



ΕΘΝΙΚΟ  
ΜΕΤΣΟΒ. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΝ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Θερμότητας

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

### Αριθμητικές Μέθοδοι Μοντελοποίησης Υλικών Αλλαγής Φάσης

---

ΛΥΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:  
ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ  
ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π.

©ΕΜΠ  
ΑΘΗΝΑ 2007



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου, κυρίους Κίμωνα Αντωνόπουλο, Καθηγητή Ε.Μ.Π., και Χρήστο Τζιβανίδη, Λέκτορα Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου έδωσαν να εκπονήσω τη διπλωματική εργασία μου στον τομέα και το μάθημά τους, αντίστοιχα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω στον κύριο Χρήστο Τζιβανίδη, τόσο για την παροχή συγγραμμάτων σχετικών με το αντικείμενο, όσο και για το έμπρακτο ενδιαφέρον του σε κρίσιμα σημεία της όλης διαδικασίας.

Ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα κύριο Ελευθέριο Κραββαρίτη για τη βοήθεια και καθοδήγησή του και ζητώ κατόπιν εορτής συγγνώμη από την ευγενέστατη σύζυγό του την οποία τόσο και τόσο φορές ενόχλησα με τα τηλεφωνήματά μου.

Δεν μπορώ να μην ευχαριστήσω τους εγκάρδιους φίλους κυρίους Γεώργιο Κατσίρο και Σωτήριο Καψίλη για την ανυπολόγιστης αξίας βοήθειά τους σε θέματα γραμματειακής υποστήριξης και εμφάνισης του παρόντος.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και να τους εκφράσω τον ειλικρινή θαυμασμό μου, που υπέμειναν καρτερικά την ανυπόφορη συμπεριφορά μου όλο αυτόν τον καιρό.

Δημήτριος Α. Λύκος

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν πόνημα είναι δισκελές. Αποτελείται από δύο βασικά μέρη, αμφότερα βιβλιογραφικού κυρίως χαρακτήρα και έχει σαν σκοπό την σφαιρική αντιμετώπιση του θέματός του. Είναι μία εργασία εκπονημένη στα πλαίσια του μαθήματος της θερμικής συμπεριφοράς των κτιρίων, του επίσημου οδηγού σπουδών του Ε.Μ.Π., και θεωρήθηκε σκόπιμο μέρος της να κινηθεί στα πλαίσια του αντικειμένου του εν λόγω μαθήματος.

Ως εκ τούτου, το πρώτο μέρος ασχολείται με τα υλικά αλλαγής φάσης, σε θεωρητικό επίπεδο, καθώς αποτελούν μία καινοτομία και έναν σημαντικό τρόπο μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Διατηρώντας κατά το δυνατόν τον περιεκτικό χαρακτήρα του κειμένου, παρουσιάζονται τα υλικά που υπάρχουν και χρησιμοποιούνται σήμερα, στις περισσότερο γνωστές και διαδεδομένες εφαρμογές, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στις κτιριακές εγκαταστάσεις. Ουσιαστικός σκοπός κατά τη συγγραφή του πρώτου μέρους του παρόντος ήταν ο εμπλουτισμός του αντίστοιχου επισήμου εκπαιδευτικού συγγράμματος του Ε.Μ.Π., και γι' αυτό άλλωστε ακολουθήθηκε η θεματική διαμόρφωση του πρωτοτύπου, με την πληρότητα του συνόλου σαν πρώτη προτεραιότητα. Ύστερα από πρωτοβουλία του συγγραφέα, περιλήφθηκε στα πλαίσια της γενικής περιγραφής και ένα αρκετά εκτεταμένο κομμάτι το οποίο αφορά στο νερό και στα κυριότερα και αποδοτικότερα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης στη σύγχρονη βιομηχανία, στα οποία αυτό χρησιμοποιείται σαν υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας αφορά σε αυτό καθ' αυτό το θέμα της, το οποίο είναι οι μέθοδοι αριθμητικής επίλυσης του φαινομένου της μονοδιάστατης διάχυσης (αγωγής) θερμότητας. Είναι κάτι περισσότερο από προφανής η σύνδεση των δύο μερών μεταξύ τους.

Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και γι' αυτό το λόγο το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει το θεωρητικό μαθηματικό υπόβαθρο που απαιτείται για την πραγματεία του. Αντί να περιληφθεί μία στείρα αντιγραφή της διεθνούς βιβλιογραφίας, όλων των αριθμητικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται, προτιμήθηκε η επιλεκτική παρουσίαση των κομματιών εκείνων που θα εφαρμοστούν εδώ. Σε αρκετά σημεία διατηρήθηκε η διατύπωση του βιβλίου του Κ. Αντωνόπουλου στην περιγραφή των μεθόδων, γιατί κρίθηκε περισσότερο προσιτή και κατανοητή από μία ενδεχόμενη προσπάθεια μετάφρασης των εξετασμένων ξενόγλωσσων συγγραμμάτων. Παρ' όλ' αυτά, διάφορα σημεία υπέστησαν αλλαγές ώστε να αναφέρονται αποκλειστικά και μόνο στο σκοπό της παρούσας εργασίας. Τέλος, στο υπολογιστικό μέρος επιχειρείται η εξακρίβωση της αποτελεσματικότητας των παραπάνω μεθόδων σε ιδανικό πρόβλημα.

Αναλυτικά:

### Μέρος Πρώτο

Το πρώτο κεφάλαιο επιχειρεί μία εισαγωγή στην εργασία, με παράθεση στοιχείων γύρω από τη γενικότερη ενεργειακή κρίση που πλήττει τον πλανήτη Γη.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιέχει θεωρητικά στοιχεία γύρω από το φαινόμενο της αγωγής της θερμότητας και του φαινομένου της αλλαγής φάσης, με εισαγωγικά και εγκυκλοπαιδικά στοιχεία γύρω από τις σχετικές υπεισερχόμενες έννοιες. Συμπεριλαμβάνεται επίσης ο ορισμός των υλικών αλλαγής φάσης και η εισαγωγή στην ανάλυση που θα ακολουθήσει.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μία περιεκτική κατηγοριοποίηση των υλικών αυτών βασισμένη στη φύση τους, με παρουσίαση των επιμέρους υποκατηγοριών. Επίσης περιέχει πληροφορίες γύρω από τα βασικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών, όπως

την κατάδειξη των κρίσιμων ιδιοτήτων και περιγραφή φαινομένων που αποτελούν σημαντικό κομμάτι της έρευνας της περιοχής.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιέχει πληροφορίες γύρω από την πειραματική-εργαστηριακή συμπεριφορά των υλικών

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει επιγραμματικά τις μεθόδους επεξεργασίας και προετοιμασίας των υλικών, ώστε αυτά να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε σύγχρονες εφαρμογές.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή των εφαρμογών, στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν υλικά αλλαγής φάσης, από την απαρχή του επιστημονικού ενδιαφέροντος. Σημειώνεται εδώ, πως η ιστορική αναδρομή περιορίζεται σε κτιριακές εφαρμογές, για δύο κυρίως λόγους: το θεωρητικό πρώτο μέρος δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στις κτιριακές εφαρμογές όπως προαναφέρθηκε, και δεύτερον, λόγω του όγκου των πληροφοριών που θα έπρεπε να συμπεριληφθούν σε διαφορετική περίπτωση, πέραν του γεγονότος ότι μία προσπάθεια αναδρομής σε όλων των ειδών τις εφαρμογές δεν είχε ιδιαίτερες ελπίδες επιτυχίας, λόγω της σχεδόν παντελούς έλλειψης σοβαρής βιβλιογραφίας πάνω σε τόσο ειδικά θέματα.

Το έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζει συνοπτικά τις σημερινές γνωστές εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης σε διάφορους τομείς, συνδυάζοντας την οικουμενική τεχνογνωσία. Και πάλι δίνεται ξεχωριστή σημασία στον κτιριακό τομέα. Οι αναφορές της παραγράφου αυτής δυστυχώς προέρχονται στη συντριπτική τους πλειοψηφία από τους δικτυακούς τόπους των ανά τον κόσμο εταιριών, οι οποίες ασχολούνται με το αντικείμενο, οπότε στα απαραίτητα οπτικά βοηθήματα του κειμένου ήταν αναπόφευκτη η εμφάνιση της ονομασίας ή του λογοτύπου της εκάστοτε εταιρίας ή οργανισμού.

Το όγδοο κεφάλαιο συγκεντρώνει γενικά συμπεράσματα γύρω από τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης.

Στο ένατο κεφάλαιο, τέλος, επιχειρείται μία αντίστοιχη ανάλυση με την παραπάνω, αποκλειστικά για το νερό, το οποίο είναι το πρώτο και ευρύτερα χρησιμοποιημένο και χρησιμοποιούμενο υλικό αλλαγής φάσης. Η σύγχρονη βιομηχανία το εκμεταλλεύεται σε εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας και έγινε μία προσπάθεια παρουσίασης των κυριότερων από αυτές.

## Μέρος Δεύτερο

Το δέκατο κεφάλαιο αναφέρεται στις διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα φαινόμενα μεταφοράς, και τις διάφορες υποπεριπτώσεις των εξισώσεων αυτών.

Στο ενδέκατο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών και στους τρόπους με τους οποίους μπορούν να επιλύσουν τις προαναφερθείσες διαφορικές εξισώσεις

Στο δωδέκατο κεφάλαιο παραμετροποιούνται οι εξισώσεις των προηγούμενων δύο κεφαλαίων, ώστε να αναφέρονται στο πρόβλημα της μονοδιάστατης διάχυσης θερμότητας

Το δέκατο τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στις μεθόδους τριών χρονικών βημάτων και λειτουργεί σαν εισαγωγή στο υπολογιστικό μέρος της εργασίας, αφού αυτές είναι οι μέθοδοι που εξετάζονται παρακάτω.

Το δέκατο τέταρτο κεφάλαιο είναι το υπολογιστικό μέρος και περιέχει την περιγραφή του προβλήματος και της μεθόδου που εφαρμόζεται. Περιέχει επίσης και την παρουσίαση των διαγραμμάτων που προέκυψαν.

Το δέκατο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο περιέχει το σχολιασμό των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής μελέτης και την εξαγωγή των συμπερασμάτων

Τέλος, στο παράρτημα της εργασίας περιέχεται η βιβλιογραφία, ξεχωριστά για κάθε μέρος, καθώς και ένα υποτυπώδες γλωσσάρι αγγλικών όρων που ο γράφων συνάντησε στην πορεία της συγγραφής του παρόντος.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Φαινόμενο αλλαγής φάσης .....</b>	<b>4</b>
2.1. Γενικά .....	4
2.2. Μεταβολή ενθαλπίας τήξης.....	5
2.3. Κρίσιμα σημεία .....	7
<b>3. Υλικά Αλλαγής Φάσης .....</b>	<b>8</b>
3.1. Εισαγωγή .....	8
3.2. Ταξινόμηση των ΥΑΦ .....	12
3.2.1. Οργανικά υλικά .....	13
3.2.1.1. Παραφίνες.....	13
3.2.1.2. Λιπαρά Οξέα.....	15
3.2.2. Ανόργανα Υλικά .....	16
3.2.3. Εύτηκτα μίγματα .....	17
3.2.4. Υλικά αλλαγής στερεής φάσης (ΥΑΣΦ).....	18
3.3. Χαρακτηριστικά ΥΑΦ .....	18
3.3.1. Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση.....	19
3.3.2. Φαινόμενο supercooling.....	20
3.3.3. Διάβρωση.....	22
3.3.4. Φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων.....	23
3.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατηγοριών ΥΑΦ.....	24
<b>4. Πειραματικά δεδομένα .....</b>	<b>25</b>
4.1. Μέτρηση των ιδιοτήτων ενός ΥΑΦ .....	25
4.2. Ψηφιακό Θερμιδόμετρο (DSC): .....	25
4.3. Μέθοδος t-history .....	26
<b>5. Συσκευασία ΥΑΦ .....</b>	<b>29</b>
<b>6. Ιστορική αναδρομή εφαρμογών.....</b>	<b>31</b>
6.1. Εισαγωγή .....	31
6.2. ΗΠΑ.....	32
6.2.1. NASA.....	32
6.2.2. ΥΑΦ για ψύξη-θέρμανση κτιρίων .....	32
6.2.3. Δρ.Maria Telkes.....	32
6.2.4. Lawrence Gardshire .....	33
6.2.5. Δρ.J.W.Hodgins και Δρ.T.W.Hoffman .....	33
6.2.6. Ερευνητική δραστηριότητα.....	34
6.2.6.1. Άλας Glauber .....	35
6.2.6.2. Παραφίνες.....	35



6.3. Υπόλοιπος κόσμος .....	36
6.3.1. (Δυτική) Γερμανία .....	36
6.3.2. Γαλλία .....	36
6.3.3. Ηνωμένο Βασίλειο .....	36
6.3.4. Ιαπωνία .....	37
<b>7. Εφαρμογές ΥΑΦ .....</b>	<b>38</b>
7.1. Εισαγωγή .....	38
7.2. Συστήματα αποθήκευσης μη άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς .....	38
7.3. Συστήματα αποθήκευσης άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς .....	40
7.4. Φωτοβολταϊκά πλαίσια .....	40
7.5. Συστήματα κλιματισμού .....	41
7.6. Ηλιακά συστήματα .....	42
7.7. Ηλεκτρονικά εξαρτήματα .....	42
7.7.1. Χρήση σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές .....	43
7.7.2. Μονάδα επείγουσας ψύξης .....	45
7.7.3. Τηλεπικοινωνίες .....	46
7.8. Οχήματα .....	47
7.9. Μεταφορές αγαθών .....	48
7.10. Θερμική Ένδυση .....	50
7.11. Ιατρικά προϊόντα .....	54
7.12. Χρήση ΥΑΦ σε κτηριακές εφαρμογές .....	55
7.12.1. Δομικά υλικά .....	55
7.12.2. Τοιχοποιία .....	58
7.12.2.1. Γυψοσανίδα με ΥΑΦ .....	61
7.12.2.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τοίχου με ΥΑΦ .....	63
7.12.3. Συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ΥΑΦ .....	64
<b>8. Συμπεράσματα .....</b>	<b>67</b>
<b>9. Βιομηχανικές εγκαταστάσεις αποθήκευσης θερμότητας .....</b>	<b>68</b>
9.1 Γενικά .....	68
9.1.1 Κλιματιστικές εγκαταστάσεις .....	68
9.1.2 Συστήματα βελτίωσης απόδοσης επίγειων στροβιλομηχανών .....	69
9.2. Πάγος .....	70
9.2.1 Γενικά .....	70
9.2.2. Χαρακτηριστικά .....	70
9.2.3. Ο πάγος σε διάφορες συνθήκες πίεσης .....	71
9.3. Συστήματα αποθήκευσης θερμότητας με πάγο .....	73
9.3.1 Εισαγωγή .....	73
9.3.2. Συστήματα Ice on Coil .....	73



9.3.2.1 Εξωτερική τήξη .....	74
9.3.2.1.1. Ιδιότητες Δεξαμενών .....	74
9.3.2.1.2. Στρατηγικές Λειτουργίας .....	75
9.3.2.2 Εσωτερική τήξη.....	76
9.3.2.2.1. Υλικά στις σωληνώσεις.....	77
9.3.2.2.2. Ιδιότητες Δεξαμενής.....	77
9.3.2.3. Φόρτιση και αποφόρτιση.....	78
9.3.3. Σύστημα Sheet ice harvester .....	79
9.3.4. Πάγος σε μικροκάψουλες.....	81
9.3.4.1 Φόρτιση και αποφόρτιση.....	82
9.3.5. Υλικά αλλαγής φάσης .....	82
9.3.6. Διφασικό μίγμα .....	83
9.3.6.1. Συστήματα διανεμημένης αποθήκευσης.....	84
9.3.6.2. Συστήματα κεντρικής αποθήκευσης .....	85
9.3.6.3. Διφασικό μίγμα νερού-πάγου .....	86
9.3.6.4. Φόρτιση και αποφόρτιση.....	86
<b>10. Διαφορικές εξισώσεις φαινομένων μεταφοράς.....</b>	<b>89</b>
10.1. Εισαγωγή .....	89
10.2. Γενική εξίσωση μεταφοράς .....	89
10.3. Γενική εξίσωση μεταφοράς ενέργειας .....	90
<b>11. Εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών .....</b>	<b>92</b>
11.1. Διακριτοποίηση διαφορικών εξισώσεων .....	92
11.1.1. Μέθοδος όγκου αναφοράς.....	92
11.1.2. Υπολογιστικό πλέγμα.....	95
11.2. Οριακές συνθήκες.....	95
11.3. Επίλυση προκύπτοντος συστήματος .....	96
<b>12. Μεταβατική μετάδοση θερμότητας.....</b>	<b>97</b>
12.1. Εισαγωγή .....	97
12.2. Υποθέσεις εργασίας .....	98
12.2.1 Άμεση διατύπωση.....	100
12.2.2 Έμμεση διατύπωση .....	101
12.2.3. Διατύπωση Crank-Nicolson .....	101
12.2.4. Συγκριτικά διατυπώσεων-άλλες διατυπώσεις.....	102
<b>13. Μέθοδοι τριών χρονικών βημάτων (three- time level schemes).....</b>	<b>103</b>
13.1. Εισαγωγή .....	103
13.2. Μέθοδοι ενθαλπίας-μέθοδοι θερμοκρασίας .....	103
13.3. Διορθώσεις μεθόδων .....	104



13.4. Διακυμάνσεις .....	104
<b>14. Υπολογιστικό μέρος.....</b>	<b>105</b>
14.1. Παρουσίαση εξεταζόμενου προβλήματος .....	105
14.2. Κατάστρωση συστήματος εξισώσεων .....	106
14.3. Παρουσίαση Διαγραμμάτων .....	109
<b>15. Σχολιασμός διαγραμμάτων – Συμπεράσματα.....</b>	<b>133</b>
15.1. Μορφή καμπυλών .....	133
15.2. Ταχύτητα Μεθόδου .....	135
15.3. Ανεξαρτητοποίηση υπολογιστικού πλέγματος.....	145
15.4. Υπερπήδηση Λανθάνουσας θερμότητας .....	152
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	164
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΑΓΓΛΙΚΩΝ ΟΡΩΝ .....	169





## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b><u>ΣΧΗΜΑ 2.1:</u></b> Στη φωτογραφία φαίνεται ένα μικρό κομμάτι στερεοποιημένο Αργό (σημείο τήξης: $-189.352\text{ }^{\circ}\text{C}$ σημείο βρασμού: $-185.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) που λόγω θερμοκρασίας περιβάλλοντος περνά γρήγορα από τη μία φάση στην άλλη. Διακρίνονται καθαρά οι τρεις φάσεις της ουσίας.....	4
<b><u>ΣΧΗΜΑ 2.2:</u></b> Διάγραμμα αλλαγής φάσης.....	5
<b><u>ΣΧΗΜΑ 2.3:</u></b> Λανθάνουσα θερμότητα γνωστών ουσιών.....	6
<b><u>ΣΧΗΜΑ 2.4:</u></b> Ποιοτικό διάγραμμα T-P καθαρής ουσίας.....	7
<b><u>ΣΧΗΜΑ 3.1:</u></b> Πίνακας ιδιοτήτων συνήθων υλικών αποθήκευσης.....	8
<b><u>ΣΧΗΜΑ 3.2:</u></b> Πίνακας ιδιοτήτων ενδεικτικών ΥΑΦ.....	9
<b><u>ΣΧΗΜΑ 3.3:</u></b> Ακατέργαστα ΥΑΦ.....	11
<b><u>ΣΧΗΜΑ 3.4:</u></b> Ταξινόμηση ΥΑΦ.....	12
<b><u>ΣΧΗΜΑ 3.5:</u></b> Εύτηκτα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως σε κτιριακές εφαρμογές..	17
<b><u>ΣΧΗΜΑ 3.6:</u></b> Διάγραμμα του $C_p$ για όλες τις φάσεις του n-Βουτανίου.....	18
<b><u>ΣΧΗΜΑ 3.7:</u></b> Τυπική καμπύλη ψύξης του νερού.....	20
<b><u>ΣΧΗΜΑ 3.8:</u></b> Τυπική καμπύλη ψύξης ενός ΥΑΦ χωρίς supercooling.....	21
<b><u>ΣΧΗΜΑ 3.9:</u></b> Τυπική καμπύλη ΥΑΦ σε διαδικασία ψύξης με supercooling.....	21
<b><u>ΣΧΗΜΑ 3.10:</u></b> Εμφάνιση διαβρωτικών φαινομένων στο υλικό της συσκευασίας λόγω συνεργασίας με ένυδρο άλας.....	22
<b><u>ΣΧΗΜΑ 4.1:</u></b> Εργαστηριακή διάταξη t-history.....	27



