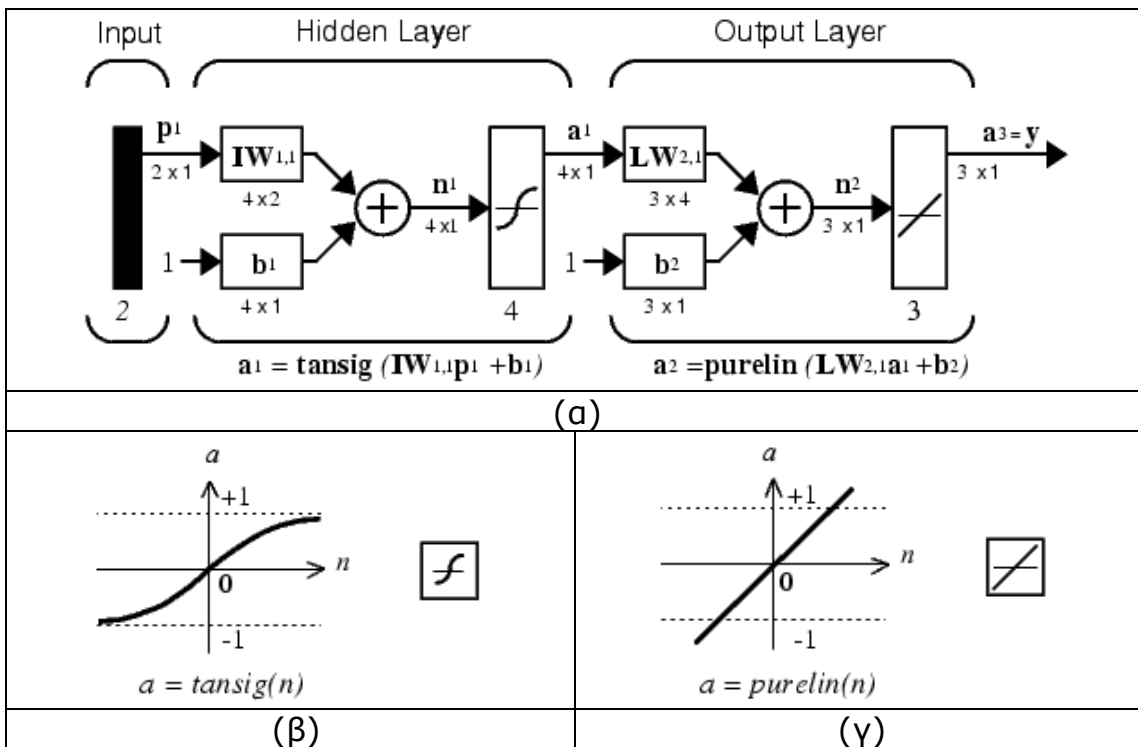
Στην εικόνα 45 έχουμε κρατήσει την σημειολογία του νευρωνικού δικτύου που αναφέρθηκε πιο πάνω, αλλά προσθέσαμε και τις εισόδους-εξόδους που αφορούν το πρόβλημά μας. Δηλαδή, οι εισοδοί μας είναι οι θερμοκρασίες και υγρασίες στις δύο εισόδους ροής αέρα (ροές επεξεργασίας και αναγέννησης). Οι εξοδοί είναι τα αντίστοιχα μεγέθη μετά τον τροχό αφύγρανσης, όπως έχουν εκτιμηθεί από το νευρωνικό δίκτυο (σωστότερος συμβολισμός δηλαδή είναι ο  $\hat{t}_{12}, \hat{t}_{22}, \hat{w}_{12}, \hat{w}_{22}$ ).

#### 4.1.2. Το νευρωνικό δίκτυο εμπρόσθιας διάδοσης

Το πρώτο νευρωνικό δίκτυο που θα υλοποιηθεί είναι το εμπρόσθιας διάδοσης νευρωνικό δίκτυο με οπισθοδρομική διάδοση του σφάλματος (εικόνα 46α). Δίκτυα τέτοιας μορφής μπορούν να έχουν ένα ή παραπάνω κρυφά επίπεδα νευρώνων με μη γραμμικές συναρτήσεις μεταφοράς και ένα επίπεδο εξόδου με γραμμική συνάρτηση μεταφοράς. Τα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου δικτύου που πρέπει να προσδιοριστούν πριν αυτό υλοποιηθεί και εκπαιδευτεί, είναι: α) η συνάρτηση μεταφοράς των νευρώνων του κρυφού επιπέδου (συνήθως σιγμοειδής διαφόρων ειδών, (εικόνα 46β) καθώς και του επιπέδου εξόδου (γραμμική, βλέπε εικόνα 46γ), β) ο αριθμός των νευρώνων κάθε επιπέδου, γ) οι αρχικές τιμές των νευρώνων και δ) οι επιλογές τερματισμού, δηλαδή ο μέγιστος αριθμός των εποχών (επαναλήψεων) για τις οποίες θα εκπαιδεύσουμε το νευρωνικό δίκτυο και το ελάχιστο σφάλμα που επιθυμούμε να επιτύχουμε στα δεδομένα εκπαίδευσης.

$$|y_n - \hat{y}_n| \leq \epsilon, \quad (1)$$

όπου  $y_n$  είναι η πραγματική  $n$ -οστή έξοδος και  $\hat{y}_n$  είναι η  $n$ -οστή έξοδος του νευρωνικού δικτύου από τις συνολικά  $j$  εξόδους του.



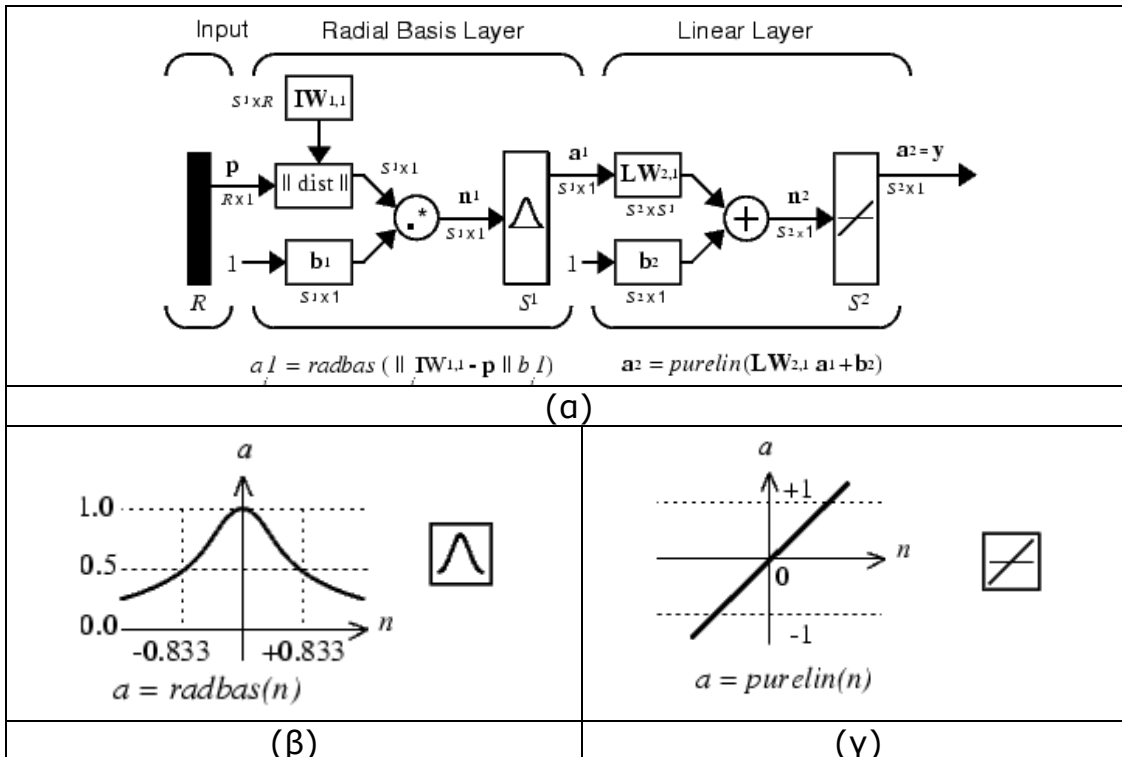
Εικόνα 46 α) Τυπική μορφή ενός νευρωνικού δικτύου εμπρόσθιας διάδοσης. β) Εφαρμοσμένη σιγμοειδής συνάρτηση μεταφοράς. Χρησιμοποιείται ως default συνάρτηση για τα κρυφά επίπεδα νευρώνων στο Matlab. γ) Γραμμική συνάρτηση μεταφοράς που χρησιμοποιείται για τους νευρώνες εξόδου.