- ΣΧΗΜΑ 4.2:** Σωλήνες που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο t-history.....27
- ΣΧΗΜΑ 4.3:** Ενδεικτική καμπύλη εξεταζόμενου υλικού (χωρίς υπέρψυξη).....27
- ΣΧΗΜΑ 4.4:** Ενδεικτική καμπύλη υλικού αναφοράς (νερό) .....28
- ΣΧΗΜΑ 5.1:** Ευρύτητα διαδεδομένος τρόπος συσκευασίας ΥΑΦ, για πολλών ειδών υλικά και πλήθος διαφορετικών εφαρμογών: (α) συσκευασία ΥΑΦ, (β) τομή συσκευασίας, (γ) λεπτομέρεια.....29
- ΣΧΗΜΑ 5.2:** Ηλεκτρονική μικρογραφία ΥΑΦ σε μικροκάψουλα.....30
- ΣΧΗΜΑ 5.3:** Εμπορικές συσκευασίες ΥΑΦ: (α) σε σφαιρίδια πολυολεφίνης, (β) σε μεταλλικά σφαιρίδια, (γ) σε μεταλλικούς σωλήνες, (δ) σε πλαίσια αλουμινίου εφοδιασμένα με πτερύγια.....30
- ΣΧΗΜΑ 6.1:** Κάτοψη σπιτιού Telkes.....33
- ΣΧΗΜΑ 6.2:** Το σπίτι που σχεδίασε η Telkes για τους Hodgins και Hoffman.....34
- ΣΧΗΜΑ 7.1:** Εναλλάκτης θερμότητας ενισχυμένος με ΥΑΦ. Στη δεξιά φωτογραφία παρατηρούμε τα φύλλα στο εσωτερικό του εναλλάκτη και τις συσκευασίες με το ΥΑΦ τοποθετημένες επάνω τους.....39
- ΣΧΗΜΑ 7.2:** Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με ΥΑΦ σε σφαιρίδια. Το εργαζόμενο μέσο κυκλοφορεί στον κύλινδρο διαμέσου των σφαιριδίων.....40
- ΣΧΗΜΑ 7.3:** Ενισχυμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο.....41
- ΣΧΗΜΑ 7.4:** Βιομηχανική μονάδα αποθήκευσης θερμότητας βάσει ΥΑΦ. Σε πρώτο πλάνο, ο εναλλάκτης του συστήματος με τις κυψέλες τοποθέτησης ΥΑΦ.....41
- ΣΧΗΜΑ 7.5:** Προϊόντα με ΥΑΦ για ηλεκτρονικά εξαρτήματα.....43
- ΣΧΗΜΑ 7.6:** Προϊόντα για ψύξη επεξεργαστών ηλεκτρονικών πλακετών.....44
- ΣΧΗΜΑ 7.7:** Προϊόν για χρήση σε φορητούς υπολογιστές.....44



<b>ΣΧΗΜΑ 7.8:</b> Μονάδα επείγουσας ψύξης.....	45
<b>ΣΧΗΜΑ 7.9:</b> Συσσκευασίες ΥΑΦ (πλάκες και κύλινδροι) που χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνιακά κουβούκλια.....	46
<b>ΣΧΗΜΑ 7.10:</b> ΥΑΦ σε καταλύτη αυτοκινήτου.....	47
<b>ΣΧΗΜΑ 7.11:</b> Τυπικές πλάκες με ΥΑΦ για ενίσχυση συσκευασιών μεταφοράς προϊόντων.....	48
<b>ΣΧΗΜΑ 7.12:</b> Συσσκευασίες μεταφοράς με ΥΑΦ σε διάφορα μεγέθη.....	49
<b>ΣΧΗΜΑ 7.13:</b> Μερικές από τις πλέον γνωστές συσκευασίες ΥΑΦ για μεταφορά κρύων αγαθών.....	50
<b>ΣΧΗΜΑ 7.14:</b> Ηλεκτρονικές μικρογραφίες υλικών ένδυσης ενισχυμένων με μικροκάψουλες ΥΑΦ. (α)με ανάμιξη του υλικού του ενδύματος με ΥΑΦ, (β) σε στρώματα. Στην τρίτη (γ) φωτογραφία εντυπωσιακό είναι το γεγονός ότι σύμφωνα με την κλίμακα του μικροσκοπίου, η μικροκάψουλα έχει διάμετρο μικρότερη από 3 μm.....	51
<b>ΣΧΗΜΑ 7.15:</b> Αρχή λειτουργίας των ενισχυμένων με ΥΑΦ ενδυμάτων.....	51
<b>ΣΧΗΜΑ 7.16:</b> Εμπορικά ενδύματα και εσώρουχα ενισχυμένα με ΥΑΦ.....	52
<b>ΣΧΗΜΑ 7.17:</b> Ενδύματα ειδικών κατηγοριών ενισχυμένα με ΥΑΦ.....	52
<b>ΣΧΗΜΑ 7.18:</b> Χρήση ΥΑΦ σε στρώματα και λευκά είδη.....	53
<b>ΣΧΗΜΑ 7.19:</b> Γιλέκο ενισχυμένο με αφαιρούμενες συσκευασίες ΥΑΦ.....	54
<b>ΣΧΗΜΑ 7.20:</b> ΥΑΦ για μεταφορά αίματος.....	54
<b>ΣΧΗΜΑ 7.21:</b> Ιδιότητες δομικών υλικών για πέτρα, νερό και τυπικά ΥΑΦ.....	55
<b>ΣΧΗΜΑ 7.22:</b> Τσιμέντο. Αριστερά απλό, δεξιά ενισχυμένο με ΥΑΦ.....	56



<b>ΣΧΗΜΑ 7.23:</b> Τούβλο ενισχυμένο με σωλήνες ΥΑΦ.....	56
<b>ΣΧΗΜΑ 7.24:</b> Συσκευασίες ΥΑΦ για κτιριακές εφαρμογές.....	57
<b>ΣΧΗΜΑ 7.25:</b> Σύγκριση της αποθηκευτικής ικανότητας απλής και ενισχυμένης εκδοχής κλασσικών δομικών υλικών.....	59
<b>ΣΧΗΜΑ 7.26:</b> Αποθηκευτική ικανότητα τυπικού σκυροδέματος ενισχυμένου με διαφορετικό ΥΑΦ ανά περίπτωση.....	60
<b>ΣΧΗΜΑ 7.27:</b> Εφαρμογή ενισχυμένης γυψοσανίδας σε τοίχο.....	61
<b>ΣΧΗΜΑ 7.28:</b> Σύγχρονη ελαφρού τύπου κατασκευή, εφοδιασμένη με γυψοσανίδες με ΥΑΦ(α) και ηλεκτρονική μικρογραφία της γυψοσανίδας(β).....	62
<b>ΣΧΗΜΑ 7.29:</b> Σχεδιάγραμμα τοίχου με ενισχυμένη με ΥΑΦ μόνωση.....	63
<b>ΣΧΗΜΑ 7.30:</b> Διάταξη υγρού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης.....	64
<b>ΣΧΗΜΑ 7.31:</b> Διάταξη ξηρού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης.....	65
<b>ΣΧΗΜΑ 7.32:</b> Κόκκοι και διάταξη ΥΑΦ για αντικατάσταση θερμοπετόν σε εγκατάσταση ενδοδαπέδιας θέρμανσης.....	66
<b>ΣΧΗΜΑ 9.1:</b> Μέσα αποθήκευσης συστημάτων ΑΘΕ.....	68
<b>ΣΧΗΜΑ 9.2:</b> Εξαγωνικοί κρύσταλλοι πάγου και διάγραμμα ενθαλπίας του νερού για τις τρεις φάσεις του.....	70
<b>ΣΧΗΜΑ 9.3:</b> Μορφές πάγου.....	72
<b>ΣΧΗΜΑ 9.4:</b> Σύστημα εξωτερικής τήξης.....	74
<b>ΣΧΗΜΑ 9.5:</b> Διάταξη εξωτερικής τήξης με δευτερεύον ψυκτικό μέσο.....	76
<b>ΣΧΗΜΑ 9.6:</b> Ανάντι και κατάντι διατάξεις.....	77



<b>ΣΧΗΜΑ 9.7:</b> Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος.....	7
8	
<b>ΣΧΗΜΑ 9.8:</b> Διάταξη ice harvester.....	79
<b>ΣΧΗΜΑ 9.9:</b> Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος.....	80
<b>ΣΧΗΜΑ 9.10:</b> Αρχή λειτουργίας συστήματος με πάγο σε μικροκάψουλες.....	81
<b>ΣΧΗΜΑ 9.11:</b> Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος.....	82
<b>ΣΧΗΜΑ 9.12:</b> Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος.....	83
<b>ΣΧΗΜΑ 9.13:</b> Διάταξη συστήματος διανεμημένης αποθήκευσης.....	84
<b>ΣΧΗΜΑ 9.14:</b> Διάταξη συστήματος κεντρικής αποθήκευσης.....	85
<b>ΣΧΗΜΑ 9.15:</b> Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος.....	86
<b>ΣΧΗΜΑ 11.1:</b> Όγκος αναφοράς.....	93
<b>ΣΧΗΜΑ 12.1:</b> Υπολογιστικό πλέγμα μεταβατικής αγωγής θερμότητας.....	97
<b>ΣΧΗΜΑ 12.2:</b> Γραφική απεικόνιση των τριών υποθέσεων της θερμοκρασίας.....	98
<b>ΣΧΗΜΑ 12.3:</b> Σχηματική παράσταση των τριών αριθμητικών μεθόδων.....	102
<b>ΣΧΗΜΑ 14.1:</b> Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι, $\Delta t=2\text{sec}$ .....	110
<b>ΣΧΗΜΑ 14.2:</b> Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι, $\Delta t=1\text{sec}$ .....	111
<b>ΣΧΗΜΑ 14.3:</b> Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι, $\Delta t=0.5\text{sec}$ .....	112



<b>ΣΧΗΜΑ 14.4:</b> Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι, $\Delta t=0.05\text{sec}$ .....	113
<b>ΣΧΗΜΑ 14.5:</b> Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι, $\Delta t=0.01\text{sec}$ .....	114
<b>ΣΧΗΜΑ 14.6:</b> Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι, $\Delta t=2\text{sec}$ .....	115
<b>ΣΧΗΜΑ 14.7:</b> Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι, $\Delta t=1\text{sec}$ .....	116
<b>ΣΧΗΜΑ 14.8:</b> Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι, $\Delta t=0.5\text{sec}$ .....	117
<b>ΣΧΗΜΑ 14.9:</b> Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι, $\Delta t=0.05\text{sec}$ .....	118
<b>ΣΧΗΜΑ 14.10:</b> Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι, $\Delta t=0.01\text{sec}$ .....	119
<b>ΣΧΗΜΑ 14.11:</b> Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι, $\Delta t=2\text{sec}$ .....	120
<b>ΣΧΗΜΑ 14.12:</b> Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι, $\Delta t=1\text{sec}$ .....	121
<b>ΣΧΗΜΑ 14.13:</b> Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι, $\Delta t=0,5\text{sec}$ .....	122
<b>ΣΧΗΜΑ 14.14:</b> Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι, $\Delta t=0,05\text{sec}$ .....	123
<b>ΣΧΗΜΑ 14.15:</b> Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι, $\Delta t=0,01\text{sec}$ .....	124
<b>ΣΧΗΜΑ 14.16:</b> Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι, $\Delta t=2\text{sec}$ .....	125
<b>ΣΧΗΜΑ 14.17:</b> Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι, $\Delta t=1\text{sec}$ .....	126
<b>ΣΧΗΜΑ 14.18:</b> Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι, $\Delta t=0,5\text{sec}$ .....	127
<b>ΣΧΗΜΑ 14.19:</b> Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι, $\Delta t=0,05\text{sec}$ .....	128
<b>ΣΧΗΜΑ 14.20:</b> Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι, $\Delta t=0,01\text{sec}$ .....	129
<b>ΣΧΗΜΑ 14.21:</b> Άμεση μέθοδος, 10 κόμβοι, $\Delta t=0.2\text{sec}$ .....	130



- ΣΧΗΜΑ 14.22:** Άμεση μέθοδος, 10 κόμβοι,  
 $\Delta t=0.05\text{sec}$ .....131
- ΣΧΗΜΑ 14.23:** Άμεση μέθοδος, 20 κόμβοι,  
 $\Delta t=0.05\text{sec}$ .....132
- ΣΧΗΜΑ 15.1:** Άμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  
 $1^\circ\text{C}$ .....136
- ΣΧΗΜΑ 15.2:** Έμμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  
 $1^\circ\text{C}$ .....137
- ΣΧΗΜΑ 15.3:** Μέθοδος τριών βημάτων, εύρος αλλαγής φάσης  
 $1^\circ\text{C}$ .....138
- ΣΧΗΜΑ 15.4:** Άμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  
 $2^\circ\text{C}$ .....139
- ΣΧΗΜΑ 15.5:** Έμμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  
 $2^\circ\text{C}$ .....140
- ΣΧΗΜΑ 15.6:** Μέθοδος τριών βημάτων, εύρος αλλαγής φάσης  
 $2^\circ\text{C}$ .....141
- ΣΧΗΜΑ 15.7:** Άμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  
 $4^\circ\text{C}$ .....142
- ΣΧΗΜΑ 15.8:** Έμμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  
 $4^\circ\text{C}$ .....143
- ΣΧΗΜΑ 15.9:** Μέθοδος τριών βημάτων, εύρος αλλαγής φάσης  
 $4^\circ\text{C}$ .....144
- ΣΧΗΜΑ 15.10.:** Έμμεση μέθοδος, χρονικό διάστημα  
2sec.....146
- ΣΧΗΜΑ 15.11.:** Έμμεση μέθοδος, χρονικό διάστημα  
4sec.....147
- ΣΧΗΜΑ 15.12.:** Έμμεση μέθοδος, χρονικό διάστημα  
6sec.....148
- ΣΧΗΜΑ 15.13.:** Μέθοδος τριών βημάτων, χρονικό διάστημα  
2sec.....149
- ΣΧΗΜΑ 15.14.:** Μέθοδος τριών βημάτων, χρονικό διάστημα  
4sec.....150
- ΣΧΗΜΑ 15.15.:** Μέθοδος τριών βημάτων, χρονικό διάστημα  
6sec.....151
- ΣΧΗΜΑ 15.16:** Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι, οριακές  $-5^\circ\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  
 $1^\circ\text{C}$ , χρονικό βήμα  
2sec.....157



- ΣΧΗΜΑ 15.17:** Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι, οριακές  $-5^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $1^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 2sec.....158
- ΣΧΗΜΑ 15.18:** Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι, οριακές  $-5^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $2^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 1sec.....159
- ΣΧΗΜΑ 15.19:** Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι, οριακές  $-5^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $2^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 1sec.....160
- ΣΧΗΜΑ 15.20:** Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι, οριακές  $-10^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $1^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 0,5sec.....161
- ΣΧΗΜΑ 15.21:** Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι, οριακές  $-10^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $1^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 0,5sec.....162





## ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

### ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εδώ και πολλά χρόνια, οι μεγάλοι ενεργειακοί φορείς έχουν αναγνωρίσει την ανάγκη διατήρησης και λογικής χρήσης του πολύτιμου καυσίμου και των ορυκτών πηγών ενέργειας. Η συνεχής και σταθερά αυξανόμενη κατανάλωση των ενεργειακών πόρων αυτών, εκτοξεύοντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) σε ανησυχητικά επίπεδα, έχει σαν αποτέλεσμα την αποσύνθεση του στρώματος του όζοντος και την αποδεδειγμένη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη.

Η Διακυβερνητική επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών, αποτελούμενη από περισσότερα από 300 εξέχοντα μέλη της επιστημονικής κοινότητας, στη συνέλευση του 1992, κατέθεσαν την άποψη πως για να έχουν σταθεροποιηθεί τα επίπεδα εκπομπών CO<sub>2</sub> παγκοσμίως μέχρι το 2005 θα πρέπει να υπάρξει μείωση 60% στην κατανάλωση όλων των ορυκτών καυσίμων.

Αυτό το μέτρο αντιπροσωπεύει μια αναθεώρηση του σημερινού τρόπου χρήσης του καυσίμου, όπου το 50% χρησιμοποιείται για τη λειτουργία και τη θέρμανση κτιρίων και οι αντίστοιχες εκπομπές CO<sub>2</sub> φτάνουν το 60% των συνολικών.

Συγκεκριμένα για την Ευρωπαϊκή ήπειρο το 40% -κατά μέσο όρο- του καταναλισκόμενου καυσίμου αντιστοιχεί στον κτιριακό τομέα και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως η Γαλλία το ποσοστό αυτό ανέρχεται σε 45%, ενώ στη χώρα μας αγγίζει το 25%.

Στην συνεδρίαση του 2003 όμως παρουσιάστηκε η πρόβλεψη για τη μελλοντική ενεργειακή κατανάλωση που θα αυξηθεί δυστυχώς κατά 58% τα έτη 2001-2025.

Για να αντιμετωπιστεί η ακατάσχετη μόλυνση του περιβάλλοντος, τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής ένωσης μεταξύ άλλων, δεσμεύθηκαν από το πρωτόκολλο του Κιότο σε συνολική και συστηματική μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, που για τη χώρα μας μεταφράζεται σε μείωση των εθνικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2008-2012, στα επίπεδα του 92% των αντίστοιχων εκπομπών του 1990.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω, γίνεται κατανοητή η σημασία που έχει σήμερα η λήψη μέτρων για τη μείωση των απωλειών ενέργειας, θερμικών ή ψυκτικών φορτίων, ανάλογα με την περίπτωση, και η λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση των απωλειών αυτών. Επιπρόσθετα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει λάβει μέτρα προς την κατεύθυνση της εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια, όπως την πιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, αλλά και νέα ενεργειακά πρότυπα.

Είναι λοιπόν λογικό να ξοδεύονται επί του παρόντος μεγάλα κονδύλια παγκοσμίως για τη μείωση αυτών των επιπέδων και για την ανάπτυξη συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τις προαναφερθείσες χρήσεις.

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες η έρευνα γύρω από τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχει κάνει εντυπωσιακή πρόοδο. Μέσω μελετών παγκοσμίως (με τις πλέον σημαντικές να λαμβάνουν χώρα στις ΗΠΑ, την Ευρώπη και την Ιαπωνία), έχει αποδειχθεί ότι τα συστήματα αυτά είναι ιδανικά για αποθήκευση ανανεώσιμης (και πολλές φορές δωρεάν) ενέργειας για κλιματισμό κτιρίων.

Εφαρμογές όπως οι ηλιακοί συλλέκτες, και άλλες που εκμεταλλεύονται άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά συστήματα, αιολικά πάρκα καθώς επίσης και εφαρμογές βιομάζας και γεωθερμικής ενέργειας, θεωρούνται πλέον πρώτης προτεραιότητας ανάπτυξης.