Για διαφορετικό σετ παραδειγμάτων εκπαίδευσης, η διαδικασία βελτιστοποίησης έχει ως εξής: για συγκεκριμένα συνάρτηση μεταφοράς, μέγιστο αριθμό εποχών και επιθυμητό σφάλμα, εκπαιδεύουμε το δίκτυο χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικό αριθμό νευρώνων στο κρυφό επίπεδο. Ο αριθμός νευρώνων που συγκλίνει γρηγορότερα στο ελάχιστο σφάλμα επιλέγεται ως βέλτιστος. Εναλλακτικά, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σταθερό αριθμό εποχών (επαναλήψεων) και να ορίσουμε ως βέλτιστο τον αριθμό νευρώνων που σε αυτές τις επαναλήψεις επιτυγχάνει το ελάχιστο σφάλμα.

### 4.1.3. Το νευρωνικό δίκτυο ακτινικών συναρτήσεων βάσης

Το δεύτερο νευρωνικό δίκτυο που επιλέχθηκε είναι το νευρωνικό δίκτυο ακτινικών συναρτήσεων βάσης (εικόνα 47α). Τα νευρωνικά δίκτυα αυτού του είδους αποτελούνται από ένα κρυφό επίπεδο νευρώνων με ακτινικές συναρτήσεις μεταφοράς (εικόνα 47β) και ένα γραμμικό επίπεδο εξόδου (εικόνα 47γ). Μπορούν να επιτύχουν μηδενικό σφάλμα για το δοσμένο πρόβλημα, όταν επιλεγούν να έχουν 100 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Το νευρωνικό δίκτυο αυτής της μορφής έχει μόνο δύο επιλογές που πρέπει να καθοριστούν πριν την εκπαίδευση: α) το είδος της ακτινικής συνάρτησης βάσης που θα χρησιμοποιηθεί και β) τον αριθμό των νευρώνων του κρυφού επιπέδου. Για συγκεκριμένο είδος ακτινικής συνάρτησης βάσης, η διαδικασία βελτιστοποίησης είναι ίδια με αυτή που προαναφέρθηκε, δηλαδή για διάφορους αριθμούς κρυφών νευρώνων το δίκτυο εκπαιδεύεται και επιλέγεται ως βέλτιστος ο αριθμός των νευρώνων που παράγει το επιθυμητό ελάχιστο σφάλμα, που

παράχθηκε από το εμπρόσθιας διάδοσης νευρωνικό.



Εικόνα 47 α) Τυπική μορφή ενός νευρωνικού δικτύου ακτινικών συναρτήσεων βάσης. β) Ακτινική συνάρτηση μεταφοράς. Χρησιμοποιείται ως default συνάρτηση για τα κρυφά επίπεδα νευρώνων στο Matlab. γ) Γραμμική συνάρτηση μεταφοράς που χρησιμοποιείται για τους νευρώνες εξόδου.

## 4.2. Υλοποίηση νευρωνικών δικτύων στο Matlab

Αφού έχουμε παρουσιάσει τις βασικές αρχές που διέπουν τα νευρωνικά δίκτυα που θα υλοποιηθούν, μπορούμε να εφαρμόσουμε όσα προαναφέρθηκαν χρησιμοποιώντας το Neural Network Toolbox του Matlab. Αρχικά ας δούμε ξεχωριστά τις δύο περιπτώσεις Νευρωνικών Δικτύων και πώς αυτές υλοποιούνται και εκπαιδεύονται στο Matlab.

### 4.2.1. Νευρωνικό Δίκτυο Εμπρόσθιας Διάδοσης

Για να υλοποιήσουμε ένα νευρωνικό δίκτυο εμπρόσθιας διάδοσης στο Matlab αρκεί η χρήση τριών συναρτήσεων.

- Αρχικά πρέπει να δημιουργήσουμε το νευρωνικό δίκτυο, ορίζοντας τις βασικές του παραμέτρους. Η σύνταξη της συνάρτησης έχει ως εξής:

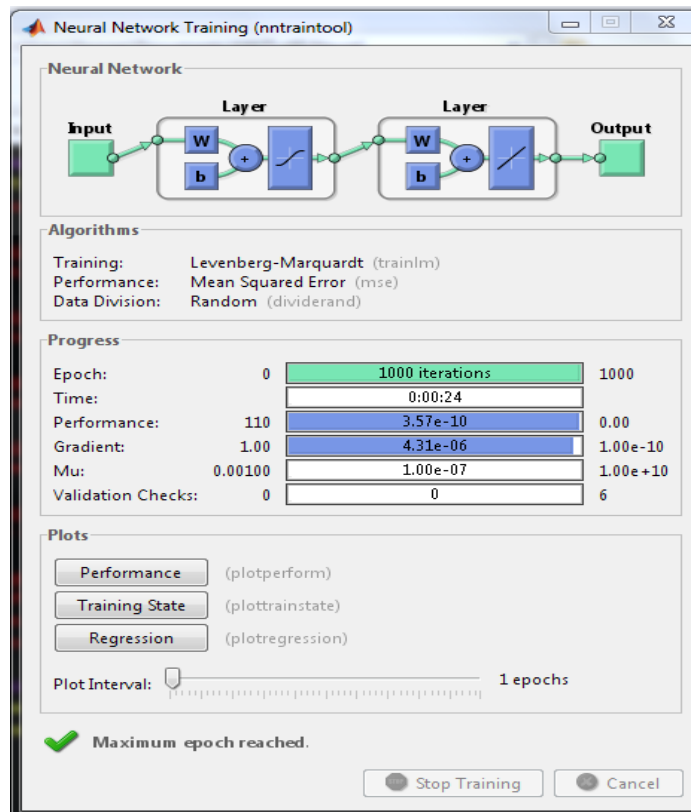
```
net = newff(P,T,S,TF,BTF,BLF,PF,IPF,OPF,DDF)
```

Οι απαραίτητες εισόδους είναι μόνο οι P και T, που περιέχουν τα δεδομένα εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Οι διαστάσεις και των δυο τους στην περίπτωση μας θα είναι 4xM, όπου M ο αριθμός μετρήσεων θερμοκρασίας και υγρασίας που έχουμε στην διάθεσή μας. Επίσης χρήσιμη είναι και η είσοδος S που ορίζει τον αριθμό των νευρώνων των κρυφών επιπέδων (στην περίπτωση μας μόνο ενός κρυφού επιπέδου). Η συνάρτηση μεταφοράς των νευρώνων όλων των επιπέδων ορίζεται από την TF, αλλά αφού δεν είναι σαφώς ορισμένη θα χρησιμοποιήσουμε την default συνάρτηση, που είναι η σιγμοειδής εφραπτομενική (tansig) για το κρυφό επίπεδο και η γραμμική για το επίπεδο εξόδου. Αφού έχουμε ορίσει όλες αυτές τις εισόδους, η έξοδος net είναι το δημιουργημένο νευρωνικό δίκτυο. Για παράδειγμα, αν δώσουμε: `net = newff(x,y,40)`, δημιουργούμε ένα νευρωνικό δίκτυο ενός κρυφού επιπέδου 40 νευρώνων και εισόδου που ορίζεται από τον πίνακα x και εξόδου που ορίζεται από τον πίνακα y.

- Αφού έχουμε δημιουργήσει το net, μπορούμε να το εκπαιδεύσουμε χρησιμοποιώντας την συνάρτηση:

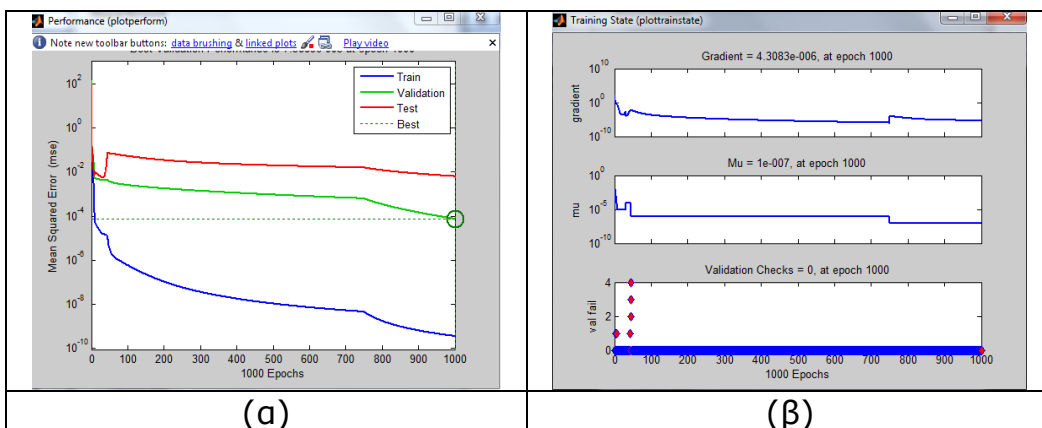
```
[net,tr] = train(net,X,Y,Pi,Ai)
```

Και εδώ δεν είναι απαραίτητη η εισαγωγή όλων των εισόδων. Απαιτούνται μόνο οι τρεις πρώτες. Το net είναι το νευρωνικό που δημιουργήσαμε στο προηγούμενο βήμα, X είναι τα δεδομένα που επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε για την εκπαίδευση και συνήθως είναι ένα υποσύνολο του P που αναφέρθηκε παραπάνω. Δηλαδή, είναι ένας πίνακας 4xN για το πρόβλημά μας, με  $N < M$ . Αναλόγως, το Y είναι ένα υποσύνολο του T και περιέχει τις 4xN επιθυμητές εξόδους (δηλαδή τις πραγματικές μετρήσεις) για τις αντίστοιχες εισόδους X. Στην έξοδο της συνάρτησης παίρνουμε το εκπαιδευμένο δίκτυο net (αν δεν θέλουμε να αντικαταστήσει το αρχικό, μπορούμε να το ονομάσουμε αλλιώς, π.χ. net2), καθώς και ένα σετ μετρήσεων σχετικών με την επίδοση του δικτύου κατά την εκπαίδευση. Στο στάδιο εκτέλεσης της συνάρτησης εκπαίδευσης, στις πρόσφατες εκδόσεις του Matlab ανοίγει ένα παράθυρο με γραφικό περιβάλλον όπως στο Σχ. 4.



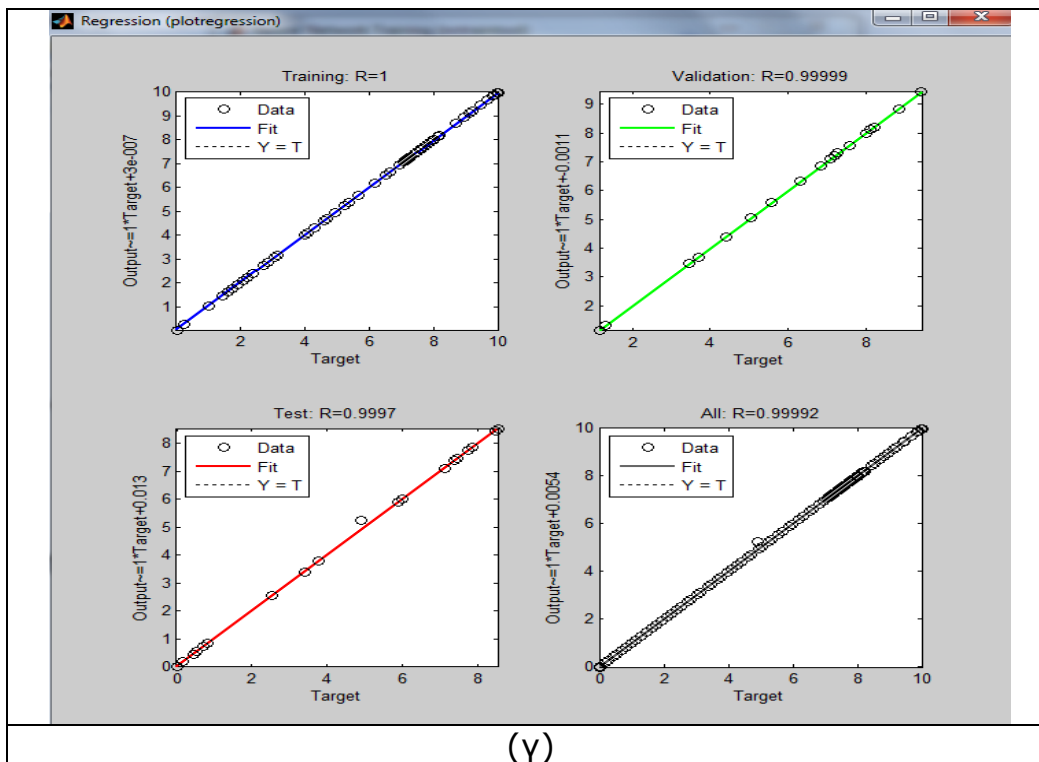
Εικόνα 48 Γραφικό περιβάλλον για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου.

Στο γραφικό περιβάλλον περιλαμβάνονται από πάνω προς τα κάτω: η μορφή του νευρωνικού δικτύου που εκπαιδεύεται, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται κατά την εκπαίδευση, η εξέλιξη της εκπαίδευσης με αριθμούς και μπάρες (επαναλήψεις, χρόνος, απόδοση, παράγωγος του σφάλματος, μέση τιμή και έλεγχος ακεραιότητας) και τέλος 3 χαρακτηριστικές γραφικές παραστάσεις για την εκπαίδευση του δικτύου, που απεικονίζονται στο Σχ. 5 και αφορούν την απόδοση σε κάθε επανάληψη (Σχ. 5α), τα χαρακτηριστικά των σφαλμάτων (Σχ. 5β) και οι γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν το πόσο κοντά είναι οι έξοδοι του νευρωνικού από τις πραγματικές εξόδους (Σχ. 5γ).



(α)

(β)



Εικόνα 49 Γραφικές παραστάσεις απόδοσης της διαδικασίας εκπαίδευσης.

- Τέλος, έχοντας εκπαιδεύσει το νευρωνικό δίκτυο με  $N$  παραδείγματα, μπορούμε να το τεστάρουμε χρησιμοποιώντας άγνωστα, καινούργια παραδείγματα, δηλαδή τα  $M-N$  παραδείγματα που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην εκπαίδευση. Αυτό γίνεται με την συνάρτηση:

$$y_2 = \text{sim}(\text{net}, p)$$

Όπου  $\text{net}$  είναι το εκπαιδευμένο δίκτυο και  $p$  είναι οι είσοδοι για τα παραδείγματα που δεν χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή εκείνες οι στήλες του πίνακα  $P$  που δεν περιλήφθηκαν στον  $X$  (μέγεθος  $4 \times (M-N)$ ) για το πρόβλημά μας). Εισάγοντας τον πίνακα  $p$  στο δίκτυό μας, θα πάρουμε τις εξόδους  $y_2$  που θα θέλαμε να είναι κοντά στις αντίστοιχες εξόδους που πήραμε πειραματικά (δηλαδή τις αντίστοιχες στήλες του πίνακα  $T$  του πρώτου βήματος, έστω  $t$ ). Επομένως, το απόλυτο σφάλμα θα δίνεται από την εξής σχέση:

$$\text{Error} = \text{abs}(y_2 - t);$$

Και το επί τοις εκατό σφάλμα:

$$\text{ErrorPerCent} = (\text{abs}(y_2 - t) / t) * 100;$$

Βέβαια με τον τρόπο που υπολογίστηκαν τα σφάλματα, μας δίνουν το σφάλμα για κάθε παράδειγμα (μέτρηση). Για να πάρουμε την μέση τιμή πρέπει να δώσουμε την εντολή  $\text{mean}(\text{Error}, 2)$  και  $\text{mean}(\text{ErrorPerCent}, 2)$ , όπως θα δούμε και παρακάτω.