Η ηλιακή ενέργεια για παράδειγμα, έχει σπουδαίες προοπτικές όσον αφορά στη χρήση της στα κτίρια, αφού η ηλιακή ακτινοβολία μετρούμενη σε ενεργειακές μονάδες υπολογίζεται να είναι 30000 φορές περισσότερη από αυτήν που πραγματικά έχει ανάγκη ο Άνθρωπος. Είναι επίσης καθαρή πηγή ενέργειας, χωρίς εκπομπές ρύπων, και φυσικά δωρεάν, άφθονη και ανανεώσιμη.



Παρ' όλ' αυτά υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη χρήση της ηλιακής ενέργειας. Είναι απρόβλεπτη πηγή ενέργειας, από την άποψη της ηλιοφάνειας, είναι διακοπτόμενη και πολλές φορές για μεγάλα χρονικά διαστήματα (συννεφιά, χιόνι, βροχή). Εξ' αιτίας αυτών των απολύτως φυσικών λόγων, καθώς επίσης και λόγω του γεγονότος ότι από τις 8760 ώρες του έτους οι μισές περίπου είναι νύχτα για οποιοδήποτε μέρος στον πλανήτη, γίνεται προφανής η ανάγκη δημιουργίας ενός συστήματος ικανού να παράγει τέτοια χρονική καθυστέρηση στο φαινόμενο, ώστε η παροχή ενέργειας να μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση ανά πάσα στιγμή.

Από όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που προτάθηκαν για την αντιμετώπιση του προβλήματος, τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έτυχαν μεγάλης απήχησης λόγω κυρίως της ικανότητάς τους στην αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας σε σχετικά μικρό χώρο.

Το μεγαλύτερο εμπόδιο για κάθε τέτοιο σύστημα είναι η ανάγκη αποθήκευσης της ενέργειας για χρήση σε μετέπειτα στάδιο. Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας παρέχουν έναν πρακτικό και φυσικό τρόπο χρονικής καθυστέρησης και επιτρέπουν τη χρήση της θερμότητας που αποθηκεύτηκε την ημέρα, κατά τη διάρκεια της νύχτας, όποτε και αυτή χρειάζεται.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας τα οποία συνδυάζουν τη χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης, θεωρούνται ιδιαίτερος σημαντικά για την έρευνα, λόγω της μεγάλης αποθηκευτικής (από ενεργειακή άποψη) ικανότητάς τους.[1-4]

## 2. Φαινόμενο αλλαγής φάσης

### 2.1. Γενικά



**ΣΧΗΜΑ 2.1:** Στη φωτογραφία φαίνεται ένα μικρό κομμάτι στερεοποιημένο Αργό (σημείο τήξης:  $-189.352\text{ }^{\circ}\text{C}$  σημείο βρασμού:  $-185.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) που λόγω θερμοκρασίας περιβάλλοντος περνά γρήγορα από τη μία φάση στην άλλη. Διακρίνονται καθαρά οι τρεις φάσεις της ουσίας.

Στη Θερμοδυναμική η μετάβαση (ή αλλαγή) φάσης είναι η διαδικασία μετάβασης ενός θερμοδυναμικού συστήματος από τη μία φάση σε κάποια άλλη. Το ξεχωριστό χαρακτηριστικό του φαινομένου αυτού είναι η παρατήρηση μιας ραγδαίας αλλαγής σε μία ή περισσότερες φυσικές ιδιότητες του συστήματος και κυρίως στη θερμοχωρητικότητά του με ταυτόχρονη μικρή μεταβολή σε άλλες ιδιότητες όπως στη θερμοκρασία του.

Συνήθως ο όρος αλλαγή φάσης αναφέρεται σε μεταβάσεις μεταξύ των τριών πρώτων καταστάσεων (στερεής, υγρής και αέριας) εξαιρώντας συνήθως την κατάσταση του πλάσματος.

Οι αλλαγές φάσης περιλαμβάνουν:

- Τις μεταβάσεις μεταξύ της στερεής, υγρής και αέριας φάσης μιας ουσίας, λόγω αλλαγών στις συνθήκες θερμοκρασίας και/ή πίεσης

Από	Σε			
	Στερεό	Υγρό	Αέριο	Πλάσμα
Στερεό	-	Τήξη	Εξάχνωση	-
Υγρό	Στερεοποίηση	-	Βρασμός/Ατμοποίηση	-
Αέριο	Εναπόθεση	Συμπύκνωση	-	Ιονισμός
Πλάσμα	-	-	Ανασυνδυασμός	-

- Τη μετάβαση μεταξύ διαφορετικών μοριακών δομών, ιδίως για στερεά, όπως για παράδειγμα τη μετάβαση από μία άμορφη δομή σε μία κρυσταλλική ή τη μετάβαση μεταξύ δύο διαφορετικών κρυσταλλικών δομών.

Είναι δυνατόν σε κάποιες περιπτώσεις να εμφανιστεί αλλαγή κατάστασης μη-αδιαβατικά με τέτοιο τρόπο ώστε το θερμοδυναμικό σύστημα να διέλθει τα όρια της αλλαγής φάσης, χωρίς να παρατηρείται η αλλαγή αυτή καθ' αυτή, όπως παρατηρείται στα φαινόμενα της υπέρψυξης και της υπερθέρμανσης. Η προκύπτουσα κατάσταση δεν είναι ενεργειακά σταθερή και χαρακτηρίζεται ως ενεργειακά ημί-σταθερή.

Οι αλλαγές φάσης περιλαμβάνουν λανθάνουσα θερμότητα. Κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας αλλαγής το σύστημα είτε απορροφά είτε ελευθερώνει μία σταθερή και συνήθως αξιόλογη ποσότητα ενέργειας. Επειδή η ενέργεια αυτή δεν μπορεί να μεταφερθεί στιγμιαία μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος, αυτές οι μεταβάσεις, βρίσκονται υπό καθεστώς μικτής φάσης, όπου τμήμα του θερμοδυναμικού συστήματος έχει ολοκληρώσει την μετάβαση και το υπόλοιπο όχι.

Για παράδειγμα κατά το βρασμό ενός δοχείου που περιέχει νερό, το νερό δεν γίνεται στιγμιαία ατμός, αλλά εμφανίζεται μια τυρβώδης μίξη νερού και φυσαλίδων ατμού.[5]

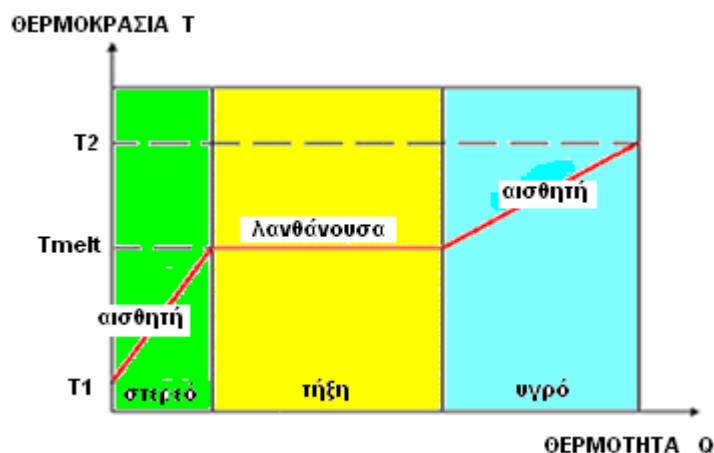
## 2.2. Μεταβολή ενθαλπίας τήξης

Η μεταβολή ενθαλπίας τήξης, γνωστή και ως θερμότητα τήξης (λανθάνουσα), είναι το ποσό θερμότητας που πρέπει να απορροφηθεί ή να εκλυθεί, ώστε 1 gr ουσίας να μεταβεί φάση από στερεά σε υγρή ή/και αντίστροφα. Ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης και η θερμοκρασία στην οποία αυτή εμφανίζεται, ονομάζεται σημείο τήξης. Όταν αφαιρείται θερμική ενέργεια από ένα υλικό, η θερμοκρασία του πέφτει. Αντίστοιχα, όταν προσφέρεται θερμότητα σε ένα υλικό, η θερμοκρασία του αυξάνει. Στο σημείο μετάβασης μεταξύ στερεής και υγρής φάσης, απαιτείται περισσότερη θερμότητα. Για να υπάρξει μετάβαση από υγρό σε στερεό, τα μόρια της ουσίας πρέπει να τοποθετηθούν αυστηρώς διατεταγμένα, και για να γίνει αυτό, θα πρέπει να αφαιρεθεί θερμότητα, ώστε να μεταπέσει το σύστημα σε μία χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη. Αντιθέτως, για να έχουμε την αντίστροφη διαδικασία και τη μετάβαση από την στερεή κρυσταλλική μορφή στην υγρή, χρειάζεται απορρόφηση θερμότητας για τη λύση των διαμοριακών δεσμών.

Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης παρατηρείται με τη μέτρηση της θερμοκρασίας κατά τη στερεοποίηση του νερού. Στην περίπτωση κλειστού δοχείου με νερό θερμοκρασίας δωματίου, με δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας του μέσου, αν αυτό τοποθετηθεί σε ψυχρό περιβάλλον, παρατηρείται σταθερή μείωση της θερμοκρασίας μέχρι σημείου ελαφρώς μικρότερου της θερμοκρασίας πήξης-τήξης. Τότε η θερμοκρασία, αυξάνει οριακά μέχρι το σημείο στερεοποίησης και έχουμε τη δημιουργία κρυστάλλων στο νερό, δηλαδή την έναρξη της στερεοποίησης. Μετά το πέρας της στερεοποίησης, η θερμοκρασία θα συνεχίσει την πτώση της, έως ότου ικανοποιηθεί η ισορροπία θερμοκρασιών περιβάλλοντος και (πλέον) πάγου.

Η θερμοκρασία ανακόπτει την κάθοδό της στο σημείο πήξης εξ αιτίας της λανθάνουσας θερμότητας πήξης. Αυτή προφανώς ισούται με τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης η οποία πρέπει να αφαιρεθεί από το υλικό, ώστε να συνεχισθεί η θερμοκρασιακή πτώση.[5,6]

Τα παραπάνω παρατηρούνται και στο διάγραμμα που ακολουθεί:



**ΣΧΗΜΑ 2.2:** Διάγραμμα αλλαγής φάσης

Ένα υλικό δύναται να αποθηκεύσει θερμότητα με δύο μορφές: της αισθητής, που εκφράζεται με συνακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας του και της λανθάνουσας με την απαραίτητη αλλαγή φάσης (τήξη).[6]

Η αποθηκευτική ικανότητα ενός υλικού αλλαγής φάσης που θερμαίνεται από θερμοκρασία  $T_1$  σε  $T_2$ , αν υφίσταται αλλαγή φάσης σε θερμοκρασία  $T^*$ , είναι το άθροισμα της μεταβολής της αισθητής θερμότητας του στερεού από  $T_1$  σε  $T^*$ , της λανθάνουσας θερμότητας σε θερμοκρασία  $T^*$  και της μεταβολής της αισθητής θερμότητας του υγρού από  $T^*$  σε  $T_2$ :

$$Q_s = m[(T^* - T_1)c_s + \lambda + (T_2 - T^*)c_l] \quad [1.1]$$

όπου  $m$  είναι η μάζα του υλικού,  $c_s$  και  $c_l$  είναι οι θερμοχωρητικότητες της στερεής και της υγρής φάσης αντίστοιχα και  $\lambda$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα.

Οι μονάδες ως γνωστό, είναι:

1. kJ/kg (μονάδες [SI](#) )
2. [joules/mole](#) (μονάδες [SI](#) )
3. [calories](#) / gram (παλαιές μετρικές μονάδες, οι οποίες πλέον χρησιμοποιούνται ελάχιστα, εκτός από το Kcal που χρησιμοποιείται συνήθως για θρεπτικά συστατικά τροφών)
4. [British thermal units](#) ανά pound ή Btu ανά pound-mole

Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του νερού είναι 79.72 cal/gr ή 334.5 kJ/kg

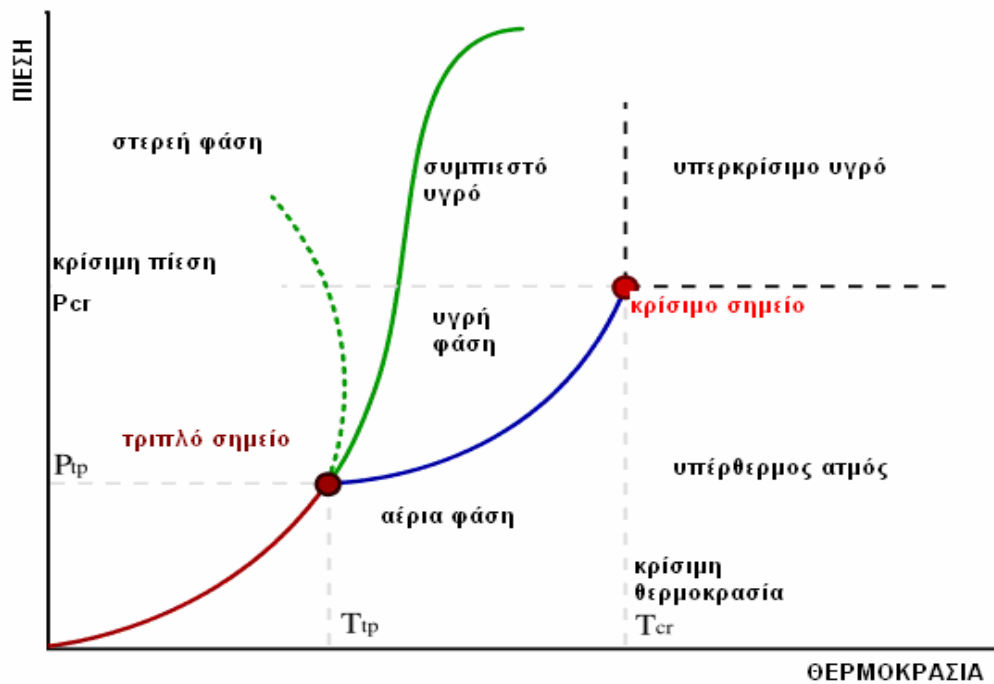
Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, άλλων γνωστών ουσιών:

Ουσία	Λανθάνουσα Θερμότητα(kJ/kg)
Μεθάνιο:	58.41
Αιθάνιο:	95.10
Προπάνιο:	79.96
Μεθανόλη:	99.16
Αιθανόλη:	108.99
Γλυκερόλη:	200.62
Μυρμηγκικό Οξύ:	276.35
Οξικό Οξύ:	192.09
Ακετόνη:	97.99
Βενζόλιο:	127.40
Μυριστικό Οξύ:	198.70
Παλμιτικό Οξύ:	163.93
Στεατικό Οξύ:	198.91

**ΣΧΗΜΑ 2.3:** Λανθάνουσα θερμότητα γνωστών ουσιών

### 2.3. Κρίσιμα σημεία

Σε συστήματα που περιέχουν υγρή και αέρια φάση υπάρχει ένας συνδυασμός πίεσης και θερμοκρασίας που ονομάζεται κρίσιμο σημείο. Στο σημείο αυτό το υγρό είναι τόσο θερμό και υπό κατάλληλη πίεση, ώστε η διάκριση μεταξύ υγρής και αέριας φάσης είναι σχεδόν αδύνατη.[6]



**ΣΧΗΜΑ 2.4:** Ποιοτικό διάγραμμα T-P καθαρής ουσίας

### 3. Υλικά Αλλαγής Φάσης

#### 3.1. Εισαγωγή

Όλα τα υλικά που είναι γνωστά σήμερα, ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που επικρατούν, μπορούν να βρίσκονται σε μία από τις τρεις γνωστές καταστάσεις, στερεή, υγρή, αέρια.

Αν χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ταξινόμησης ο μηχανισμός αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο υλικό, ο οποίος χαρακτηρίζει σε μεγάλο βαθμό τη γενικότερη θερμική συμπεριφορά του υλικού, δημιουργούνται δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή αισθητής θερμότητας σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης τους
2. τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα συναλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας

Για την πρώτη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά αποτελεί η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο, ενώ για τη δεύτερη, η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για τη μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη.

Βασική παρατήρηση ότι η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας είναι πολλαπλάσια της θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση ή όγκο.

ΥΛΙΚΟ	Πυκνότητα $\rho$ (kg/ m <sup>3</sup> )	Θερμοχωρητικότητα $C_p$ (J/kgK)	Θερμοχωρητικότητα $C_v$ (MJ/m <sup>3</sup> K)
Πηλός	1458	879	1,28
Τούβλο	1800	837	1,51
Αμμόπετρα	2200	712	1,57
Ξύλο	700	2390	1,67
Σκυρόδεμα	2000	880	1,76
Αλουμίνιο	2710	837	2,27
Σίδηρο	7900	452	3,57
Ατσάλι	7840	465	3,68
Πετρώματα υπεδάφους	2050	1840	3,77
Μαγνητίτης	5177	752	3,89
Νερό	988	4182	4,17

**ΣΧΗΜΑ 3.1:** Πίνακας ιδιοτήτων συνήθων υλικών αποθήκευσης



Υλικό	Σημείο Τήξης(°C)	Λανθάνουσα Θερμότητα (W/mK)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK) (κατάσταση, °C)	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> ) (κατάσταση, °C)
<b>Ανόργανα Υλικά</b>				
H <sub>2</sub> O	0	333	0,612(υγρό,20)	998(υγρό,20) 917(στερεό, 0)
MgCl <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	117	168,6	0,570(υγρό, 120) 0,694(στερεό,90)	1450(υγρό,120) 1569(στερεό,20)
Mg(NO <sub>3</sub> )*6H <sub>2</sub> O	89	162,8	0,490(υγρό,95) 0,611(στερεό,37)	1550(υγρό,94) 1636(στερεό,25)
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	36	146,9	0,464(υγρό,39,9)	1828(υγρό,36) 1937(στερεό,24)
CaCl <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	27	190,8	0,540(υγρό,38,7) 1,088(στερεό,23)	1562(υγρό,32) 1802(στερεό,24)
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> *H <sub>2</sub> O (Άλας Glauber)	32	254	0,544	1485(στερεό)
<b>Οργανικά Υλικά</b>				
Παραφίνη	64	173,6	0,164(υγρό,63,5) 0,346(στερεό,33,6)	790(υγρό,65) 916(στερεό,24)
Πολυγλυκόλη E400	8	99,6	0,187(υγρό,38,6)	1125(υγρό,25) 1228(στερεό,3)
Πολυγλυκόλη E600	22	127,2	0,189(υγρό,38,6)	1126(υγρό,25) 1232(στερεό,4)
Παραφίνη C <sub>18</sub>	28	244	0,148(υγρό,40) 0,358(στερεό,25)	774(υγρό,70) 814(στερεό,20)
<b>Λιπαρά Οξέα</b>				
Στεαρικό οξύ	69	202,5	0,172(υγρό,70)	848(υγρό,70)
Παλμειτικό οξύ	64	185,4	0,162(υγρό,68,4)	850(υγρό,65) 989(στερεό,24)
Capric Acid	32	152,7	0,153(υγρό,38,5)	850(υγρό,65) 989(στερεό,24)
Caprylic Acid	16	148,5	0,149(υγρό,38,6)	901(υγρό,30) 981(στερεό,13)

**ΣΧΗΜΑ 3.2:** Πίνακας ιδιοτήτων ενδεικτικών ΥΑΦ

Ο ορισμός ενός PCM (Phase-Change-Material), ελληνιστί Υλικό Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ), ή στην ελληνική βιβλιογραφία «άμορφο υλικό», είναι αφ' ενός μεν απλός, αφ' ετέρου δε άνευ σοβαρής σημασίας. Και αυτό γιατί τα ΥΑΦ δεν είναι κάποια ανατρεπτική ανακάλυψη, παρά κάποιες καταλλήλως χρησιμοποιούμενες ουσίες, οι οποίες όπως όλα τα γνωστά υλικά, αλλάζουν φάση, υπό σχεδόν σταθερή θερμοκρασία, από τη στιγμή που τους προσφέρεται κατάλληλο ποσό θερμότητας.