## 4.2.2. Νευρωνικό Δίκτυο Ακτινικών Συναρτήσεων Βάσης

Στην περίπτωση του RBF νευρωνικού δικτύου, η δημιουργία και η εκπαίδευση λαμβάνουν χώρα σε ένα βήμα, οπότε οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται μειώνονται σε δύο:

- Η δημιουργία και η εκπαίδευση συντελούνται με την συνάρτηση

$[net, tr] = newrb(P, T, GOAL, SPREAD, MN, DF)$

Και εδώ οι πρώτες δύο εισοδοί της συνάρτησης είναι όπως και στην προηγούμενη ενότητα τα δεδομένα εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου (είσοδοι-έξοδοι). Το GOAL είναι το επιθυμητό σφάλμα για να τερματίσει η εκπαίδευση, το SPREAD είναι το «άνοιγμα» των ακτινικών συναρτήσεων, το MN ο μέγιστος αριθμός νευρώνων που επιτρέπουμε να έχει το νευρωνικό δίκτυο και το DF το πόσους νευρώνες θα προσθέτει η διαδικασία εκπαίδευσης σε κάθε βήμα. Αυτή είναι και η διαφορά της εκπαίδευσης των RBF με αυτή των Feed Forward νευρωνικών δικτύων. Στα RBF ορίζεται το σφάλμα που επιθυμούμε να επιτύχουμε και η εκπαίδευση γίνεται με συνεχή πρόσθεση νευρώνων στο κρυφό επίπεδο μέχρι το σφάλμα να επιτευχθεί. Το γραφικό περιβάλλον που παράγεται κατά την κλήση της συνάρτησης είναι πανομοιότυπο με αυτό του Σχ. 4. Οι έξοδοι της συνάρτησης είναι πάλι το νευρωνικό δίκτυο και η απόδοση της διαδικασίας εκπαίδευσης.

- Το τεστάρισμα του νευρωνικού δικτύου με νέα παραδείγματα γίνεται όπως και στην προηγούμενη ενότητα, δίνοντας την εντολή:

$y2 = sim(net, p),$

με πανομοιότυπες εισόδους και εξόδους της συνάρτησης.

## 4.2.3. Υλοποίηση Νευρωνικών Δικτύων

Αποφασίσαμε να επιλέξουμε ως είσοδο είτε ένα όνομα αρχείου, είτε έναν πίνακα. Ο έλεγχος γίνεται στην αρχή της συνάρτησής μας και επιστρέφει μήνυμα λάθους αν η είσοδος δεν εμπίπτει σε μία από τις δύο αυτές κατηγορίες. Οι επόμενες εισοδοί της συνάρτησης είναι ο αριθμός εισόδων και εξόδων του νευρωνικού (θα μπορούσαμε να θέσουμε και τις δύο τιμές ίσες με το 4, αλλά για λόγους γενικότητας και χρηστικότητας και σε άλλες εφαρμογές το αφήνουμε σαν επιλογή στον χρήστη). Στην συνέχεια εισάγεται ο αριθμός των παραδειγμάτων (μετρήσεων) που θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων. Τα εναπομείναντα παραδείγματα θα χρησιμοποιηθούν αυτομάτως ως νέα, άγνωστα παραδείγματα για το τεστάρισμα. Επόμενη είσοδος είναι ένα διάνυσμα με τους αριθμούς των νευρώνων κρυφού επιπέδου που θα