Ο πλέον λακωνικός ορισμός που μπορεί να δοθεί για τα ΥΑΦ είναι ότι:

«ΥΑΦ είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας»

Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, αυτός ο ορισμός εμπεριέχει όλα τα γνωστά και χρησιμοποιούμενα σήμερα υλικά. Το καινοτόμο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης ομάδας υλικών όμως, είναι ότι δίνουν τη δυνατότητα στο μηχανικό-σχεδιαστή να εκμεταλλευτεί αυτή την φυσική ιδιότητά τους, ώστε να βελτιώσει τη θερμική συμπεριφορά πληθώρας συστημάτων και κατασκευών.

Στα πλαίσια του θερμοκρασιακού εύρους της ανθρώπινης θερμικής άνεσης (20-30°C) τα υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι ιδιαίτερωσ αποδοτικά. Αποθηκεύουν περίπου 5 με 14 φορές περισσότερη ενέργεια κατ' όγκο απ' ότi τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όπως το νερό, η πέτρα, το τούβλο, και άλλα.

Ως υποψήφια ΥΑΦ θεωρούνται συνήθως υλικά που αλλάζουν φάση μεταξύ στερεής και υγρής κατάστασης, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικό επίπεδο και υλικά που μεταβαίνουν από τη μία φάση στην άλλη με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Τα υλικά που μεταπίπτουν σε αέρια κατάσταση κατά την αλλαγή φάσης δεν ενδιαφέρουν, λόγω των πρακτικών δυσκολιών που εμφανίζει η μεγάλη αλλαγή της πυκνότητας αλλά και της ίδιας της φύσης των αερίων.

Όσον αφορά τώρα, στα στερεά-υγρά ΥΑΦ, αυτά αρχικά συμπεριφέρονται όπως τα κλασσικά υλικά αποθήκευσης: η θερμοκρασία τους αυξάνει, όσο αυτά απορροφούν θερμότητα. Αντίθετα με τα κλασσικά (αισθητής θερμότητας) αποθηκευτικά υλικά, όταν τα ΥΑΦ φτάσουν στο θερμοκρασιακό επίπεδο αλλαγής φάσης (σημείο τήξης), τότε απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας χωρίς παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας τους. Αντίστοιχα, όταν η περιβάλλουσα το ΥΑΦ θερμοκρασία ελαττωθεί, τότε αυτό στερεοποιείται ελευθερώνοντας το ποσό θερμότητας που είχε απορροφήσει κατά τη φάση της υγροποίησης. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα ΥΑΦ απορροφούν και εκλύουν θερμότητα, διατηρώντας μία σχεδόν σταθερή θερμοκρασία.

Το ιδανικό ΥΑΦ θα ήταν ένα υλικό που θα παρουσίαζε μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, θερμοκρασία τήξης σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της εκάστοτε εφαρμογής, να τήκεται με την ελάχιστη εμφάνιση supercooling (υπέρψυξης), να είναι χημικά σταθερό, άφθονο, φθινό στην παραγωγή, όπως επίσης να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό, ή εύφλεκτο. Τα υλικά που έχουν μελετηθεί τα τελευταία χρόνια είναι τα ένυδρα άλατα, οι παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και εύτηκτα μίγματα οργανικών και μη οργανικών συστατικών.

ΥΑΦ χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών και διαφορετικών πεδίων:

- αποθήκευση ενέργειας
- ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας
- βοηθητικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας
- αντλίες θερμότητας
- διαστημικές εφαρμογές
- συστήματα ψύξης φορητών Η/Υ
- ειδικός ρουχισμός
- συστήματα τηλεπικοινωνίας

Το πλέον γνωστό ΥΑΦ είναι το νερό, που κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο, μπορεί να αποθηκεύσει πολύ μεγάλα ποσά θερμότητας (περίπου 80 φορές περισσότερη αποθηκευμένη ενέργεια σε σχέση με την υγρή του κατάσταση). Επειδή η χρήση του πάγου ως ΥΑΦ παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω των ιδιοτήτων του νερού (Σ.Τ. 0°C, μεγάλη μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία, χαμηλή θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα αποθήκευσης κλπ) η ιδέα ήταν να αναπτυχθούν υλικά με βάση το νερό, ώστε να παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματά του (μεγάλη τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, μεγάλη τιμή

λανθάνουσας θερμότητας) αλλά να μην παρουσιάζουν τα υπόλοιπα προβλήματα χρήσης του πάγου ως ΥΑΦ και κυρίως την χαμηλή θερμοκρασία τήξης του.

Έτσι δημιουργήθηκαν τα πρώτα ΥΑΦ που είναι τα ένυδρα άλατα, μία κατηγορία υλικών που αναπτύσσεται και τελειοποιείται ακόμη και σήμερα. Τα ένυδρα άλατα είναι σχετικά ασταθείς ενώσεις με μόρια νερού που ανάλογα με την αποβολή ή απορρόφηση θερμότητας από το σύστημα, αποβάλλουν ή προσλαμβάνουν τα μόρια νερού. Ένα από τα πλέον γνωστά ένυδρα άλατα είναι το άλας του Glauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) με Σ.Τ.  $32.4\text{ }^\circ\text{C}$  και λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης  $254\text{kJ/kg}$ .

Κύριο πλεονέκτημα των ΥΑΦ έναντι του πάγου είναι η δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας σε ένα μεγάλο εύρος από τους  $-40$  έως τους  $110\text{ }^\circ\text{C}$ . Το χαρακτηριστικό αυτό είναι και το κύριο πλεονέκτημα των ΥΑΦ, διότι ανάλογα με την εφαρμογή η επιθυμητή θερμοκρασία αλλαγής φάσης είναι και διαφορετική. Για παράδειγμα, η εφαρμογή στην τοιχοποιία ζητά θερμοκρασίες αλλαγής φάσης από  $25$  έως  $27\text{ }^\circ\text{C}$ , ενώ για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές κλιματισμού το αντίστοιχο εύρος πρέπει να κυμαίνεται από  $2$  έως  $5\text{ }^\circ\text{C}$ . [7-12]

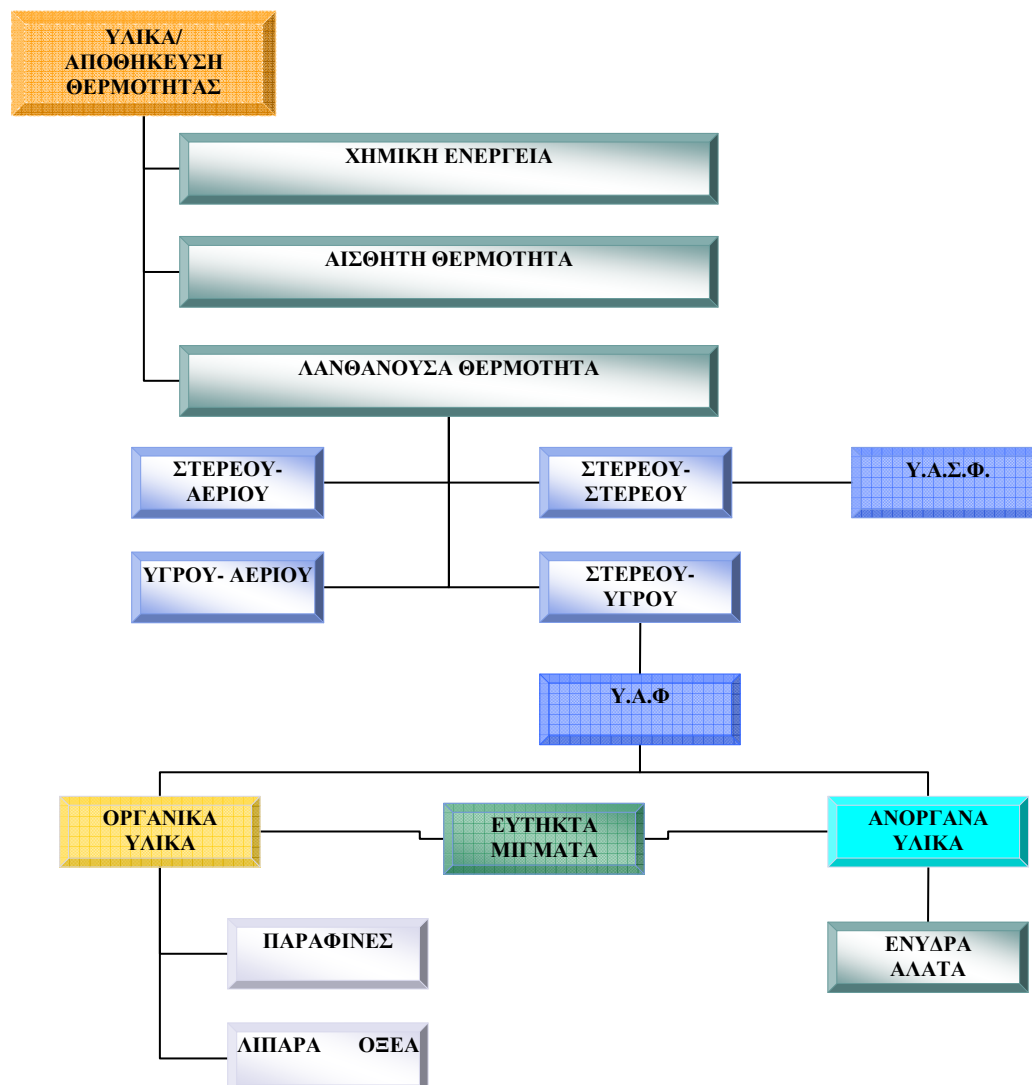


**ΣΧΗΜΑ 3.3:** Ακατέργαστα ΥΑΦ

### 3.2. Ταξινόμηση των ΥΑΦ

Τα υλικά που αλλάζουν φάση και ειδικότερα αυτά που από στερεά μεταπίπτουν σε υγρά ομαδοποιούνται με βάση τη σύστασή τους σε οργανικά και ανόργανα υλικά. Η κατηγορία των οργανικών υλικών αντιπροσωπεύεται κυρίως από τις παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά (μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως και 25) καθώς και από τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών, ενώ των ανόργανων υλικών κυρίως από τα διαλύματα των ένυδρων αλάτων.

Μία κατηγορία ΥΑΦ που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και βρίσκεται υπό έρευνα είναι η κατηγορία που περιλαμβάνει υλικά προερχόμενα από ανακυκλωμένα φυτικά ή ζωικά έλαια των οποίων η διαθεσιμότητα αυξάνεται, καθώς αυξάνεται ολοένα και περισσότερο η παγκόσμια παραγωγή απορριμμάτων τα οποία εμφανίζουν μεγάλη περιεκτικότητα σε τρόφιμα.



**ΣΧΗΜΑ 3.4:** Ταξινόμηση ΥΑΦ

Άλλου τύπου κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει σύμφωνα με τις εφαρμογές που καλύπτουν. Τα ΥΑΦ μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με τη θερμοκρασία ή το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης, σε υλικά που

αλλάζουν φάση κάτω από τους 15 °C και χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές κλιματισμού ή σε μεταφορά ευπαθών υλικών (ιατρικές εφαρμογές) και σε υλικά που αλλάζουν φάση πάνω από τους 90 °C και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ψύξης με απορρόφηση. Όλα τα άλλα υλικά με ενδιαμέσες τιμές θερμοκρασίας αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές θέρμανσης σε συνεργασία με ηλιακά συστήματα ή εφαρμογές εξομάλυνσης των φορτίων κλιματισμού καθώς και για αποθήκευση θερμότητας.[9-12]

### **3.2.1. Οργανικά υλικά**

Τα οργανικά υλικά αντιπροσωπεύονται, όπως προαναφέρθηκε, κυρίως από τις παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά, τα οποία είναι μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως 25. Εξίσου σημαντικές κατηγορίες οργανικών υλικών είναι τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών. Τα εμπορικά προϊόντα οργανικών υλικών είναι αρκετά φθηνότερα από τα ένυδρα άλατα με μέτριες τιμές λανθάνουσας θερμότητας (περίπου 150 kJ/kg) και δυνατότητα παραγωγής για σχεδόν όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Η εμφάνιση supercooling είναι αμελητέα, είναι χημικά αδρανή και σταθερά, χωρίς να εμφανίζουν διαχωρισμό φάσεων ή εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους. Δυστυχώς όμως εμφανίζουν χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, ιδιότητα που περιορίζει τις εφαρμογές τους (περίπου 0,2 W/mK). Γι' αυτό το λόγο έχουν εξεταστεί πολλές περιπτώσεις εμπλουτισμού του υλικού με μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων ή χρήση δοχείων και σωλήνων με πτερύγια με σκοπό την αύξηση του ρεύματος θερμότητας μέσα στο υλικό.

Επίσης στα οργανικά υλικά επηρεάζεται αρκετά η πυκνότητα του υλικού από τη φάση, ώστε είναι δυνατόν όταν το υλικό στερεοποιηθεί και αυξηθεί η πυκνότητά του, να αποκολληθεί από τα τοιχώματα του δοχείου, γεγονός που θα επηρεάσει αρκετά το φαινόμενο της αγωγής θερμότητας (ουσιαστικά δεν είναι πλέον αγωγή, αλλά αγωγή-συναγωγή θερμότητας). Επίσης μειονέκτημα είναι η αναφλεξιμότητά τους, παρ' όλο που είναι κοινή άποψη των ερευνητών της περιοχής, ότι η χαμηλή τάση ατμών της παραφίνης, δεν εγκυμονεί κινδύνους ανάφλεξης.[9-12]

#### **3.2.1.1. Παραφίνες**

Παραφίνη είναι το σύνηθες όνομα για μια ομάδα αλκανικών υδρογονανθράκων μεγάλου μοριακού βάρους, με γενικό μοριακό τύπο  $C_nH_{2n+2}$ , με  $n$  μεγαλύτερο του 20. Παραφίνη είναι επίσης επιστημονική ονομασία για ένα αλκάνιο γενικότερα, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις αναφέρεται γενικά σε ένα γραμμικό (κανονικό) αλκάνιο, ενώ τα ισοαλκάνια ονομάζονται ισοπαραφίνες. Κατατάσσονται στα οργανικά ΥΑΦ.

Τα αλκάνια είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες. Το πλέον απλό αλκάνιο είναι το μεθάνιο,  $CH_4$ . Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των ατόμων που σχηματίζουν την ανθρακική αλυσίδα.

Η ανθρακική αλυσίδα των κορεσμένων υδρογονανθράκων μπορεί να είναι γραμμική ( $C_nH_{2n+2}$ ), ή με διακλαδώσεις ( $C_nH_{2n+2}$ ,  $n>3$ ), ή κυκλικού σχήματος ( $C_nH_{2n}$ ,  $n>2$ ). Η κατά IUPAC ονοματολογία των αλκανίων, ονομάζει υπό τον γενικό τίτλο αλκάνια, όλες τις περιπτώσεις που υποπίπτουν στις δύο πρώτες κατηγορίες, ενώ ονομάζει κυκλοαλκάνια αυτές που σχηματίζουν βρόχο. Αντίστοιχα τα αλκύλια, είναι μέρη ανθρακικής αλυσίδας, με έναν ελεύθερο δεσμό και ακολουθούν πιστά την ονοματολογία των αλκανίων (μεθύλιο, αιθύλιο, κλπ). Παρατηρούνται σαν πρόσθετα σε κύριες ανθρακικές αλυσίδες.

Τα αλκάνια δεν είναι ιδιαίτερα αντιδραστικές ουσίες και θεωρούνται βιολογικά υποπροϊόντα και είναι σημαντικά κυρίως λόγω των μη υδρογονανθρακικών ουσιών οι οποίες μπορούν να προσαρτηθούν στην ανθρακική αλυσίδα.

Σε κανονικές συνθήκες από  $\text{CH}_4$  έως  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  τα αλκάνια είναι αέρια. Από  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  έως  $\text{C}_{17}\text{H}_{36}$  είναι υγρά και από  $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$  και μετά είναι στερεά. Το σημείο βρασμού των αλκανίων γενικότερα εξαρτάται από το μοριακό βάρος, και μάλιστα η συνάρτηση των δύο μεγεθών είναι σχεδόν γραμμική.

Αντίστοιχα, οι κυκλικοί υδρογονάνθρακες έχουν υψηλότερο σημείο βρασμού από τους υδρογονάνθρακες ευθείας αλυσίδας ίδιου μοριακού βάρους. Όμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το σημείο τήξης, δηλαδή όσο περισσότερα άτομα άνθρακα στο μόριο του αλκανίου, τόσο υψηλότερο το σημείο τήξης.

Τα αλκάνια με περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα έχουν γενικά χαμηλότερο σημείο τήξης από αυτά με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα, και αυτό διότι τα μόρια με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα, είναι καλύτερα χωροθετημένα, πράγμα που συνεπάγεται υψηλότερης απαιτούμενης προσθήκης θερμότητας για να σπάσουν οι δεσμοί και να επιτευχθεί η μετάβαση στην υγρή φάση.

Οι περισσότερες παραφίνες αποτελούνται από ευθείες ανθρακικές αλυσίδες με δύο μεθυλικά μόρια κοντά στο τέλος της αλυσίδας. Διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες, ανάλογα με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα τους. Υπάρχουν οι n-Παραφίνες, οι οποίες έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα και οι ισο-Παραφίνες, των οποίων η ανθρακική αλυσίδα αποτελείται από περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα. Το κατά πόσον μία παραφίνη θα είναι ισο-παραφίνη ή όχι, εξαρτάται από τον αριθμό των αλκανίων που περιέχονται στην ουσία (75% έως 100%). Το σημείο τήξης των παραφινών εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ατόμων άνθρακα του μορίου.

Αλκάνια με ανθρακικό αριθμό από 14-40 έχουν σημεία τήξης από 6 έως  $80^\circ\text{C}$ . Αυτές ονομάζονται καθαρές παραφίνες και δεν έχουν σχέση με τα κεριά παραφίνης, όπως ονομάζονται οι παραφίνες με ανθρακικό αριθμό από 8 έως 15, και χαμηλότερα σημεία τήξης από τις καθαρές παραφίνες, από 2 έως  $45^\circ\text{C}$ . Δεν είναι διαλυτές στο νερό, αλλά διαλύονται στους αιθέρες, στο βενζόλιο, και σε συγκεκριμένους εστέρες. Δεν αντιδρούν με τα περισσότερα χημικά αντιδραστήρια, αλλά στην υγρή φάση τους είναι ιδιαίτερως εύφλεκτες.

Οι παραφίνες είναι ιδανικά υλικά για χρήση ως ΥΑΦ. Έχουν μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος και μπορούν να δημιουργηθούν, μέσω μιγμάτων, υλικά κατάλληλα να καλύψουν οποιοδήποτε εύρος θερμοκρασιών, ανάλογα με την εκάστοτε εγκατάσταση. Είναι οργανικές ουσίες, επομένως είναι φτηνές και άφθονες. Έχουν αρκετά καλή αποθηκευτική ικανότητα σε σχέση με άλλα υλικά, όπως επίσης έχουν το πλεονέκτημα να μην υπερψύχονται, δηλαδή όλο το υλικό στερεοποιείται, χωρίς εμφάνιση υπέρψυξης, άρα το υλικό αποδίδει τη μέγιστη αποθηκευτική ικανότητά του.

Επίσης, σαν οργανικές ουσίες, δεν εμφανίζουν στη διάρκεια ζωής τους το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων, πράγμα που από μόνο του σημαίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που εμφανίζουν οι παραφίνες έναντι άλλων υλικών για εφαρμογές θέρμανσης σε κτίρια, είναι πως υπάρχει πλήθος παραφινών με σημεία τήξης από  $20\text{-}26^\circ\text{C}$ , στα πλαίσια δηλαδή που κυμαίνονται οι απαιτήσεις των εν λόγω συστημάτων.

Οι παραφίνες παρουσιάζουν χαμηλή πίεση ατμοποίησης, γεγονός που ερμηνεύει τις ελάχιστες απώλειες υλικού σε ένα μεγάλο βάθος χρόνου χρήσης. Το πλεονέκτημα αυτό κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό για τις εφαρμογές όπου απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός κυκλικών φορτίσεων του υλικού. Για παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε την εφαρμογή στην τοιχοποιία, όπου απαιτούμε περισσότερα από 25 έτη ζωής. Επιπλέον δεν παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης με κανένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο.

Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο ότι οι παραφίνες πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή φάσης σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου 10K (περίπου

9K πριν το Σ.Τ. και 1K μετά από αυτό). Ένα τέτοιο φαινόμενο αν δεν ληφθεί υπ' όψη μπορεί να οδηγήσει σε μη σωστή εκλογή υλικού με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές. Η ύπαρξη πληθώρας ουσιών λύνει τα χέρια των μελετητών και δίνει τη δυνατότητα σχεδιασμού και ανάπτυξης αποδοτικότερων και οικονομικότερων συστημάτων.

Υπάρχει ακόμα χώρος για μελέτη και βελτίωση αυτών των συστημάτων, λόγω του υπαρκτού κινδύνου ανάφλεξης της υγρής φάσης της παραφίνης, καθώς επίσης και για την ανάπτυξη μεθόδων ακόμη καλύτερης ενσωμάτωσης της παραφίνης στα υλικά για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου διαφυγής ΥΑΦ, όταν αυτό βρίσκεται στην υγρή φάση.[9,12,13,14]

### **3.2.1.2. Λιπαρά Οξέα**

Στην Οργανική Χημεία και ειδικότερα στη Βιοχημεία, λιπαρό οξύ ονομάζεται ένα καρβοξυλικό οξύ, συνήθως με μακρά ανθρακική αλυσίδα, είτε κορεσμένη, είτε ακόρεστη. Καρβοξυλικά οξέα σαν το βουτυρικό οξύ (με 4 άτομα άνθρακα) θεωρούνται λιπαρά οξέα, παρά το ότι γενικότερα τα λιπαρά οξέα προέρχονται από φυσικά λίπη και έλαια και θεωρείται ότι έχουν τουλάχιστον 8 άτομα άνθρακα, όπως το καπριλικό οξύ. Τα περισσότερα από τα φυσικά λιπαρά οξέα, έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα στην ανθρακική αλυσίδα τους. Στη βιομηχανία παράγονται από την υδρόλυση των εστερικών δεσμών ενός λιπαρού ή βιολογικού ελαίου (π.χ. τριγλυκερίδια), με την αφαίρεση της γλυκερόλης.

Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα κορεσμένα και τα ακόρεστα.

Τα κορεσμένα λιπαρά οξέα δεν περιέχουν καθόλου διπλούς δεσμούς ή άλλα λειτουργικά σύνολα κατά μήκος της ανθρακικής αλυσίδας.

Ενδεικτικά κορεσμένα λιπαρά οξέα είναι:

- Βουτυρικό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$
- Μυριστικό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$
- Παλμιτικό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$
- Στεαρικό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$

Τα ακόρεστα λιπαρά οξέα είναι παρόμοιας μορφής με τα κορεσμένα, περιέχοντας όμως αυτή τη φορά αλκύλια κατά μήκος της ανθρακικής αλυσίδας με αποτέλεσμα να υπάρχουν διπλοί δεσμοί μεταξύ των ατόμων του άνθρακα.

Ενδεικτικά ακόρεστα λιπαρά οξέα:

- Άλφα-λινολεϊκό οξύ:  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
- Λινολεϊκό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
- Ολεϊκό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

Τα λιπαρά οξέα εμφανίζουν σημεία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα παρόμοια με αυτά των παραφινών. Το βουτυρικό οξύ ( $\text{CH}_3[\text{CH}_2]_2\text{COOH}$ ) για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κτιριακές εφαρμογές και έχει χρησιμοποιηθεί σε πειράματα, όμως το κόστος του είναι τουλάχιστον 2 με 2,5 φορές μεγαλύτερο από την παραφίνη με αντίστοιχες θερμικές ιδιότητες. Αντίστοιχα, υπάρχουν λίγα λιπαρά οξέα τα οποία να είναι κατάλληλα για κτιριακές εφαρμογές, πράγμα που γίνεται εύκολα κατανοητό ότι είναι σημαντικό μειονέκτημα έναντι των παραφινών.

Οι δύο επικρατέστεροι υποψήφιοι από αυτά τα υλικά για χρήση σε κτιριακές θερμικές εφαρμογές είναι το Καπρικό Οξύ [σημείο τήξης 31.5°C] και το Καπριλικό Οξύ [σημείο τήξης 16.5°C].

Τα λιπαρά οξέα σε θερμοκρασία δωματίου, υπόκεινται σε μία χημική αντίδραση, γνωστή σαν αυτό-οξειδωση. Το λιπαρό οξύ σπάει σε υδατάνθρακες, κετόνες, αλδεΐδες και μικρότερες ποσότητες αλκοολών και εποξικών. Επίσης συχνά τα τελευταία επεξεργάζονται με συμπυκνωτικούς παράγοντες, όπως το κιτρικό οξύ.

Ένα ακόμη μειονέκτημα αυτής της ομάδας υλικών είναι η κακοσμία, γεγονός που όπως γίνεται κατανοητό περιορίζει δραματικά τη χρησιμότητα του χώρου στον οποίο αυτά εγκαθίστανται.

Παρ' όλ' αυτά, τα παραπάνω προβλήματα θα μπορούσαν να ξεπεραστούν με κάποιου είδους συσκευασία, δίνοντας έτσι ένα ΥΑΦ φτηνό, χημικά σταθερό, ιδανικό για κτιριακές εφαρμογές.[9,12,15]

### **3.2.2. Ανόργανα Υλικά**

Τα ένυδρα άλατα είναι ο κύριος εκπρόσωπος ανόργανων υλικών και παρουσιάζουν αρκετά καλές ιδιότητες (τιμή λανθάνουσας θερμότητας περίπου 250 kJ/kg και αγωγιμότητας 0.6 W/mK περίπου), μέτριο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις παραφίνες αλλά υψηλό κόστος πώλησης σε σχέση με τις τιμές πώλησης των παραφινών λόγω της επιβεβλημένης ενσωμάτωσής τους σε προστατευτικό κάλυμμα και χρήση πρόσθετων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους.

Τα ένυδρα άλατα έλαβαν μέρος σε αναρίθμητες μελέτες γύρω από τη χρησιμοποίησή τους σαν ΥΑΦ. Ο κύριος λόγος είναι το σχετικά μεγάλο εύρος σημείων τήξης που διαθέτουν, σχεδόν από 0 έως 120°C, πράγμα που τα κάνει κατάλληλα για πολλές θερμικές εφαρμογές και όχι μόνο για κτίρια. Ο χημικός τύπος (γενικός) είναι  $M \cdot nH_2O$ , όπου  $M$  είναι μία ανόργανη ουσία, ενυδατωμένη με  $n$  μόρια νερού, και σχηματίζει μία σύνθετη ουσία ικανή να αποθηκεύσει μεγάλο ποσό θερμότητας υπό μορφή λανθάνουσας.

Η αρχή λειτουργίας των ένυδρων αλάτων, βασίζεται στην αποβολή του κρυσταλλικού νερού, το οποίο αποβάλλεται όταν προσδοθεί θερμότητα στο άλας σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό, αποθηκεύεται θερμότητα στο ΥΑΦ, η οποία αποβάλλεται με επανακρυστάλλωση του νερού του άλατος.

Βασικά μειονεκτήματα των ανόργανων ΥΑΦ είναι - κυρίως για τα ένυδρα άλατα - η ασυμβατότητα του ΥΑΦ με τα υλικά συσκευασίας, γεγονός που οδηγεί σε διαβρωτικά φαινόμενα στο δοχείο, καθώς τα ένυδρα άλατα είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά.

Τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν και άλλα προβλήματα όπως για παράδειγμα η αφυδάτωση του ένυδρου άλατος, λόγω συνεχούς και μακράς χρήσης, κατά την οποία οι φάσεις του ΥΑΦ διαχωρίζονται κυρίως λόγω της πίεσης των ατμών του νερού, φαινόμενο το οποίο αντιμετωπίζεται με τη χρήση αεροστεγών δοχείων αποθήκευσης. Το φαινόμενο της αποσύνθεσης του ΥΑΦ ή αλλιώς του διαχωρισμού των φάσεών του, είναι σοβαρό πρόβλημα και συμβαίνει λόγω της ανομοιομορφίας στην τήξη του υλικού, διαδικασία η οποία είναι μη αντιστρεπτή.

Το άλας του Glauber ( $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ), με τυπική κατά βάρος σύσταση 44%  $Na_2SO_4$  και 56%  $H_2O$  είναι ένα από τα πλέον μελετημένα υλικά με θερμοκρασία τήξης 32,4°C και λανθάνουσα θερμότητα 254 kJ/kg. Αν και είναι ένα από τα φθηνότερα υλικά που κυκλοφορούν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας, τα προβλήματα διαχωρισμού των φάσεων, ο σχηματισμός ιζήματος και το φαινόμενο supercooling περιορίζουν το εύρος των εφαρμογών.

Ερευνητές προτείνουν την προσθήκη επιπλέον ύδατος, για την αποφυγή δημιουργίας ιζήματος, όμως κάτι τέτοιο θα μείωνε την αποθηκευτική ικανότητα του



υλικού. Αντ' αυτού έχει χρησιμοποιηθεί πληθώρα υλικών για την σταθεροποίηση του ΥΑΦ, προσπαθώντας παράλληλα να αυξηθεί η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας.

Συμπερασματικά, τα κυριότερα προβλήματα που εμφανίζει η χρήση των ένυδρων αλάτων δημιουργούνται λόγω της ανεπάρκειας σταθερότητας της χημικής σύνθεσης του υλικού και του φαινομένου διάβρωσης μεταξύ του υλικού και του υλικού συσκευασίας. Προφανώς, βασικό πλεονέκτημα των ένυδρων αλάτων έναντι των παραφινών όσον αφορά στις κτηριακές κυρίως εγκαταστάσεις είναι η μη αναφλεξιμότητά τους.

Στο πλαίσιο αναφοράς των ιδιοτήτων δεν θα πρέπει να παραλειφθεί ο ρόλος της πυκνότητας των υλικών, σημαντικός παράγοντας όταν τα υλικά χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις ή εφαρμογές που από τη φύση τους απαιτούν οικονομία χώρου.

Σε γενικές γραμμές τα ένυδρα άλατα είναι πυκνότερα υλικά από τα υπόλοιπα ΥΑΦ και παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου υλικού.[9,12,16]

Ενδεικτικές τιμές πυκνότητας των βασικών κατηγοριών ΥΑΦ:

- Ένυδρα άλατα περίπου  $1500 \text{ kg/m}^3$
- Λιπαρά οξέα περίπου  $900 \text{ kg/m}^3$
- Παραφίνες περίπου  $800 \text{ kg/m}^3$

### **3.2.3. Εύτηκτα μίγματα**

Εύτηκτα ονομάζονται τα μίγματα ΥΑΦ, τα οποία μπορεί να είναι είτε οργανικά, είτε ανόργανα ή ακόμα και μίγμα ανόργανων με οργανικά ΥΑΦ. Προφανές είναι πως τα εύτηκτα ΥΑΦ αναπτύχθηκαν λόγω των δυνατοτήτων που παρέχουν στους σχεδιαστές ώστε να επιτύχουν τα επιθυμητά σημεία τήξης για την κάθε εφαρμογή. Θεωρείται δε ότι συμπεριφέρονται και αντιμετωπίζονται σαν ένυδρα άλατα.

Βασικό πλεονέκτημα με τα εύτηκτα ΥΑΦ είναι ότι εμφανίζουν την τάση να συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα και των δύο ομάδων, ενώ παράλληλα δεν έχουν την τάση να κάνουν το ίδιο με τα μειονεκτήματα. Το βασικό τους μειονέκτημα όμως είναι το κόστος παραγωγής, το οποίο είναι διπλάσιο έως τριπλάσιο απ' ότι των οργανικών και ανόργανων ΥΑΦ.

Χημική ένωση	Σημείο τήξης (°C)	Θερμότητα τήξης (kJ/kg)
66.6% $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 33.3% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25	127
48% $\text{CaCl}_2$ + 4.3% $\text{NaCl}$ + 0.4% $\text{KCl}$ + 47.3% $\text{H}_2\text{O}$	26.8	188
47% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ + 53% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	136
60% $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ + 40% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	30	200.5

**ΣΧΗΜΑ 3.5:** Εύτηκτα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως σε κτηριακές εφαρμογές.

### 3.2.4. Υλικά αλλαγής στερεής φάσης (ΥΑΣΦ)

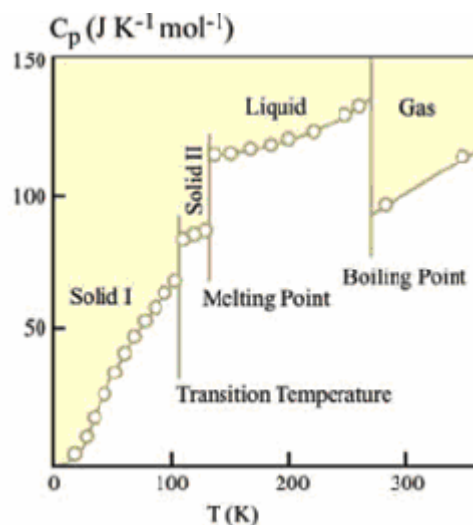
Σε περιπτώσεις αλλαγής φάσης στερεού-στερεού (ΥΑΣΦ), η θερμότητα αποθηκεύεται καθώς το υλικό μεταπίπτει από τη μία κρυσταλλική δομή σε κάποια άλλη. Παρ' όλο που οι περισσότερες τέτοιες μεταπτώσεις εμφανίζουν μικρή αποθηκευτική ικανότητα υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας και μικρή ογκομετρική αλλαγή, υπάρχουν μεταπτώσεις οι οποίες περιλαμβάνουν μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα, σχεδόν όσο και μία μετάπτωση από στερεό σε υγρό. Τα πλεονεκτήματα αυτών των ΥΑΦ είναι προφανή, καθώς δεν περιλαμβάνεται κανένας από τους περιορισμούς των υπολοίπων υλικών, όπως για παράδειγμα της μεγάλης ογκομετρικής αλλαγής, της τάσης ατμών, της διαρροής ή της διάβρωσης. Δεν είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα και ακόμη βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο.

### 3.3. Χαρακτηριστικά ΥΑΦ

Ακολουθεί μία σύντομη παράθεση των βασικών χαρακτηριστικών θερμικών ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης οι οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά του θερμικού συστήματος του κάθε υλικού.

Η **θερμοχωρητικότητα** για όλα τα ΥΑΦ, ανεξαρτήτως αν πρόκειται για οργανικά ή ανόργανα, είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Δεν έχει βρεθεί μέχρι σήμερα κάποιος νόμος που να περιγράφει τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας και να καλύπτει ένα μεγάλο εύρος υλικών. Επί του παρόντος χρησιμοποιείται η σύμβαση με την οποία οι δύο φάσεις (στερεή και υγρή) του υλικού αντιμετωπίζονται με δύο αντίστοιχες τιμές για τη θερμοχωρητικότητα, τιμές που θεωρούνται πρακτικά σταθερές για το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιείται το υλικό.

Ακόμα όμως δεν υπάρχει σαφής απάντηση για την τιμή της θερμοχωρητικότητας στη διφασική περιοχή. Πρακτικά, δίνονται πολυωνυμικές και εκθετικές συναρτήσεις για το κάθε ΥΑΦ, χωρίς να έχει εξαχθεί σήμερα μια οικουμενική συνάρτηση που θα αντιπροσωπεύει μια μεγάλη ομάδα από αυτά. Το μοναδικό κοινό σημείο για τη θερμοχωρητικότητα, είναι ότι κατά κανόνα αποτελεί μια αύξουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας του υλικού.



**ΣΧΗΜΑ 3.6:** Διάγραμμα του  $C_p$  για όλες τις φάσεις του n-Βουτανίου

Η τιμή της μέγιστης **λανθάνουσας θερμότητας** που μπορούν να αποθηκεύσουν τα ΥΑΦ ανά μονάδα μάζας, είναι δείκτης αποδοτικότητας για κάθε εφαρμογή, καθώς είναι επιθυμητή η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη αποθήκευση ανά μονάδα μάζας υλικού. Τον ίδιο ρόλο (ποιοτικά κατά τις εφαρμογές) παίζει και η πυκνότητα του ΥΑΦ.

Για να υπάρξει αποδοτική μεταφορά θερμότητας πρέπει το υπεύθυνο υλικό να έχει μεγάλη **θερμική αγωγιμότητα (k)**. Τα ΥΑΦ έχουν εν γένει μικρή τιμή θερμικής αγωγιμότητας, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα των ΥΑΦ στις διάφορες εφαρμογές τους. Η τιμή θεωρείται πρακτικά σταθερή σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό φάσμα εφαρμογής. Λόγω της μικρής τιμής του k, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στα ΥΑΦ θεωρείται μη αποδοτικός, καθώς απαιτούνται για γρήγορη και αποτελεσματική χρήση των εφαρμογών των ΥΑΦ, υψηλές θερμοκρασιακές διαφορές. Το μειονέκτημα αυτό, ανάλογα πάντα με την εφαρμογή, μπορεί σε κάποιο βαθμό να αντιμετωπιστεί με αντίστοιχα μεγάλες επιφάνειες μετάδοσης θερμότητας. Υπάρχουν βέβαια κάποιες εφαρμογές όπως η μεταφορά τροφίμων, στις οποίες τα παραπάνω δεν είναι ζωτικής σημασίας.

Ως γνωστό η **πυκνότητα** είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, οπότε κάθε υλικό που αλλάζει φάση, υπόκειται σε ογκομετρικές αλλαγές. Σε περίπτωση λοιπόν που υπάρχει ΥΑΦ σε κλειστή συσκευασία, πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της ογκομετρικής αλλαγής και της συνεπαγόμενης μεταβολής της πίεσης στο εσωτερικό της συσκευασίας.

**Οικολογικά**, τα ΥΑΦ δεν αποτελούν κάποιο κίνδυνο προς το περιβάλλον. Τα κεριά της παραφίνης είναι οικολογικά ακίνδυνα, χωρίς κατά την απόρριψή τους, να αποτελούν κάποιο κίνδυνο για φυτά, ζώα ή μικροοργανισμούς. Έχουν κατηγοριοποιηθεί σαν ουσίες που δεν αποτελούν απειλή για το νερό και είναι 100% ανακυκλώσιμα. Επομένως δεν είναι ούτε τοξικά, ούτε επικίνδυνα προς την ανθρώπινη υγεία. Επεξεργασμένες τέτοιες παραφίνες ικανοποιούν και τις αυστηρότερες προϋποθέσεις ασφαλείας για επαφή με τρόφιμα και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία παραγωγής τροφίμων, σαν αυτούσια ή συστατικά υλικών συσκευασίας, ως επί το πλείστον. Στη φαρμακευτική και κοσμητική βιομηχανία, χρησιμοποιούνται ως βάση για πολλών ειδών κρέμες.[9-12]

### **3.3.1. Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση**

Το σοβαρότερο κριτήριο για την αξιοποίηση των ΥΑΦ σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών (χωρίς εκφυλισμό των ιδιοτήτων), ο οποίος μετράται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικές μονάδες χρόνου.