ελεγχθούν κατά την διάρκεια βελτιστοποίησης του feed forward νευρωνικού δικτύου (για να καταλήξουμε σε αυτούς που παράγουν το ελάχιστο σφάλμα). Το διάνυσμα αυτό θα είναι της μορφής  $[\min_{\text{νευρώνες}}; \text{βήμα αύξησης}; \max_{\text{νευρώνες}}]$ , οπότε αν θέλουμε π.χ. να ελέγξουμε τα αποτελέσματα του δικτύου για 5, 10, 15, 20 και 25 νευρώνες θα θέσουμε σαν είσοδο το [5:5:25]. Αν δεν θέλουμε σταθερό βήμα, μπορούμε να βάλουμε στην είσοδο χειρονακτικά τις επιθυμητές τιμές, δηλαδή π.χ. [5 8 13 18 27 35]. Τέλος, οι δύο τελευταίες εισοδοι ορίζουν το πότε θα σταματήσουν οι επαναλήψεις στην διαδικασία της εκπαίδευσης. Υποχρεωτικός είναι ο ορισμός του επιθυμητού μέγιστου αριθμού επαναλήψεων, ενώ προαιρετικός είναι ο ορισμός επιθυμητού σφάλματος, αφού θεωρούμε ως default στόχο το μηδέν. Έτσι, όποιος αριθμός νευρώνων μας δώσει στον επιλεγμένο αριθμό επαναλήψεων το ελάχιστο σφάλμα, θα επιλεγεί ως βέλτιστος. Στην έξοδο της συνάρτησης επιστρέφονται τα δύο βέλτιστα νευρωνικά δίκτυα, το μέσο απόλυτο και το μέσο απόλυτο επί τοις εκατό σφάλμα που επιτυγχάνουν για κάθε έξοδο του νευρωνικού ξεχωριστά και τέλος τα αποτελέσματα του τεσταρίσματος σε έναν πίνακα που περιλαμβάνει στις πρώτες του γραμμές (4 για την εφαρμογή μας) τις εισόδους για τα παραδείγματα εκπαίδευσης, στις επόμενες 4 τις επιθυμητές (πραγματικές) εξόδους και στις επόμενες 4 και 4, τις εξόδους που παράχθηκαν από το feed forward και το RBF νευρωνικό δίκτυο αντίστοιχα. Ακολουθεί ο κώδικας σε Matlab που υλοποιεί την όλη διαδικασία:

```
function [dataNetFF,dataNetRBF,FFPerf,RBFPerf,TestData] =
GenerateResults(input,numOfInputs,numOfOutputs,trainSet,numOfNeurons,desiredEpochs,desiredError)

% Synarthsh gia thn ylopoihs kai to testarisma enos Feed Forward Neyrwnikou
% Kai enos RBF Neyrwnikou

% EISODOI:
%   input -      Mporei na einai eite ena arxeio ths morfhs pou
%                perigrafetai sthn anafora, eite enas pinakas pou
%                periexei ola ta dedomena [(M eisodous+N
%                e3odous) x K Paradeigmata]
%   numOfInputs - Ari8mos eisodwn neyrwnikou
%   numOfOutputs - Ari8mos e3odwn neyrwnikou
%   trainSet     - Ari8mos paradeigmatwn pou 8a xrhsimopoihsoun
%                gia thn ekpaideysh (ta ypoloipa gia testing)
%   numOfNeurons - Ari8mos neyrwnwn Feed Forward Neyrwnikou pou 8a
%                meleth8oune, ths morfhs [min #: bhma : max #]
%   desiredEpochs- Epi8ymhtos ari8mos epochs.
%   desiredError - Epi8ymhto elaxisto sfalma. Default : 0
% E3ODOI:
%   dataNetFF    - To feed forward neyrwniko pou proekypse
%   dataNetRBF   - To RBF neyrwniko pou proekypse
%   FFPerf       - Ta sfalmata pou epitygchan8hkan me to Feed
%                Forward Neyrwniko gia ka8e e3odo (2xN)
%   RBFPerf     - Ta sfalmata pou epitygchan8hkan me to RBF
%                Neyrwniko gia ka8e e3odo (2xN)
%   TestData    - Ta apotelesmata pou parax8hsan

% Elegxos an h eisodos einai arxeio, pinakas, 'h allh mh apodekth morfhs
if isstr(input)
    A = load(input); % an einai arxeio, fortwse to kai bale ta dedomena ston A
elseif isnumeric(input)
    A = input; % an einai pinakas ane8ese ta dedomena tou ston A
else
    fprintf('Invalid input!\n') % an den einai tipote apo ta dyo => sfalma
    return;
end
%Elegxos gia thn ypar3h epi8ymhtou sfalmatos
if ~exist('desiredError')
    desiredError = 0;
end
```

```

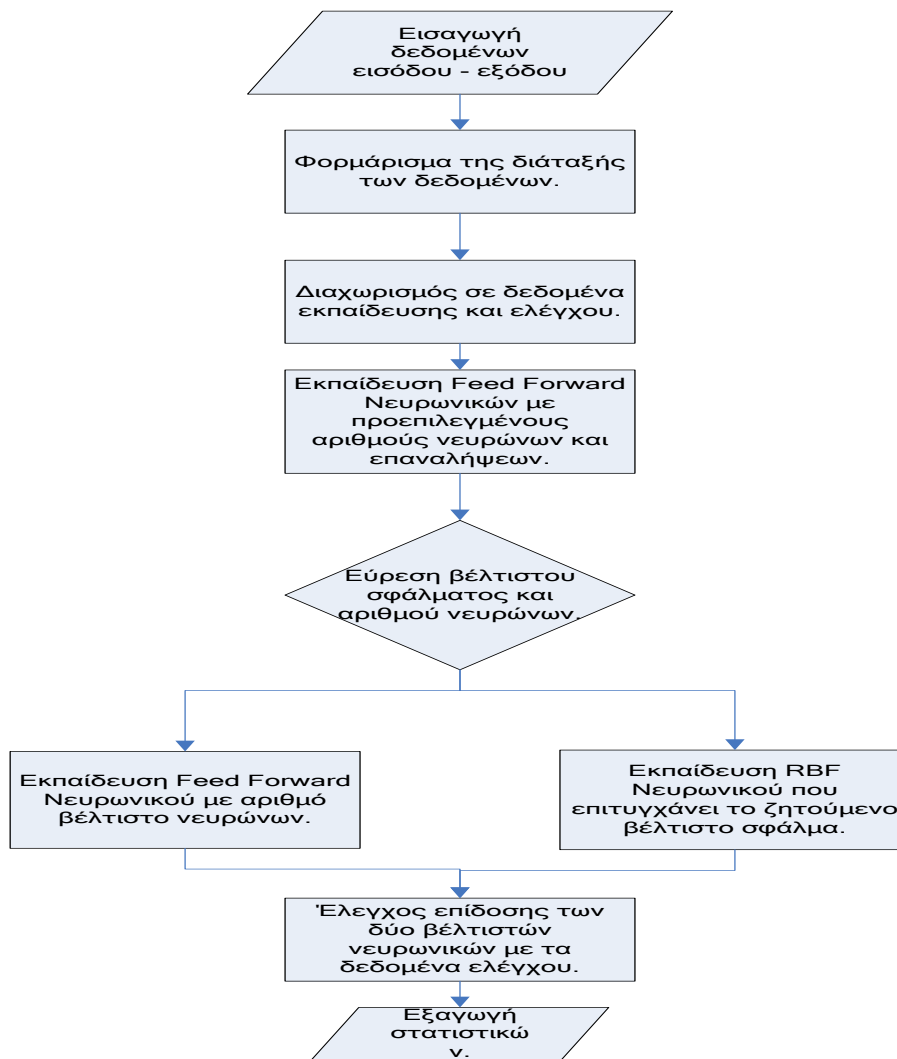
% Elegxos gia thn morfh tou pinaka A kai diaxwrismos twn dedomenwn se eisodous x
% kai e3odous y. 8ewroume oti o ari8mos twn stigmatypwn (3exwrista set metrhsewn)
% einai panta megalyteros apo tis metrhseis
[rows,columns] = size(A);
if rows == numOfInputs+numOfOutputs
    x = A(1:numOfInputs,:);
    y = A(1:numOfOutputs,:);
    totalInstances = columns;
elseif columns == numOfInputs+numOfOutputs
    x = A(:,1:numOfInputs)';
    y = A(:,1:numOfOutputs)';
    totalInstances = rows;
else
    fprintf('Invalid input!\n') % an den einai tipote apo ta dyo => sfalma
    return;
end

% DIADIKASIA YLOPOIHSHS NEYRWNIKWV
error = zeros(1,length(numOfNeurons));
xnew = x(:,trainSet+1:end); % Diaxwrismos newn paradeigmatwn
ynew = y(:,trainSet+1:end); % Pragmatikes e3odoi gia ta nea ayta paradeigmata
for i = 1:length(numOfNeurons) % Gia ton epilegmeno ari8mo neyrwnwn
    %FEED FORWARD NEURAL NETWORK
    dataNetFF = newff(x,y,numOfNeurons(i)); % Kataskeyh feed forward Neural Network me 1 kryfo epipedo
    dataNetFF.trainParam.goal = desiredError; % Orismos tou epi8ymhtou sfalmatos (Mean Square Error)
    dataNetFF.trainParam.epochs = desiredEpochs; % Orismos tou epi8ymhtou ari8mou epanalhpsewn (epochs)
    [dataNetFF,TrainAccuracy] = train(dataNetFF,x(:,1:trainSet),y(:,1:trainSet)); % Ekpaideysh Neyrwnikou diktyou
    error(i) = TrainAccuracy.perf(end); % Apo8hkeysh tou sfalmatos me ton dosmeno ari8mo neyrwnwn
end
[dummy,selectedNeuronNuber] = min(error); % eyresh tou beltistou ari8mou neyrwnwn
dataNetFF = newff(x,y,selectedNeuronNuber);
[dataNetFF,TrFF] = train(dataNetFF,x(:,1:trainSet),y(:,1:trainSet)); % Ekpaideysh beltistou Neyrwnikou diktyou
yff = sim(dataNetFF,xnew); % Testarisma tou neyrwnikou me nea paradeigmata
% RADIAL BASIS NEURAL NETWORK
[dataNetRBF,TrRBF] = newrb(x(:,1:trainSet),y(:,1:trainSet),desiredError); % Ekpaideysh RBF Neyrwnikou diktyou
yrbf = sim(dataNetRBF,xnew); % Testarisma tou neyrwnikou me nea paradeigmata

% YPOLOGISMOS SFALMATWN
meanAbsErrorFF = mean(abs(ynew-yff),2); % Meso apolyto sfalma gia Feed Forward
meanRelErrorFF = mean(abs(ynew-yff)./(ynew),2)*100; % Meso sxetiko sfalma gia Feed Forward (epi tois 100)
FFPerf = [meanAbsErrorFF meanRelErrorFF];
meanAbsErrorRBF = mean(abs(ynew-yrbf),2); % Meso apolyto sfalma gia RBF
meanRelErrorRBF = mean(abs(ynew-yrbf)./(ynew),2)*100; % Meso sxetiko sfalma gia RBF (epi tois 100)
RBFPerf = [meanAbsErrorRBF meanRelErrorRBF];
TestData = [xnew;ynew;yff;yrbf];

```

Αν θέλουμε να κατανοήσουμε περισσότερο τον κώδικα, μπορούμε να το κατορθώσουμε με το διάγραμμα ροής της εικόνας 50.



Εικόνα 50 Διάγραμμα ροής του κώδικα της Matlab.

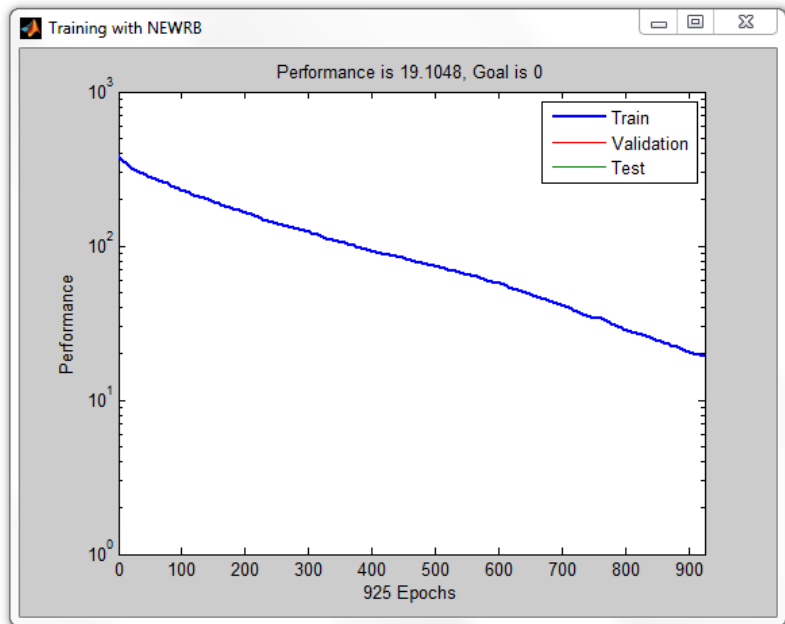
### 4.3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Σε αυτή την ενότητα θα δώσουμε ένα παράδειγμα χρήσης του κώδικα που αναλύθηκε πιο πάνω. Έστω ότι το αρχείο με τα δεδομένα είναι το mesosoros.txt. Για την δημιουργία του αρχείου αυτού πήραμε τις μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας ενός πειράματος. Είχαμε στην διάθεσή μας 65536 μετρήσεις. Στην συνέχεια ανά δέκα μετρήσεις βγάλαμε τον μέσο όρο και με αυτό τον τρόπο φτάσαμε σε 6553 σειρές δεδομένων. Επιλέγουμε ως αριθμούς νευρώνων που θα ελεγχθούν το διάνυσμα 20:5:60, και μέγιστο αριθμό εποχών τις 50. Το αρχείο περιέχει μόνο τις μετρήσεις στην μορφή που προαναφέρθηκε και δεν απαιτείται επεξεργασία των δεδομένων, μπορούμε να καλέσουμε την συνάρτηση από την γραμμή εντολών του Matlab ως εξής (αφού πρώτα την αντιγράψουμε στον φάκελο εργασίας του Matlab):

```
[dataNetFF,dataNetRBF,FFPerf,RBFPerf,NewData4Plot] =
GenerateResults('test.txt',4,4,4000,[20:5:60],50);
```