Η ανεπάρκεια σταθερότητας των υλικών οφείλεται σε δύο λόγους:

- Σε μικρής σταθερότητας χημική σύνθεση του υλικού ή υλικών που αποτελούν το ΥΑΦ.
- Στο φαινόμενο της διάβρωσης που πιθανόν να λάβει χώρα μεταξύ του ΥΑΦ και του υλικού συσκευασίας.

Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνών που ως αντικείμενο αναφοράς έχουν τη διατήρηση των ιδιοτήτων των ΥΑΦ κατά την περιοδική φόρτιση και αποφόρτισή τους ή τη διαβρωτική τους ικανότητα, αφορούν στα ένυδρα άλατα. Για τις παραφίνες και τα παράγωγα υλικά τους έχει βρεθεί ότι έχουν άριστη σταθερότητα στις θερμικές τους ιδιότητες καθώς επίσης και καμία επίδραση όταν έρχονται σε επαφή με τα περισσότερα υλικά (μεταλλικά αλλά και λοιπά δομικά υλικά). Αντιθέτως, τα ένυδρα

άλατα παρουσιάζουν διαβρωτικές τάσεις όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τα περισσότερο διαδεδομένα μέταλλα (χαλκός, σίδηρος, κλπ).

### 3.3.2. Φαινόμενο supercooling

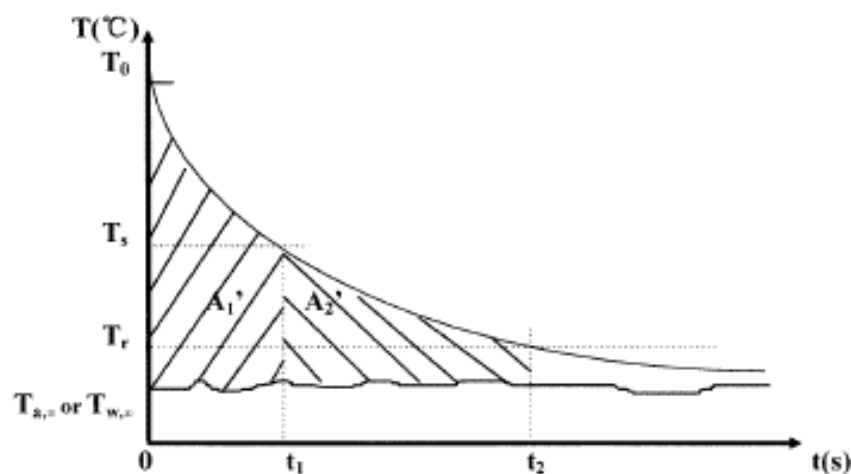
Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που αφορά στο σύνολο των ανόργανων ΥΑΦ αλλά και σε μέρος των οργανικών είναι το φαινόμενο του supercooling (υπέρψυξη). Ο συνδυασμός του φαινομένου της αποσύνθεσης του ένυδρου άλατος καθώς επίσης και τα μειωμένα επίπεδα πυρηνοποίησης κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης του υλικού, οδηγούν στην εμφάνιση του φαινομένου.

Το φαινόμενο του supercooling είναι η διαδικασία της ψύξης ενός υγρού σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από το σημείο στερεοποίησής του, χωρίς το υγρό να στερεοποιηθεί. Γενικά, ένα υγρό κάτω από το σημείο στερεοποίησής του θα διαμορφώσει κρυσταλλική δομή γύρω από έναν παράγοντα διαμόρφωσης κρυσταλλικής δομής (πυρήνα κρυστάλλου). Παρ' όλ' αυτά, αν λείπουν αυτοί οι παράγοντες, τότε το υγρό θα παραμείνει στην ίδια φάση μέχρι τη θερμοκρασία όπου παρατηρείται η ομογενής κρυσταλλική δομή της στερεής φάσης, δηλαδή πολύ χαμηλότερα (συνήθως) από τη θερμοκρασία στερεοποίησής του.

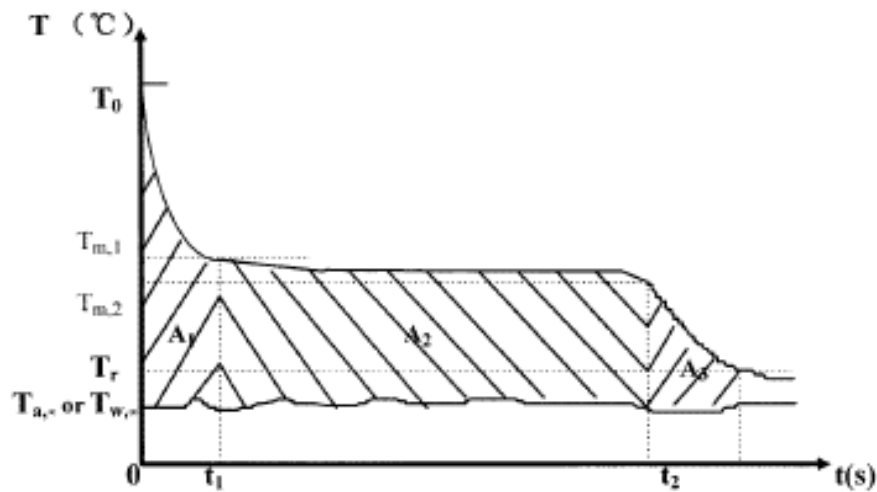
Εφαρμογές του φαινομένου βρίσκουμε και στη βιομηχανία με τη μέθοδο της αστραπιαίας κατάψυξης (flash freezing) όπου η στερεοποίηση επιθυμητών αντικειμένων επιτυγχάνεται με την έκθεση αυτών σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Αυτό επιτυγχάνεται διότι ένα υπέρψυκτο υγρό δύναται να παραμείνει στην υγρή φάση αρκετά κάτω από το σημείο στερεοποίησής του, όταν το ίδιο το υγρό έχει λιγότερες πιθανότητες σχηματισμού αρχικού πυρήνα κρυστάλλου, αν δηλαδή είναι καθαρό, χωρίς προσμίξεις ή άλλους παράγοντες, ή αν το δοχείο στο οποίο βρίσκεται είναι λείο σε ικανοποιητικό βαθμό. Από τη στιγμή όμως που για κάποιον από τους παραπάνω λόγους ένα υπέρψυκτο υγρό μπει σε φάση στερεοποίησης, αυτή θα συντελεστεί σε ιδιαίτερα μικρό χρονικό διάστημα.

Η αντίστοιχη διαδικασία για τη τήξη ενός στερεού είναι πολύ πιο δύσκολη καθώς ένα στερεό για δοσμένη πίεση θα λειώσει πάντα σε σχεδόν ίδια θερμοκρασία. Παρ' όλ' αυτά είναι δυνατόν να υπερθερμανθεί ένα υγρό σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας βρασμού του χωρίς αυτό να μεταβεί στην αέρια φάση.

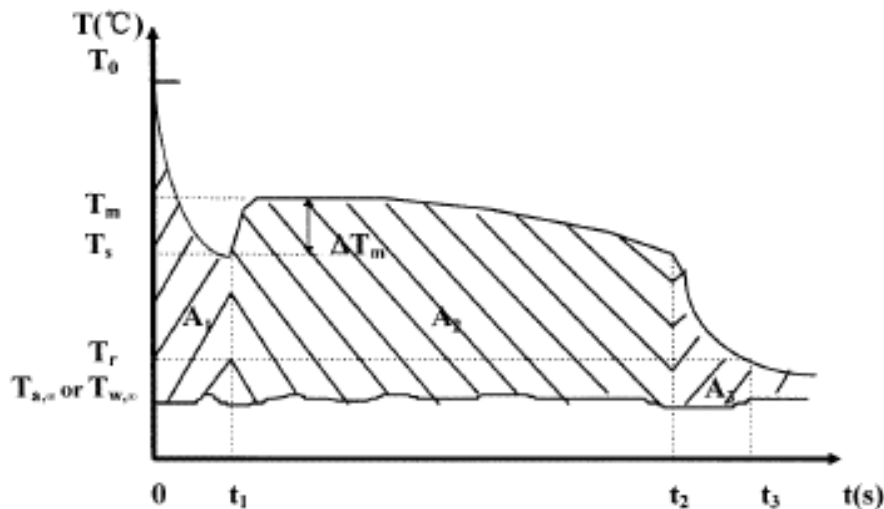
Το φαινόμενο της υπέρψυξης όσο εντείνεται τόσο μη αποδοτικότερη κάνει τη λειτουργία του ΥΑΦ και κατά συνέπεια την αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας.



**ΣΧΗΜΑ 3.7:** Τυπική καμπύλη ψύξης του νερού



**ΣΧΗΜΑ 3.8:** Τυπική καμπύλη ψύξης ενός ΥΑΦ χωρίς supercooling



**ΣΧΗΜΑ 3.9:** Τυπική καμπύλη ΥΑΦ σε διαδικασία ψύξης με supercooling

Το φαινόμενο είναι εμφανές αν παρατηρηθεί η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου κατά την ψύξη ενός ΥΑΦ, όπου παρουσιάζεται πτώση της θερμοκρασίας του υγρού ΥΑΦ πριν την εκκίνηση της αλλαγής φάσης κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης. Κατά τη συνέχιση της ψύξης, η θερμοκρασία του δείγματος αυξάνεται και σταθεροποιείται, τις περισσότερες φορές για μικρό χρονικό διάστημα, στη θερμοκρασία στερεοποίησης, καθώς ακολουθεί πτώση της μέχρι την ολοκλήρωση της στερεοποίησης του υλικού.

Η ύπαρξη supercooling οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης, συνεπώς η λανθάνουσα θερμότητα αποδίδεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή ή σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Βασική παρατήρηση ότι όσο μεγαλύτερος ο ρυθμός ψύξης του δείγματος, τόσο μεγαλύτερος ο βαθμός supercooling. Θα πρέπει επισημανθεί ότι ο βαθμός του supercooling δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο όγκος του δείγματος, η «καθαρότητα» του υλικού, ο ρυθμός ψύξης, η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.

Το φαινόμενο της υπέρψυξης και τα προβλήματα τα οποία αυτό συνεπάγεται μπορούν να αντιμετωπιστούν με την προσθήκη στο υλικό τεχνητών παραγόντων

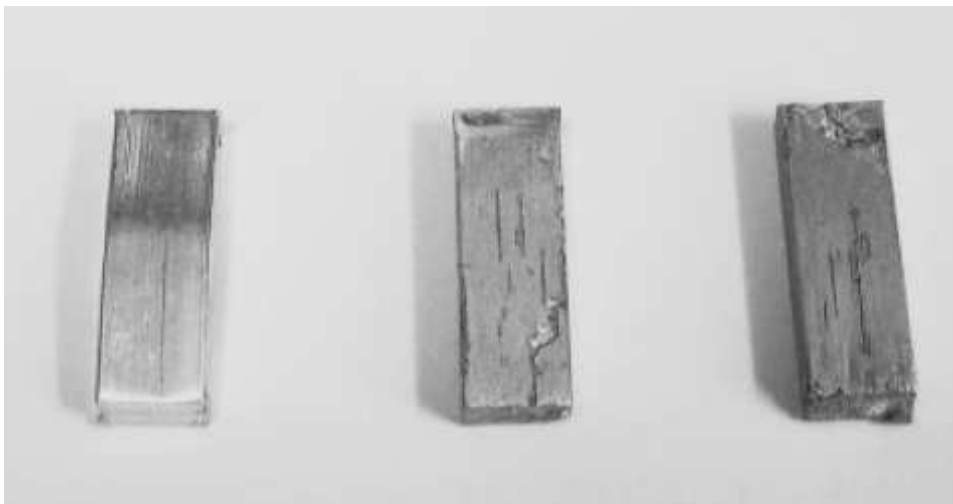
πυρηνοποίησης, οι οποίοι είναι ουσίες με κρυσταλλική δομή παρόμοια, αν όχι ίδια με αυτή του υλικού στο οποίο προστίθενται. Υλικά που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία αποδείχθηκαν άκρως αποδοτικά για διάφορες εφαρμογές.[9,10,17,18]

### **3.3.3. Διάβρωση**

Πολύ σημαντικός παράγοντας στη λειτουργία ενός ΥΑΦ είναι να μην είναι διαβρωτικό, κυρίως απέναντι σε μεταλλικά υλικά. Δυστυχώς τα ανόργανα υλικά στην πλειοψηφία τους είναι διαβρωτικά, οι παραφίνες όμως όχι. Η διαβρωτικότητα ενός ΥΑΦ μπορεί σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές θερμοκρασίας και φάσης, σε βάθος χρόνου (όχι υποχρεωτικά μεγάλο) να καταστρέψει τη συσκευασία του ΥΑΦ και κατ' επέκταση το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας.

Σε πολλές θερμικές εφαρμογές με ΥΑΦ ο γραφίτης χρησιμοποιείται για την βελτίωση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας. Παρ' όλ' αυτά ενισχύει και το φαινόμενο της οξειδωσης, όπου και όταν αυτό εμφανίζεται.

Ακολουθούν τρεις φωτογραφίες οι οποίες αποδίδουν χαρακτηριστικά τις διαστάσεις του φαινομένου και το πόσο σημαντικό είναι το εν λόγω πρόβλημα να αντιμετωπίζεται εξ' αρχής, διότι είναι δυνατόν να αχρηστεύσει εντελώς το θερμικό σύστημα στο οποίο χρησιμοποιείται το διαβρωτικό ΥΑΦ. Παρουσιάζεται ένα κομμάτι αλουμινίου, το οποίο έχει οξειδωθεί λόγω συνεργασίας με διαβρωτικό ΥΑΦ (πριν τη χρήση, σε χρήση χωρίς προσθήκη γραφίτη, με προσθήκη γραφίτη).[9-12]



**ΣΧΗΜΑ 3.10:** Εμφάνιση διαβρωτικών φαινομένων στο υλικό της συσκευασίας λόγω συνεργασίας με ένυδρο άλας.

### **3.3.4. Φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων**

Η συμπεριφορά κατά την αλλαγή φάσης στα ένυδρα άλατα είναι μακράν πιο περίπλοκη απ' ό τι στα οργανικά ΥΑΦ, γιατί το υλικό περνά στάδια ενυδάτωσης και αφυδάτωσης, και όχι απλά τις φάσεις της τήξης και της στερεοποίησης.

Τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν τρεις κύριους τύπους συμπεριφοράς κατά τη μετάβασή τους από τη μία φάση σε κάποια άλλη: τον ομοιόμορφο, τον ανομοιόμορφο και τον ημι-ομοιόμορφο. Η επιθυμητή συμπεριφορά είναι αυτή του ομοιόμορφου τρόπου τήξης, ο οποίος λαμβάνει χώρα όταν η σύσταση της στερεάς φάσης είναι ίδια με τη σύσταση της υγρής. Η ημι-ομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν το ΥΑΦ έχει δύο ή περισσότερες ένυδρες μορφές με διαφορετικές συστάσεις στερεού μέρους και διαφορετικά σημεία τήξης. Η ανομοιόμορφη τήξη λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που κατά την τήξη του ΥΑΦ εμφανίζονται δύο ξεχωριστές φάσεις: ένα κορεσμένο διάλυμα και ένα ίζημα αδιάλυτης άνυδρης ουσίας.

Η μεγάλη θερμοαποθηκευτική ικανότητα των ένυδρων αλάτων είναι δύσκολο να διατηρηθεί και συνήθως μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών. Κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός ανύδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα λόγω του ότι τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος (ανομοιόμορφη τήξη), δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συχνή εξασθένηση των ιδιοτήτων τους.

Προφανώς, λόγω της διαφοράς πυκνότητας των δύο αυτών φάσεων, η στερεή φάση κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου αποθήκευσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποσύνθεση του υλικού (ή διαχωρισμός των φάσεων).[9-12]

### 3.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατηγοριών ΥΑΦ

Συγκεντρωτικά για τις δύο βασικές κατηγορίες ΥΑΦ παρατίθενται τα σημαντικότερα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα της κάθε κατηγορίας. Σημειώνεται εδώ ότι κάθε εφαρμογή στην οποία προσπαθείται η εισαγωγή ΥΑΦ, έχει ξεχωριστές παραμέτρους και ιδιαιτερότητες, οπότε τα ακόλουθα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έχουν διαφορετική βαρύτητα από εφαρμογή σε εφαρμογή. Επομένως η παρακάτω παράθεση χαρακτηριστικών έχει εγκυκλοπαιδικό κυρίως χαρακτήρα.

#### Οργανικά ΥΑΦ

Πλεονεκτήματα:

- Μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά
- Μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού
- Μικρής τάξης ή καθόλου εμφάνιση του φαινομένου supercooling
- Χημική και θερμική σταθερότητα
- Χαμηλό κόστος αγοράς σχετικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες ΥΑΦ
- Παραγωγή υλικών σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές (σκόνη, κόκκοι, πλάκες)

Μειονεκτήματα:

- Λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης χαμηλότερη από τα ανόργανα
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας χαμηλότερος από τα ανόργανα
- Αναφλέξιμα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (200 °C)
- Πυκνότητα χαμηλότερη από τα ανόργανα

#### Ανόργανα ΥΑΦ

Πλεονεκτήματα:

- Μεγαλύτερη τιμή λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης (σε σύγκριση με τα οργανικά)
- Μη αναφλέξιμα
- Πυκνότητα υψηλότερη από τα οργανικά

Μειονεκτήματα:

- Διαβρωτικά (απαραίτητη αποθήκευση υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία)
- Εμφάνιση supercooling
- Διαχωρισμός των φάσεων (μεταβλητή τιμή διαλυτότητας με τη θερμοκρασία), δυνατή δημιουργία ιζήματος
- Αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση
- Αρκετά μεγαλύτερο κόστος αγοράς από τα οργανικά
- Υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία



## 4. Πειραματικά δεδομένα

### 4.1. Μέτρηση των ιδιοτήτων ενός ΥΑΦ

Ο υπολογισμός των ιδιοτήτων ενός ΥΑΦ είναι εξαιρετικής σημασίας ζήτημα για την επιλογή του κατάλληλου υλικού για κάθε εφαρμογή.

Οι κυριότερες ιδιότητες του υλικού που πρέπει να εξετάζονται είναι:

- Σημείο τήξης
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
- Λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης-στερεοποίησης
- Βαθμός supercooling
- Βαθμός διαχωρισμού των φάσεων
- Βαθμός διάβρωσης σε διάφορα «κοινά» υλικά

Οι ιδιότητες των ΥΑΦ εξετάζονται με δύο μεθόδους:

- Με μεθόδους με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε περιορισμένο χρονικό διάστημα και για ένα μόνο κύκλο φόρτισης του υλικού.
- Με μεθόδους με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε μεγάλο χρονικό διάστημα και για πολλούς κύκλους φόρτισης του υλικού.

Οι συνηθέστερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του σημείου τήξης, της λανθάνουσας θερμότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας, είναι:

- Συμβατική θερμιδομετρική μέθοδος (Conventional Calorimetry Method)
- Ψηφιακό Θερμιδόμετρο (Differential Scanning Calorimetry - DSC)
- Διαφορική θερμική ανάλυση (Differential Thermal Analysis - DTA)

Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η ακρίβεια των μετρούμενων μεγεθών, ενώ τα μειονεκτήματα συνοψίζονται στα εξής:

- Το δείγμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ μικρό, γεγονός που είναι αντίθετο με τη γνώση ότι ορισμένες ιδιότητες των ΥΑΦ επηρεάζονται από το μέγεθος του δείγματος ή από το αν το ΥΑΦ είναι συσκευασμένο ή όχι. Επιπλέον αν το υλικό είναι μη ομογενές είναι δύσκολη έως αδύνατη η επιλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος .
- Σε μία μέτρηση δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα πολλά δείγματα αλλά θα πρέπει να επαναλαμβάνεται το πείραμα για κάθε καινούριο δείγμα.
- Ο εξοπλισμός που απαιτείται για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και των μετρήσεων είναι πολύπλοκος και πολυδάπανος.[19]

### 4.2. Ψηφιακό Θερμιδόμετρο (DSC):

Το Θερμιδόμετρο Διαφορικής Ανάλυσης (DSC) είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών των ΥΑΦ.

Μπορεί να αποδώσει γραφήματα θερμορροής-θερμοκρασίας, με την παρακάτω διαδικασία:

Γνωστή ποσότητα μάζας ΥΑΦ τοποθετείται σε κλειστό δοχείο με γνωστό όγκο. Αυτό το δοχείο, όπως και άλλο ένα ίδιο, άδειο, τοποθετούνται μέσα στο DSC. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται με γνωστό και σταθερό ρυθμό, μετράται πόσο περισσότερη θερμότητα απαιτεί το υπό μελέτη δοχείο ώστε να διατηρεί τη

θερμοκρασία του σταθερή και ίδια με του άδειου δοχείου. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει συνεχώς, σε κάποιο σημείο θα φτάσει τη θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ.

Η μετάβαση στην υγρή φάση είναι μία ενδόθερμη διαδικασία, δηλαδή απαιτείται απορρόφηση θερμότητας από το ΥΑΦ, και στο προαναφερθέν γράφημα εμφανίζεται ως τοπικό ακρότατο, δείχνοντας ότι απαιτείται πρόσθετη θερμότητα για την τήξη του υλικού, σε σύγκριση πάντα με το άδειο δοχείο.

Η στερεοποίηση του ΥΑΦ συμβαίνει όταν το υλικό ψύχεται με σταθερό ρυθμό, και εμφανίζεται επίσης σαν τοπικό ακρότατο στο παραπάνω διάγραμμα. Η στερεοποίηση είναι εξώθερμη διαδικασία.

Οι λανθάνουσες θερμότητες τήξης και στερεοποίησης προσδιορίζονται ποσοτικά από το εμβαδό του γραφήματος στα δύο ακρότατα αντίστοιχα, και το αποτέλεσμα δίνεται από τη διαίρεση του εμβαδού αυτού δια του γινομένου του ρυθμού θέρμανσης (ψύξης) επί τη μάζα του δείγματος. Η διαφορά της θερμοκρασίας στο ακρότατο με την αντίστοιχη θεωρητική θερμοκρασία αλλαγής φάσης, δίνει το βαθμό της υπέρψυξης. Παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν της μετρήσεις της μεθόδου, είναι :

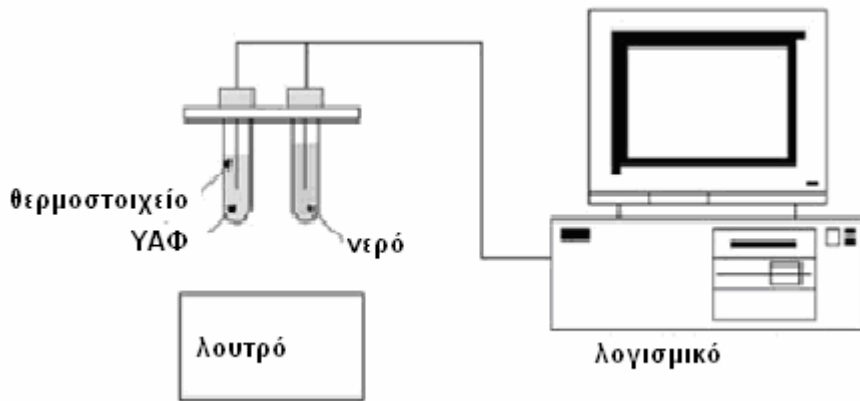
- Λανθασμένη τοποθέτηση του δείγματος στην πλατφόρμα του DSC
- Μή καθαρότητα και μη ικανή ποσότητα μάζας υλικού.
- Ρυθμός θέρμανσης.

Ένας γρήγορος ρυθμός θέρμανσης μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα λαμβανόμενα αποτελέσματα και να έχει σαν αποτέλεσμα να μην αποδοθούν σωστά οι ιδιότητες του μελετούμενου υλικού.

Ο πρωταρχικός σχεδιασμός της συσκευής αυτής δεν αναφερόταν στα ΥΑΦ. Η χρήση του ψηφιακού θερμιδομέτρου για τη θερμική ανάλυση των ΥΑΦ τίθεται υπό αμφισβήτηση γιατί κυρίως αδυνατεί να παρέξει χρήσιμες πληροφορίες για το φαινόμενο της υπέρψυξης. Η λανθάνουσα θερμότητα και το σημείο τήξης προσδιορίζονται καλύτερα με τη μέθοδο της θερμικής ανάλυσης. Με βάση την επιτυχημένη εφαρμογή των ένυδρων αλάτων σαν ΥΑΦ σε εμπορικές εφαρμογές, η αποτυχία στην επίτευξη σταθερότητας στις μετρήσεις με ψηφιακό θερμιδόμετρο, κατέστησε ύποπτη την ίδια τη μέθοδο. Στη μέθοδο του ψηφιακού θερμιδομέτρου οι θερμοκρασιακές αλλαγές είναι πολύ γρήγορες και το δείγμα πολύ μικρό, για να μπορεί να συσχετιστεί καλά με τις συνθήκες που επικρατούν στην πράξη. Επίσης, η θέση του αισθητήρα θερμοκρασίας στο ψηφιακό θερμιδόμετρο είναι επίσης θέμα προς εξέταση.[20]

### **4.3. Μέθοδος t-history**

Μία μέθοδος μετρήσεων που χρησιμοποιείται επιτυχώς είναι η μέθοδος t-history, η οποία προτάθηκε από τους Zhang Yinping και Jiang Li. Για την εφαρμογή της μεθόδου, αναμένονται θετικά αποτελέσματα, μόνο στις περιπτώσεις όπου ο αριθμός Biot είναι μικρότερος του 0.1, περιορισμός που τίθεται εξ αιτίας της υπόθεσης μιας ομοιόμορφης θερμοκρασίας του ΥΑΦ σε έναν σωλήνα δοκιμής κατά την αποφόρτιση. Η απλή πειραματική διάταξη της μεθόδου t-history, απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα καθώς και οι σωλήνες των δοκιμών.

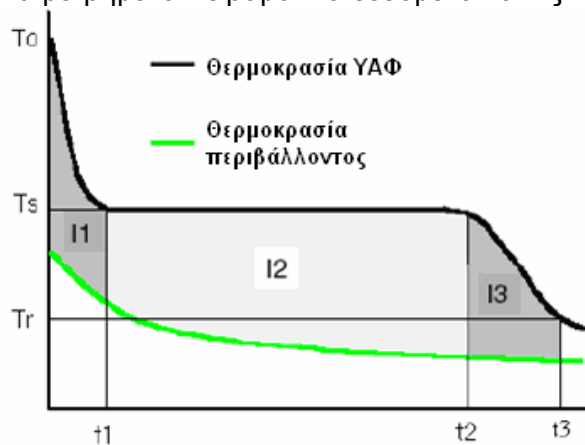


**ΣΧΗΜΑ 4.1:** Εργαστηριακή διάταξη t-history

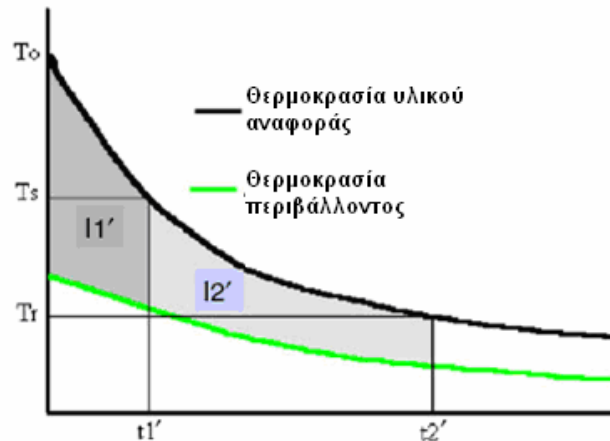


**ΣΧΗΜΑ 4.2:** Σωλήνες που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο t-history

Οι σωλήνες δοκιμής γεμίζονται αντίστοιχα με το ΥΑΦ και με το υλικό αναφοράς (συνήθως χρησιμοποιείται καθαρό νερό) του οποίου οι θερμοκρασίες παραμένουν αρχικά ίδιες και μεγαλύτερες από τη χαμηλή θερμοκρασία του ΥΑΦ. Το πείραμα της μεθόδου t-history είναι πολύ απλό. Οι σωλήνες δοκιμής παραμένουν αρχικά κάθετα σε ένα λουτρό σταθερής θερμοκρασίας, και ξαφνικά εκτίθενται στην ατμόσφαιρα. Οι θερμοκρασίες στους σωλήνες δοκιμής και την ατμόσφαιρα αρχίζουν ταυτόχρονα να μετρώνται. Οι δύο καμπύλες t-history, που εμφανίζουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας, λαμβάνονται για το ΥΑΦ και για το υλικό αναφοράς. Οι θερμικές ιδιότητες όπως η θερμότητα τήξης και η ειδική θερμοχωρητικότητα, μπορούν να υπολογιστούν από τα μετρημένα πειραματικά δεδομένα και τις καμπύλες αυτές.



**ΣΧΗΜΑ 4.3:** Ενδεικτική καμπύλη εξεταζόμενου υλικού (χωρίς υπέρψυξη)



**ΣΧΗΜΑ 4.4:** Ενδεικτική καμπύλη υλικού αναφοράς(νερό)

Το πρώτο κρίσιμο πρόβλημα στη μέθοδο t-history, είναι στην αντιμετώπιση του φαινομένου supercooling. Πρέπει αρχικά να οριστεί το σημείο απελευθέρωσης του supercooling ως το ένα άκρο της περιόδου αλλαγής φάσης. Ο βαθμός εμφάνισης του supercooling ποικίλλει και σχετίζεται με όρους όπως η ταχύτητα, η καθαρότητα και είναι απολύτως ανεξάρτητος από το τέλος της αλλαγής φάσης. Η τροποποιημένη μέθοδος t-history, χρησιμοποιεί ένα σημείο καμπής ως όριο μεταξύ των περιόδων αλλαγής φάσης και μεταφοράς αισθητής θερμότητας, το σημείο όπου η πρώτη παράγωγος της καμπύλης t-history για το ΥΑΦ γίνεται ελάχιστη. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, ή μειώνεται βαθμιαία κατά τη λανθάνουσα απελευθέρωση θερμότητας, ενώ μειώνεται εκθετικά στη διαδικασία ψύξης που συνοδεύει την αισθητή θερμότητα μόνο. Βέβαια, το σημείο καμπής που χρησιμοποιήθηκε ως όριο μεταξύ των περιόδων λανθάνουσας και στερεάς κατάστασης αισθητής θερμότητας, δεν είναι πάντα εύκολο να επιλεγεί.

Άσχετα από τον βαθμό εμφάνισης του φαινομένου του supercooling, η θερμοκρασία τήξης που λαμβάνεται με την τροποποιημένη μέθοδο t-history συμφωνεί με αυτήν από DSC, όπως έχει διαπιστωθεί σε πολλές πειραματικές διαφορές. Στη μέθοδο αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μετρηθεί επακριβώς η λανθάνουσα θερμότητα που απορροφά ο δοκιμαστικός σωλήνας με το ΥΑΦ.

Άλλα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απλότητα και το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού, το –συγκριτικά με προηγούμενες μεθόδους- μεγάλο μέγεθος του δείγματος, η ταυτόχρονη μέτρηση πολλών δειγμάτων σε ένα πείραμα καθώς και η οπτική παρατήρηση του φαινομένου. Το μειονέκτημά της είναι ότι το σφάλμα των μετρήσεων επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την προσεκτική κατασκευή της διάταξης και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, καθώς και από τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.[21,22]

## 5. Συσκευασία ΥΑΦ

Η χρήση των ΥΑΦ τις περισσότερες φορές απαιτεί την προστασία του υλικού σε κάποιο από τα είδη διαθέσιμης συσκευασίας (τοποθέτηση σε κάψουλες ή σακούλες, ενσωμάτωση στο πορώδες υλικό άλλων υλικών, εναλλάκτες θερμότητας ενισχυμένοι με ΥΑΦ) ώστε να προφυλαχθεί το υλικό από την επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος ή και να διευκολύνει τη μετάδοση της αποθηκευμένης λανθάνουσας θερμότητας.



**ΣΧΗΜΑ 5.1:** Ευρύτατα διαδεδομένος τρόπος συσκευασίας ΥΑΦ, για πολλών ειδών υλικά και πλήθος διαφορετικών εφαρμογών: (α) συσκευασία ΥΑΦ, (β) τομή συσκευασίας, (γ) λεπτομέρεια

Τα κύρια πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης των ΥΑΦ σε κάψουλες ή μικροκάψουλες (σφαιρίδια διαμέτρου μικρότερης του 1mm) είναι ότι εξασφαλίζεται μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, ελαχιστοποιείται η αλληλεπίδραση του περιβάλλοντος με το ίδιο το ΥΑΦ, και η αλληλεπίδραση του ΥΑΦ με το υλικό του δοχείου, αφού γίνεται εκτεταμένος έλεγχος μεταβολής όγκου κατά την αλλαγή φάσης. Το υλικό που συνήθως χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των ΥΑΦ σε προστατευτικό κέλυφος είναι πλαστικό ή συνθετικές ρητίνες.

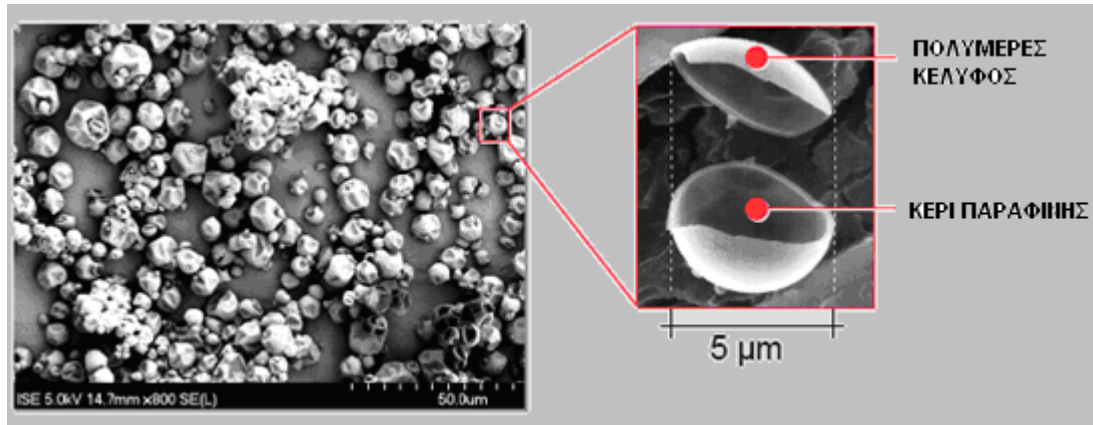
Η τοποθέτηση σε κάψουλες, επιφέρει την επιθυμητή μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής που βελτιώνει τις συνθήκες μεταφοράς θερμότητας. Επίσης, οι κάψουλες βελτιώνουν τη θερμική συμπεριφορά του συστήματος με τα ΥΑΦ, καθώς εμποδίζει την ανάπτυξη του στέρεου τοιχώματος στην εσωτερική επιφάνεια μεταφοράς, φαινόμενο το οποίο είναι υπεύθυνο για την ανεπιθύμητη μείωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Τα ΥΑΦ που χρησιμοποιούνται ενσωματωμένα σε κάψουλες, πρέπει να είναι συμβατά με το υλικό της κάψουλας, το οποίο μπορεί να είναι πλαστικό για χαμηλές θερμοκρασίες και μέταλλο ή ειδική μεμβράνη για υψηλές θερμοκρασίες. Η παρουσία του υλικού της κάψουλας μέσα στο χώρο αποθήκευσης θερμότητας, δεν μειώνει πρακτικά την πυκνότητα της αποθηκευμένης ενέργειας, καθώς έχουμε μικρή αναλογία ποσότητας υλικού κάψουλας ανά μάζα ΥΑΦ.

Η τοποθέτηση σε μικροκάψουλες, επιφέρει την επιθυμητή προστασία του ΥΑΦ από τις περιβαλλοντικές δυσμενείς για το ΥΑΦ συνθήκες (π.χ. υγρασία). Η μεγάλη όμως αναλογία μάζας υλικού κάψουλας προς τη μάζα του ΥΑΦ, μειώνει σημαντικά την πυκνότητα της αποθηκευμένης ενέργειας, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα κατά τη χρήση σε μικροκάψουλες, σε συνδυασμό με το αυξημένο κόστος της εφαρμογής. Η χρήση σε μικροκάψουλες σε εφαρμογές των ΥΑΦ, χρησιμοποιείται μόνο όταν οι μικροκάψουλες αποτελέσουν αναγκαία παράμετρο για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Στην περίπτωση των οργανικών ΥΑΦ, θέλουμε κυρίως να επιτύχουμε την αύξηση του συντελεστή αγωγιμότητας καθώς βρίσκεται στην περιοχή του 0,2 W/mK.

Στην περίπτωση των ανόργανων ΥΑΦ, το ενδιαφέρον της συσκευασίας στρέφεται στην προστασία των υλικών που συνεργάζονται με το ΥΑΦ, καθώς αν έρθουν σε επαφή τα υλικά αυτά θα διαβρωθούν και θα αλληλεπιδράσουν αρνητικά για τη συνολική εγκατάσταση.



**ΣΧΗΜΑ 5.2:** Ηλεκτρονική μικρογραφία ΥΑΦ σε μικροκάψουλα

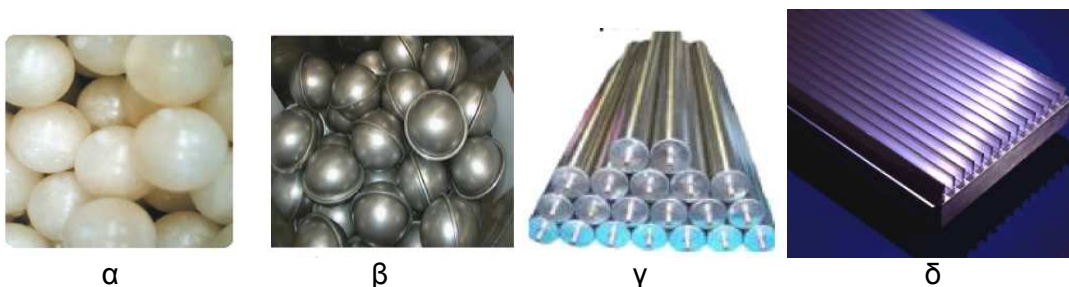
Για να επιτύχουμε αύξηση του συντελεστή αγωγιμότητας, ενσωματώνουμε τα ΥΑΦ σε κάψουλες, ή μικροκάψουλες (συνήθως από πλαστικό ή ρητίνες), για να εξασφαλίσουμε μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της τοποθέτησης των ΥΑΦ σε κάψουλες, είναι η ελαχιστοποίηση της αλληλεπίδρασης του περιβάλλοντος αλλά και των υλικών των δοχείων αποθήκευσης. Το μεγάλο πλεονέκτημα της συσκευασίας σε κάψουλες, είναι ο πλήρης έλεγχος της αλλαγής όγκου κατά την αλλαγή φάσης.

Επίσης, θα πρέπει για να έχουμε επιτυχή ενσωμάτωση να έχουμε περιορισμένη έως και μηδενική «μετανάστευση» του ΥΑΦ από το πορώδες του υλικού, όταν το ΥΑΦ βρίσκεται στην υγρή κατάσταση.