Επιλέξαμε ως αριθμό παραδειγμάτων για την εκπαίδευση τα 4000. Οι υπόλοιπες 2553 μετρήσεις χρησιμοποιούνται για το τεστάρισμα των νευρωνικών.

```
>> X = load('mesosoros.txt');
[dataNetFF,dataNetRBF,FFPerf,RBFPerf,NewData4Plot] = GenerateResults(X,4,4,4000,[20:5:60],50);
PlotInputOutput(2,2,NewData4Plot)
NEWRB, neurons = 0, MSE = 389.536
NEWRB, neurons = 25, MSE = 310.058
NEWRB, neurons = 50, MSE = 279.056
NEWRB, neurons = 75, MSE = 256.255
NEWRB, neurons = 100, MSE = 227.848
NEWRB, neurons = 125, MSE = 208.57
NEWRB, neurons = 150, MSE = 194.315
NEWRB, neurons = 175, MSE = 176.148
NEWRB, neurons = 200, MSE = 164.149
NEWRB, neurons = 225, MSE = 150.876
NEWRB, neurons = 250, MSE = 138.651
NEWRB, neurons = 275, MSE = 131.112
NEWRB, neurons = 300, MSE = 122.784
NEWRB, neurons = 325, MSE = 113.468
NEWRB, neurons = 350, MSE = 105.669
NEWRB, neurons = 375, MSE = 98.8628
NEWRB, neurons = 400, MSE = 92.2094
NEWRB, neurons = 425, MSE = 87.8188
NEWRB, neurons = 450, MSE = 83.7437
NEWRB, neurons = 475, MSE = 77.3543
NEWRB, neurons = 500, MSE = 73.8178
NEWRB, neurons = 525, MSE = 69.0302
NEWRB, neurons = 550, MSE = 65.0174
NEWRB, neurons = 575, MSE = 60.9939
NEWRB, neurons = 600, MSE = 57.0109
NEWRB, neurons = 625, MSE = 52.3306
NEWRB, neurons = 650, MSE = 48.3986
NEWRB, neurons = 675, MSE = 44.6122
NEWRB, neurons = 700, MSE = 40.9244
NEWRB, neurons = 725, MSE = 36.8661
NEWRB, neurons = 750, MSE = 34.1108
NEWRB, neurons = 775, MSE = 31.7661
NEWRB, neurons = 800, MSE = 28.431
NEWRB, neurons = 825, MSE = 26.5317
NEWRB, neurons = 850, MSE = 24.2157
NEWRB, neurons = 875, MSE = 22.3701
NEWRB, neurons = 900, MSE = 20.3486
NEWRB, neurons = 925, MSE = 19.1048
```



Τα αποτελέσματα για τα δεδομένα μας φαίνονται αν δούμε σε απεικόνιση 15 δεκαδικών (format long) τα ποσοστά επιτυχίας στα άγνωστα παραδείγματα:

>> format long

>> FFPerf

FFPerf =

```
0.000715582557149    0.610038573436500
0.002011534771779    0.000487123957676
0.001356418438652    1.379930374434342
0,000426011603060    0.000091688771180
```

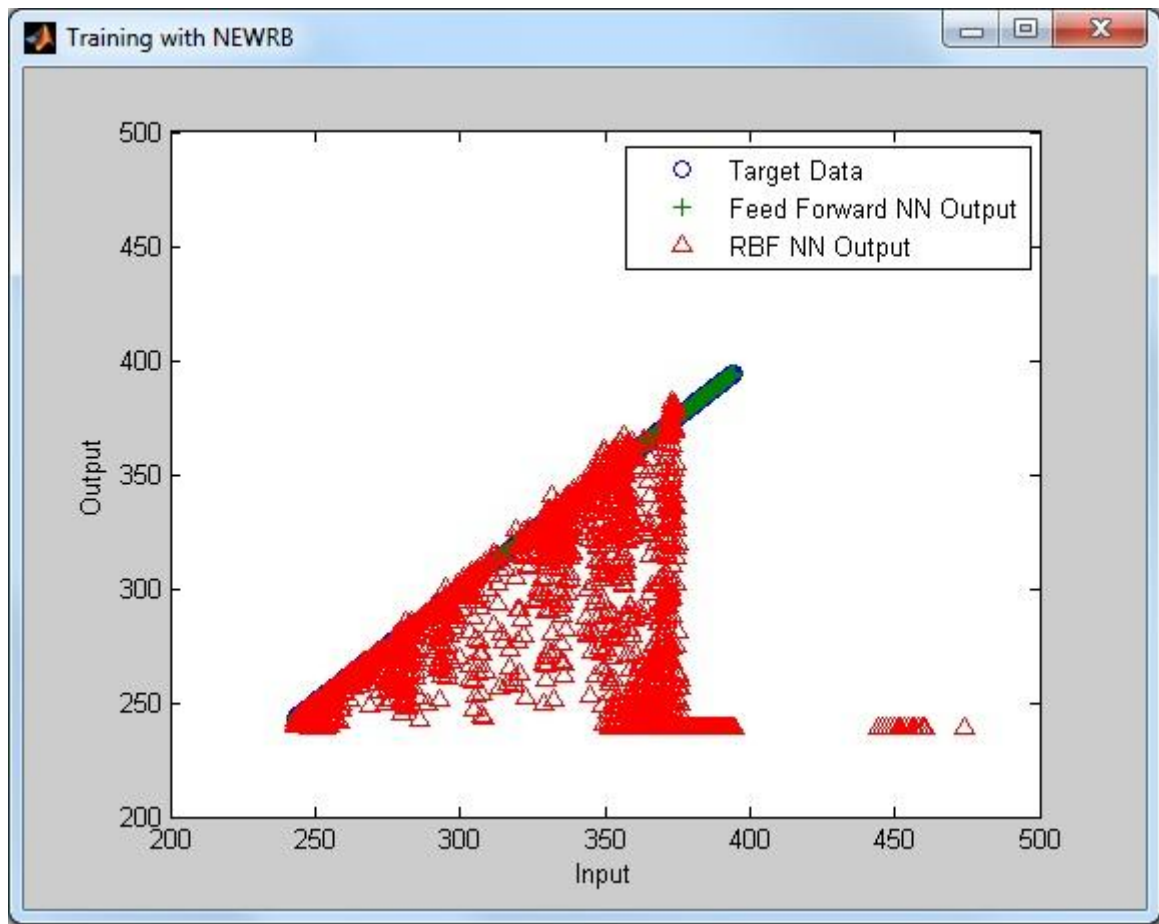
>> RBFPerf

RBFPerf =

1.0e+003 \*

0.000168770668878	0.142931192474040
0.065802073899209	0.017766441925893
0.001230396329719	1.561584564713888
0.015823412614727	0.003503270381794

Στην πρώτη στήλη απεικονίζεται το μέσο απόλυτο σφάλμα για κάθε έξοδο και στην δεύτερη το μέσο απόλυτο επί τοις εκατό σφάλμα για κάθε έξοδο, πρώτα για feed forward νευρωνικό και μετά για το RBF. Παρατηρούμε ότι ακόμα και το ποσοστιαίο σφάλμα είναι πολύ μικρό για το feed forward νευρωνικό ενώ είναι ιδιαίτερα μεγάλο για το RBF. Αν θέλουμε τώρα να δούμε σε γραφική παράσταση π.χ. την 1<sup>η</sup> έξοδο (πραγματική και παραγόμενη από τα νευρωνικά δίκτυα) συναρτήσει της 1<sup>ης</sup> εισόδου, παίρνουμε:



Εικόνα 51

αφού πληκτρολογήσουμε τις παρακάτω εντολές στην γραμμή εντολών:

```
>> plot(NewData4Plot(1,:),NewData4Plot(5:9,:), 'o', NewData4Plot(1,:),NewData4Plot(9,:), '+', NewData4Plot(1,:),NewData4Plot(13,:), '^')
>> legend('Target Date','Feed Forward NN Output','RBF NN Output')
>> ylabel('1st Output')
>> xlabel('1st Input')
```

Από την μορφή της γραφικής παράστασης φαίνεται ακόμη πιο παραστατικά η σχεδόν πλήρης ταύτιση των εξόδων των νευρωνικών δικτύων με τις αληθινές για το feed forward νευρωνικό, και την μεγάλη διαφοροποίησή τους στην περίπτωση του RBF. Είναι προφανές ότι μόνο το νευρωνικό δίκτυο feed forward μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα.

Για πιο εύκολη απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων υλοποιήθηκε και η συνάρτηση PlotInputOutput.m, στην οποία εισάγονται ο αύξων αριθμός της εισόδου, ο αύξων αριθμός της εξόδου και ο πίνακας NewData4Plot που ελήφθη από την συνάρτηση GenerateResults. Η συνάρτησή μας δίνει την πιο πάνω γραφική παράσταση όταν την καλέσουμε από την γραμμή εντολών ως εξής:

```
>> PlotInputOutput(1,1,NewData4Plot)
```

#### 4.4. Συμπεράσματα

Είχαμε στην διάθεση μας πραγματικές μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας ενός συστήματος ψύξης με αφύγρανση.

Λόγω πολύ μεγάλου όγκου δεδομένων ανά δέκα βγάλαμε το μέσο όρο των μετρήσεων αυτών και δημιουργήσαμε έναν πίνακα με την ονομασία mesosoros.txt. Σκοπός μας είναι να εξετάσουμε κατά πόσο μπορούν να προβλεφθούν οι τιμές της υγρασίας και θερμοκρασίας που θα έχουμε με την χρησιμοποίηση νευρωνικών δικτύων του Matlab. Για το λόγο αυτό δημιουργήσαμε δύο διαφορετικά νευρωνικά δίκτυα, το εμπρόσθιας διάδοσης και το δίκτυο ακτινικών συναρτήσεων βάσης. Με την χρήση λοιπόν του κώδικα που δημιουργήσαμε στο Matlab πήραμε τις τιμές που προέβλεπε το κάθε δίκτυο και τις συγκρίναμε με τις πραγματικές για να δούμε το σφάλμα του κάθε δικτύου. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

	Μέσο απόλυτο σφάλμα δικτύου εμπρόσθιας διάδοσης (FF)	Μέσο απόλυτο επί τοις εκατό σφάλμα δικτύου εμπρόσθιας διάδοσης (FF)
Έξοδος 1	0.00072	0.61004
Έξοδος 2	0.00201	0.00049
Έξοδος 3	0.00136	1.37993
Έξοδος 4	0,00042	0.00009

Πίνακας 3. Τιμές σφαλμάτων του δικτύου εμπρόσθιας διάδοσης για όλες τις εξόδους

	Μέσο απόλυτο σφάλμα δικτύου ακτινικών συναρτήσεων βάσης (RBF)	Μέσο απόλυτο επί τοις εκατό σφάλμα δικτύου ακτινικών συναρτήσεων βάσης (RBF)
Έξοδος 1	0.169	142.931
Έξοδος 2	65.802	17.766
Έξοδος 3	1.230	1561.585
Έξοδος 4	15.823	3.503

Πίνακας 4. Τιμές σφαλμάτων του δικτύου ακτινικών συναρτήσεων βάσης για όλες τις εξόδους

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τους παραπάνω πίνακες το δίκτυο ακτινικών συναρτήσεων βάσης παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις που αποκλίνουν από τις πραγματικές μετρήσεις σε όλες τις εξόδους και κυρίως στις τιμές υγρασίας. Συμπερασματικά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξομοίωση τέτοιων συστημάτων.

Αντίθετα όμως το δίκτυο εμπρόσθιας διάδοσης όπως παρατηρείται από τον πίνακα 3 έχει σαφώς μικρότερα σφάλματα και προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό της πραγματικές τιμές. Αυτό το καθιστά ιδανικό για την χρήση του για την εκτίμηση της συμπεριφοράς συστήματος ψύξης με αφύγρανση.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] The Right to Healthy Indoor Air' Report on a WHO meeting Bilthoven, The Netherlands 15-27 May 2000
- [2] [Http://www.nrel.gov/desiccantcool](http://www.nrel.gov/desiccantcool)
- [3] USA Patent Office, patent number 4977753, Rottenburg
- [4] <http://www.cibse.org/>
- [5] Desiccant Cooling: State of the Art assessment, October 1992, Ahmed Pasaran et al. NREL
- [6] Advanced Commercial Liquid – Desiccant Technology Development Study, Andy Lowenstein et al. NREL/TP-550-24688
- [7] Criteria for moisture control, Butterworths, Published 1990, G.W.Brundrett.
- [8] Desiccant Cooling and Dehumidification, Copyright 1992, ASHRAE.
- [9] Low humidity air and air conditioning, B.Warwicker, CIBSE Journal, November 1995.
- [10] Humidity Control Design Guide for Commercial and Institutional Buildings, Harriman Brundrett Kittler, ASHRAE
- [11] The energy related and environmental aspects of desiccant cooling. C.B.Beggs.
- [12] USA Patent Office, Patent number 5187946, Maisotsenko
- [13] USA Patent Office, Patent number 1986529, Ray
- [14] USA Patent Office. Patent number 5050391, Tsimmerman
- [15] USA Patent Office. Patent number 4171620, Turner
- [16] [www3.eureka.be/home/](http://www3.eureka.be/home/). Programme E!2098
- [17] Pons M, Feng Y. Characteristic parameters of adsorptive refrigeration cycles with thermal regeneration. *Appl Therm Eng* 1997;17(3): 289–98.
- [18] Wang RZ, Oliveira RG. Adsorption refrigeration—an efficient way to make good use of waste heat and solar energy. *Prog Energy Combust Sci* 2006;32(4):424–58.
- [19] Fan Y, Luo L, Souyri B. Review of solar sorption refrigeration technologies: development and applications. *Renew Sust Energy Rev* 2007;11(8):1758–75.
- [20] Ron M. A hydrogen heat pump as a bus air conditioner. *J Less-Common Met* 1984;104(2):259–78.
- [21] Han BQ, Zhu RQ, Wu JY. A Study on zeolite molecular sieve adsorption refrigeration using exhaust heat from diesel engine. In: *Proceedings of the international conference on energy saving in refrigeration*; 1986. p. 104–9.
- [22] Critoph RE, Metcalf SJ. Specific cooling power intensification limits in ammonia–carbon adsorption refrigeration systems. *Appl Therm Eng* 2004;24(5–6):661–78.
- [23] Saha BB, Koyama S, Lee JB, Kuwahara K, Alam KCA, Hamamoto Y, et al. Performance evaluation of a low-temperature waste heat driven multi-bed adsorption chiller. *Int J Multiphase Flow* 2003;29(8): 1249–63.
- [24] Chua HT, Ng KC, Malek A, Kashiwagi T, Akisawa T, Saha BB. Modeling the performance of two-bed, silica gel–water adsorption chillers. *Int J Refrig* 1999;22(3):194–204.
- [25] Srivastava NC, Eames IW. A review of adsorbents and adsorbates in solid-vapour adsorption heat pump systems. *Appl Therm Eng* 1998;18: 707–14.
- [26] Iloje OC, Ndili AN, Enibe SO. Computer simulation of a CaCl<sub>2</sub> solid adsorption solar refrigerator. *Energy* 1995;20(11):1141–51.
- [27] Kato Y, Yamada M, Kanie T, Yoshizawa Y. Calcium oxide/carbon dioxide reactivity in a packed bed reactor of a chemical heat pump for high-temperature gas reactors. *Nucl Eng Des* 2001;210:1–8.
- [28] Ponc V, Knor Z, Cerny S. *Adsorption on solids*. London, England: Butterworth Group; 1974.
- [29] Zhang YH. *Adsorption function*. Shanghai, China: Publishing House of Scientific and Technological Literature in Shanghai; 1989.
- [30] Gasser RPH. *The chemical adsorption and catalysis of metal*
- [31] Yang RT. *Gas separation by adsorption methods*.
- [32] Saha BB, El-Sharkawy II, Chakraborty A, Koyama S. Study on an activated carbon fiber–ethanol adsorption chiller. Part II. Performance evaluation. *Int J Refrig* 2007;30(1):96–102.

- [33] Zhong Y, Critoph RE, Thorpe RN, Tamainot-Telto Z, Aristov YuI. Isothermal sorption characteristics of the BaCl<sub>2</sub>-NH<sub>3</sub> pair in a vermiculite host matrix. *Appl Therm Eng* 2007;27(14-15):2455-62.
- [34] Peng SP, Wang B, Luo ZJ. Structure of atoms and molecules, complex compound colloid chemistry. Chengdou, China: People's Publishing House of Sichuan; 1984
- [35] Ci YX, Zhou TZ. The polyatomic complex compound in analytical chemistry. Beijing, China: Publishing House of Science; 1999
- [36] Oosumi Y. The characteristics and application of metal hydrides.
- [37] Dellero T, Sarneo D, Touzain Ph. A chemical heat pump using carbon fibers as additive. Part I. Enhancement of thermal conduction. *Appl Therm Eng* 1999;19:991-1000.
- [38] Spinner B, Rheault F. Kinetics models in solid/gas reactions under imposed pressure and temperature constraints. In: Proceedings of the international workshop on heat transformation and storage; 1985. p. 9-11.
- [39] Cho S-H, Kim J-N. Modeling of a silica gel/water adsorption-cooling system. *Energy* 1992;17(9):829-39.
- [40] Poyelle F, Guillemot JJ, Meunier F. Analytical study of a gas-fired adsorptive air-conditioning system. *ASHRAE Trans* 1996;102:1128-36.
- [41] Cacciola G, Hajji A, Maggio G, Restuccia G. Dynamic simulation of a recuperative adsorption heat pump. *Energy* 1993;18(11):1125-37.
- [42] Critoph RE. Performance limitations of adsorption cycles for solar cooling. *Solar Energy* 1988;14(1):21-31.
- [43] Tamainot Z, Critoph RE. Adsorption refrigerator using monolithic carbon/ammonia pair. *Int J Refrig* 1997;20(2):146-55.
- [44] Daou K, Wang RZ, Xia ZZ, Yang GZ. Experimental comparison of the sorption and refrigerating performances of a CaCl<sub>2</sub> impregnated composite adsorbent and those of the host silica gel. *Int J Refrig* 2007;30(1): 68-75.
- [45] Wang LW, Wang RZ, Lu ZS, Chen CJ, Wang K, Wu JY. The performance of two adsorption ice making test units using activated carbon and a carbon composite as adsorbents. *Carbon* 2006;44:2671-80.
- [46] Tchernev DI, Emerson DT. High-efficiency regenerative zeolite heat pump. *ASHRAE Trans* 1998;94(2):2024-32.
- [47] Wang DC, Wu JY, Xia ZZ, Zhai H, Wang RZ, Dou WD. Study of a novel silica gel-water adsorption chiller. Part II. Experimental study. *Int J Refrig* 2005;28(7):1084-91.
- [48] Wang DC, Xia ZZ, Wu JY, Wang RZ, Zhai H, Dou WD. Study of a novel silica gel-water adsorption chiller. Part I. Design and performance prediction. *Int J Refrig* 2005;28(7):1073-83.
- [49] Saha BB, Boelman EB, Kashiwaki T. Computational analysis of an advanced adsorption-refrigeration cycle. *Energy* 1995;20(10):983-94.
- [50] Lu YZ, Wang RZ, Zhang M, Jiangzhou S. Adsorption cold storage system with zeolite-water working pair used for locomotive air conditioning. *Energy Convers Manage* 2003;44(10):1733-43.
- [51] Mbaye M, Aidoun Z, Valkov V, Legault A. Analysis of chemical heat pumps (CHPS): basic concepts and numerical model description. *Appl Therm Eng* 1998;18:131-46.
- [52] Willers E, Groll M. Evaluation of metal hydride machines for heat pumping and cooling applications. *Int J Refrig* 1999;22(1):47-58.
- [53] Oliveira RG, Wang RZ, Wang C. Evaluation of the cooling performance of a consolidated expanded graphite-calcium chloride reactive bed for chemisorption icemaker. *Int J Refrig* 2007;30(1):103-12.
- [54] Wang LW, Wang RZ, Wu JY, Wang K. Research on the chemical adsorption precursor state of CaCl<sub>2</sub>-NH<sub>3</sub> for adsorption refrigeration. *Sci China Ser E* 2005;48(1):70-82.
- [55] Vasiliev LL, Mishkinis DA, Antukh AA, Kulakov AG. Resorption heat pump. *Appl Therm Eng* 2004;24:1893-903.
- [56] Vasiliev LL, Mishkinis DA, Antuh A, Snelson K, Vasiliev Jr LL. Multisalt-carbon chemical cooler for space applications. In: Proceedings of the international absorption heat pump conference; 1999. p. 579-83.
- [57] Satagawa H, Suzuki K. Basis and design of adsorption. Beijing, China: Publishing House of Chemical Industry; 1983

- [58] Mohamed EM, Sawsan SH, Tarek MAF. Synthesis, characterization and metal chelating properties of silica-physisorbed and chemisorbed-2, 5-dioxypiperazine. *Polyhedron* 007;26(14):3956–62.
- [59] Dawoud B, Aristov YuI. Experimental study on the kinetics of water vapor sorption on selective water sorbents, silica gel and alumina under typical operating conditions of sorption heat pumps. *Int J Heat Mass Transf* 2003;46:273–81.
- [60] Chen L, Yu SH, Tan YK. The experimental research on the adsorption refrigeration characteristics of ammonia. *J Refrig* 2004;(4):18–22
- [61] Critoph RE, Tamainot-Telto Z, Davies GNL. Design of an adsorption generator utilising a novel carbon–aluminium laminate. In: *Proceedings of the HPC international conference*; 1997. p. 349–58.
- [62] Critoph RE. Forced convection adsorption cycle with packed bed heat regeneration. *Int J Refrig* 1999;22(1):38–46.
- [63] Pons M, Meunier F, Cacciola G, Critoph RE, Groll M, Puigjaner L, et al. Thermodynamic based comparison of sorption systems for cooling and heat pumping. *Int J Refrig* 1999;22:5–17.
- [64] Eun TH, Song HK, Han JH, Lee KH, Kim JN. Enhancement of heat and mass transfer in silica-expanded graphite composite blocks for adsorption heat pumps. Part II. Cooling system using the composite blocks. *Int J Refrig* 2000;23:74–81.
- [65] Lai HM. An enhanced adsorption cycle operated by periodic reversal forced convection. *Appl Therm Eng* 2000;20:595–617.
- [66] Wang LW, Wang RZ, Lu ZS, Xu YX, Wu JY. Split heat pipe type compound adsorption ice making unit for fishing boats. *Int J Refrig* 2006;29:456–68.
- [67] Wang LW, Wang RZ, Lu ZS, Chen CJ, Wu JY. Comparison of the adsorption performance of compound adsorbent in a refrigeration cycle with and without mass recovery. *Chem Eng Sci* 2006;61(11): 3761–70.
- [68] Chen L, Dong PF, Fu WY, Sun LM. The experimental research on the adsorption performance of composite adsorbent for SrCl<sub>2</sub>. *Fluid Mech* 2003;31:201–3
- [69] J.M. Cejudo, R. Moreno, and A. Carrillo, "Physical and neural network models of a silica-gel desiccant wheel," *Energy & Buildings*, vol. 34, 2002, pp. 837–844.
- [70] A. Kodama, T. Hirayama, M. Goto, T. Hirose, and R.E. Critoph, "The use of psychrometric charts for the optimisation of a thermal swing desiccant wheel," *Applied thermal engineering*, vol. 21, 2001, pp. 1657–1674.
- [71] [www.solair-project.eu](http://www.solair-project.eu)