Η χρήση σφαιριδίων ενισχυμένων με ΥΑΦ, είναι ευρέως διαδεδομένη, καθώς αποφεύγεται ο σχηματισμός κοιλοτήτων εντός του υλικού ή ακόμα και η μερική αποκόλληση το υλικού από την επιφάνεια συναλλαγής κατά την αλλαγή φάσης (αύξηση ή μείωση του όγκου περίπου στο 10%), γεγονός που θα έριχνε σημαντικά την τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Η ενσωμάτωση του υλικού στο πορώδες άλλου υλικού αποτελεί τη βάση του σύνθετου τελικού προϊόντος. Σε αυτήν την περίπτωση σημαντικό κριτήριο για την επιτυχημένη ενσωμάτωση είναι η μη αλληλεπίδραση του ΥΑΦ με το υλικό και η περιορισμένη έως μηδενική απώλειά του από το πορώδες όταν το ΥΑΦ βρίσκεται στην υγρή φάση.[23-26]



**ΣΧΗΜΑ 5.3:** Εμπορικές συσκευασίες ΥΑΦ: (α) σε σφαιρίδια πολυολεφίνης, (β) σε μεταλλικά σφαιρίδια, (γ) σε μεταλλικούς σωλήνες, (δ) σε πλαίσια αλουμινίου εφοδιασμένα με πτερύγια

## **6. Ιστορική αναδρομή εφαρμογών**

Στην παρούσα παράγραφο επιχειρείται μία σύντομη ιστορική αναδρομή των κυριότερων εφαρμογών με ΥΑΦ, οι οποίες είτε ήταν πρωτοποριακές ή απόλυτα επιτυχημένες ή και τα δύο. Οι εφαρμογές παρουσιάζονται ανάλογα με τη χώρα στην οποία εμφανίστηκαν και έχει δοθεί βάρος στις εφαρμογές του κτιριακού τομέα.

### **6.1. Εισαγωγή**

Η χρήση ΥΑΦ για αποθήκευση θερμότητας είναι γνωστή και εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια. Η χρήση του πάγου για τη διατήρηση των τροφίμων είναι σχεδόν αρχαία. Η χρήση λοιπόν του πάγου σαν ΥΑΦ είναι η πρώτη χρήση τέτοιων συστημάτων. Τα ιγκλού (σπίτια από πάγο) κατασκευάζονταν χρησιμοποιώντας μεγάλα κομμάτια πάγου από την παγωμένη επιφάνεια ποταμών, τα οποία μετά αποθηκεύονταν σε πριονίδι για μετέπειτα χρήση κατά την περίοδο της Άνοιξης.

Η βιομηχανία τροφίμων πέρα από τον πάγο μετέπειτα χρησιμοποίησε και άλλες μεθόδους για τη διατήρηση των τροφίμων σε επιθυμητή θερμοκρασία. Για παράδειγμα, κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση τροφίμων, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά δοχεία μεγάλου πλάτους και μικρού αντίστοιχα πάχους, γεμάτα με στερεοποιημένα μίγματα αλάτων, τα οποία άλλαζαν φάση κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση του τροφίμου, απορροφώντας θερμότητα και διατηρώντας το εσωτερικό στην επιθυμητή θερμοκρασία.

Τα ίδια υλικά χρησιμοποιήθηκαν και στη βιομηχανία φαρμάκων, σε πλαστικά δοχεία, ώστε να διατηρούν τα θερμοκρασιακά επίπεδα χημικών και φαρμάκων, κατά τη μεταφορά ή την αποθήκευσή τους. Το βασικό ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε σε τέτοιες εφαρμογές, ήταν κάποιο μίγμα ανόργανων αλάτων, όπως Θειικό Νάτριο, Θειικό Μαγνήσιο, Θειικό Κάλιο, Θειικό Αμμώνιο, Θειικό Ασβέστιο και κάποια χλωρίδια του Μαγνησίου.

Από τη στιγμή που η επιστημονική κοινότητα κατάλαβε τις προοπτικές των ΥΑΦ, ξεκίνησε να διεξάγει μελέτες και πειράματα για την εύρεση και ανάπτυξη όλο και καλύτερων ΥΑΦ, με διάφορα σημεία τήξης και υψηλές θερμότητες υγροποίησης.

Σε πρώτη φάση το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στους μεμονωμένους χρήστες των συστημάτων αυτών και όχι σε τεχνολογικώς ανεπτυγμένα θερμικά συστήματα. Μερικά δείγματα δουλειάς, ήταν κάποια συστήματα, τα οποία προορίζονταν για εστιατόρες και ξενοδόχους και ήταν σχεδιασμένα να διατηρούν τα ζεστά πιάτα σε ικανοποιητική θερμοκρασία όση ώρα διαρκούσε το σερβίρισμα.

Άλλες εφαρμογές ήταν προϊόντα για τη διατήρηση ζεστών ροφημάτων, αλλά η εφεύρεση του "Θερμός" ήταν πολύ αποτελεσματική, οπότε αυτό το προϊόν δεν έτυχε απήχησης, και διάφορα προϊόντα σε ρούχα διαβίωσης (ρούχα για ακραίες συνθήκες).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 διατέθηκε στην αγορά ένα φαρμακευτικό προϊόν, μία θερμαντική ζώνη που προοριζόταν για θεραπευτικούς σκοπούς, το οποίο βασιζόταν στη θερμική συμπεριφορά του Βορικού Θείου.

Το πρώτο προϊόν το οποίο αναπτύχθηκε για θεραπευτικό σκοπό ήταν μία συσκευασία παροχής ψύξης, ονομαζόταν γενικά "cool pack" και αναπτύχθηκε από αθλίατρος σε συνεργασία με νοσοκομειακές μονάδες και η κύρια χρήση του ήταν να περιορίζει το μωλώπισμα σε περίπτωση τραυματισμού. Το προϊόν αποτελείται από μία σακούλα που λειτουργεί σαν εξωτερική συσκευασία, η οποία είναι εσωτερικά χωρισμένη σε δύο τμήματα. Το ένα και μεγαλύτερο περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο έχει σταθεροποιηθεί σε υπέρψυκτη κατάσταση. Το άλλο τμήμα περιέχει έναν παράγοντα πυρηνοποίησης, κάποιου είδους πηκτικό δηλαδή. Μια απότομη κίνηση καταστρέφει το διαχωριστικό εντός της συσκευασίας και επιτρέπει την ανάμιξη

των δύο υλικών, με αποτέλεσμα το ΥΑΦ να σταθεροποιείται, απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη θερμότητα.

Κατ' αντιστοιχία αναπτύχθηκαν άλλα πακέτα με υλικά υψηλότερου σημείου τήξης για παραγωγή υψηλότερης θερμοκρασίας για ιατρικές εφαρμογές όπου ζητούμενο είναι να θερμανθεί η πληγείσα περιοχή. Τα λεγόμενα "hot packs" βρήκαν εφαρμογή και σε στρατιωτικά πακέτα εξοπλισμού επιβίωσης, όπως και σε ειδικά ενδύματα για συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας.

Η εξέλιξη των προϊόντων ήταν φυσική εξέλιξη λόγω της τεχνολογικής πρόοδου και διατέθηκαν στην αγορά πολλά ακόμη προϊόντα επιβίωσης, χρησιμοποιώντας διαφορετικά ΥΑΦ με μεγάλη ποικιλία σημείων τήξης.[27,28]

## **6.2. ΗΠΑ**

### **6.2.1. NASA**

Αναγνωρίζοντας τις προοπτικές που δίνονται από την αποθηκευτική ικανότητα των ΥΑΦ, όπως επίσης και στην ικανότητά τους να ελαττώνουν τα θερμικά φορτία, η NASA περιέλαβε τα ΥΑΦ και διάφορες εφαρμογές τους στο διαστημικό της πρόγραμμα. Αυτό που ενδιέφερε περισσότερο από όλα τους επιστήμονες εκεί, ήταν η δυνατότητα διατήρησης σταθερών θερμοκρασιακών συνθηκών.

Οι πρώτες εφαρμογές των ΥΑΦ ήταν στην αποστολή Apollo 15, όπου χρησιμοποιήθηκαν σε επένδυση χώρου για να απορροφούν την επιπλέον θερμότητα που εκλυόταν από τα ηλεκτρονικά συστήματα, ώστε να μειώνεται η χρήση των κλιματιστικών συσκευών για το ίδιο έργο. Επίσης στην ίδια αποστολή χρησιμοποιήθηκαν ΥΑΦ σε κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών που ήταν εγκατεστημένο στη διαστημάκατο.[29,30]

### **6.2.2. ΥΑΦ για ψύξη-θέρμανση κτιρίων**

Παρ' όλο που η πρόοδος στη μελέτη και εφαρμογή των υλικών αυτών ήταν σε προχωρημένα στάδια, είχαν γίνει ελάχιστα βήματα για τη χρήση αυτών των υλικών σε σπίτια και στην ουσιαστική συμβολή τους στη θερμική συμπεριφορά των τελευταίων.

Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν μόλις από τη δεκαετία του 1920, ενώ κάποιες πειραματικές κατασκευές σπιτιών για πειράματα μεγάλης κλίμακας παρατηρήθηκαν από το 1940 έως το 1970. Παρ' ότι τα συστήματα αυτά θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν επιτυχημένα, δεν υπήρξε περαιτέρω εξέλιξη ή μελέτη, αφού δεν υπήρξε σημαντική χρηματοδότηση, λόγω κυρίως έλλειψης πίστης στην επιτυχία του όλου εγχειρήματος.

Ακολουθεί ιστορική ανασκόπηση των σημαντικότερων πρώιμων εφαρμογών των ΥΑΦ, σαν ένα δείγμα της εξελικτικής πορείας των συστημάτων. [27,28]

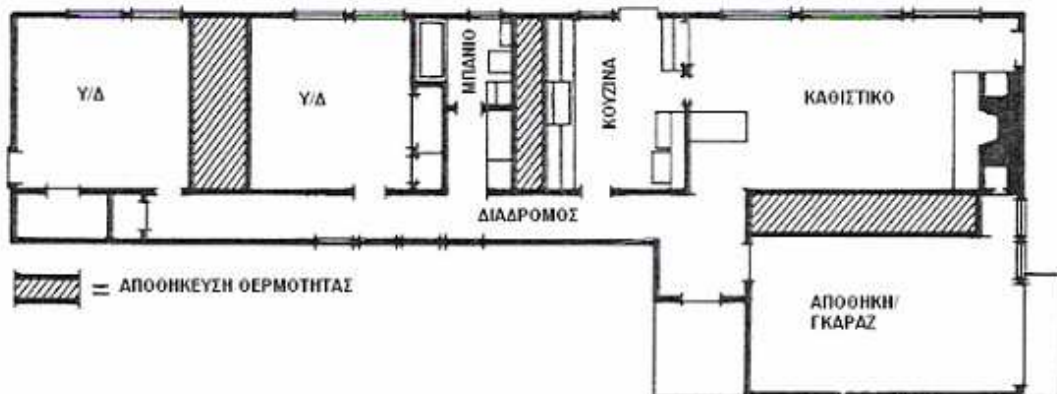
### **6.2.3. Δρ. Maria Telkes**

Ήταν η πρώτη που αποφάσισε να ασχοληθεί με την εφαρμογή των ΥΑΦ σε κτίρια. Το 1948 κατασκευάστηκε το πρώτο μεγάλης κλίμακας πείραμά της, στην περιοχή Dover Mass, στη Βοστώνη των ΗΠΑ. Η περιοχή επελέγη από την Telkes για τα ετήσια επίπεδα ηλιοφάνειας, που για την περιοχή ήταν πάνω από τις μέσες τιμές, πράγμα που εξασφάλιζε τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του ηλιακού συστήματος.

Ήταν ένα σπίτι ενός ορόφου, πέντε δωματίων εκ των οποίων δύο υπνοδωμάτια, επιφάνειας 135 m<sup>2</sup>. Η ηλιακή ακτινοβολία παρείχε θερμότητα μέσω 28



ηλιακών συλλεκτών, θερμότητα η οποία μετά μέσω ανεμιστήρων οδηγείτο σε τρία δοχεία αποθήκευσης θερμότητας.



**ΣΧΗΜΑ 6.1:** Κάτοψη σπιτιού Telkes

Τα δοχεία χρησιμοποιούσαν σαν ΥΑΦ το άλας του Glauber. Συνολικά περιλαμβάνονταν 21 τόνοι ΥΑΦ, συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 11MJ και σημείου τήξης 32 βαθμών Κελσίου.

Με τα οικονομικά δεδομένα της εποχής ήταν μία ακριβή κατασκευή, κοστίζοντας 20000 δολάρια, από τις οποίες οι 3000 δολάρια αναφέρονταν στο θερμαντικό σύστημα (συνολικό ποσοστό κόστους 15%).

Τα πρώτα δύο έτη λειτουργίας το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό ακόμα και σε περιόδους με επτά ημέρες συνεχόμενης συννεφιάς. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία παρέχοντας ένα άνετο περιβάλλον γύρω στους 21°C, χωρίς να χρειαστεί οποιοδήποτε βοηθητικό σύστημα θέρμανσης.

Τον τρίτο χρόνο όμως, το σύστημα άρχισε να εμφανίζει σοβαρά προβλήματα, καθώς το άλας του Glauber είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ιδιότητα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι τα δοχεία αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται δραματικά οι απώλειες του συστήματος. [27,28]

#### **6.2.4. Lawrence Gardshire**

Το 1953 ο Lawrence Gardshire κατασκεύασε ένα ηλιακό σπίτι με ΥΑΦ στη περιοχή του New Mexico. Το κτίριο ήταν διώροφο και κάθε όροφος είχε επιφάνεια 102 m<sup>2</sup>. Και ο Gardshire, όπως η Telkes χρησιμοποίησε «δοχεία» αποθήκευσης με ΥΑΦ χωρητικότητας 1.9 m<sup>3</sup>, μόνο που αντί να τα εγκαταστήσει ανάμεσα στα δωμάτια όπως η Telkes, τα εγκατέστησε στη στέγη δίπλα στους ηλιακούς συλλέκτες.

Η καινοτομία ήταν ότι πρόσθεσε διφθορικό νάτριο στο άλας του Glauber σαν πηκτικό παράγοντα, ώστε να βοηθά στην στερεοποίηση του αλάτος και να αποφύγει κατά το δυνατόν-το διαχωρισμό.

Δυστυχώς και αυτή η κατασκευή αντιμετώπισε τα ίδια προβλήματα με την κατασκευή της Telkes, πιο καθυστερημένα βέβαια, λόγω αύξησης του χρόνου ζωής του ΥΑΦ, λόγω της προσθήκης του πηκτικού παράγοντα. [27,28]

#### **6.2.5. Δρ.J.W.Hodgins και Δρ.T.W.Hoffman**

Την επόμενη προσπάθεια για ένα ηλιακό σπίτι με ΥΑΦ την έκαναν το 1959 οι J.Hodgins και T.Hoffman στον Καναδά. Το κτίριο ήταν δύο ορόφων, επιφάνειας

111m<sup>2</sup>. Το σχεδιασμό της αποθήκευσης ενέργειας τον ανέλαβε η M.Telkes λόγω της προηγούμενης εμπειρίας της. Και σε αυτή τη περίπτωση η Telkes χρησιμοποίησε ως υλικό αλλαγής φάσης το άλας του Glauber (ένυδρο άλας, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 10H<sub>2</sub>O, σημείο τήξης τους 32°C).



**ΣΧΗΜΑ 6.2:** Το σπίτι που σχεδίασε η Telkes για τους Hodgins και Hoffman

Για να ξεπεραστούν τα προηγούμενα προβλήματα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας εκτός από 12 τόνους ΥΑΦ που περιελάμβανε, ήταν εμπλουτισμένο με πυριτικό άλας νατρίου και χρώμιο, ουσία που εμποδίζει τη διάβρωση. Τα ΥΑΦ ήταν ενσωματωμένα σε κυλινδρικά δοχεία χάλυβα, διαμέτρου 0.1 m και ύψους 0.6 m, τα οποία ήταν τοποθετημένα κάθετα στους τοίχους.

Παρόλο που τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, οι προσπάθειες δεν συνεχίστηκαν από αυτή την ομάδα επιστημόνων. [27,28]

### **6.2.6. Ερευνητική δραστηριότητα**

Το πρώτο μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα έλαβε χώρα στο πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνια το 1971. Σε αυτό συμμετείχαν οι S.Freedman, M.Telkes, M.Altman. Ο ερευνητικός σκοπός ήταν να ανακαλυφθεί αριθμός ΥΑΦ κατάλληλων για ψυκτικές και θερμαντικές εφαρμογές, με ενδελεχή ανάλυση παράπλευρων παραγόντων, όπως τα διάφορα κόστη (κτήσης, εγκατάστασης, συντήρησης), οικονομική ανάλυση επένδυσης και αποθηκευτική ικανότητα υλικού.

Η έρευνα βασίστηκε στις βασικές ομάδες ΥΑΦ:

- Ένυδρα άλατα
- Οργανικά ΥΑΦ
- Ανόργανα ΥΑΦ
- Εύτηκτα μίγματα(οργανικά/ανόργανα)

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> · 6H<sub>2</sub>O (ανόργανο ΥΑΦ) και ορισμένα μίγματα παραφίνης (οργανικό ΥΑΦ) είναι κατάλληλα για εφαρμογές κλιματισμού , ενώ για θέρμανση χώρου τα πιο ελπιδοφόρα ΥΑΦ είναι τα: Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O και Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O.

Η δεκαετία του 1970 ήταν ορόσημο για τα ΥΑΦ και γενικότερα για τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Συγκεκριμένα το 1973 με τον αραβικό αποκλεισμό πετρελαίου εμφανίζεται η πρώτη πετρελαϊκή κρίση. Αυτό ώθησε τις κυβερνήσεις διάφορων χωρών να αναζητήσουν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας. Το πεδίο μεγάλου ενδιαφέροντος ήταν οι τομείς της ηλιακής ενέργειας και της αποδοτικής αποθήκευσης θερμότητας.

Από το σημείο αυτό και μετά η μέθοδοι αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έγιναν σημαντικό κομμάτι του προγράμματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και άρχισαν να επενδύονται σημαντικά κονδύλια στην έρευνα και ανάπτυξη των συστημάτων αυτών. Από το 1973 και μετά ξεκινά η κυβερνητική χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων πάνω στα ΥΑΦ σε χώρες όπως οι Η.Π.Α., η Αγγλία, η Γερμανία και η Γαλλία.

Αποτέλεσμα της ανάγκης για εύρεση ΥΑΦ, στα τέλη της δεκαετίας του 1970, κυβερνητικοί επιστημονικοί οργανισμοί των ΗΠΑ διεξήγαγαν πειράματα ελέγχοντας 20000 διαφορετικά υλικά ως προς τις προοπτικές που έδιναν για χρήση ως ΥΑΦ.

Μόλις το 1% θεωρήθηκε υποψήφιο υλικό και συγκεκριμένα κάποια ένυδρα άλατα με την ιδιότητα της ομογενούς τήξης και συγκεκριμένες κατηγορίες οργανικών υλικών. Η μετέπειτα ερευνητική δραστηριότητα παγκοσμίως απέδειξε ότι όντως αυτά τα υλικά είναι τα πλέον κατάλληλα για τέτοιου είδους εφαρμογές. [27,28]

#### **6.2.6.1. Άλας Glauber**

Η M.Telkes συνέχισε τις έρευνές τις πάνω στα ΥΑΦ και συγκεκριμένα γύρω από το άλας του Glauber και τρόπους επιμήκυνσης του χρόνου ζωής του υλικού. Ένα από τα προβλήματα που εμφάνιζε το υλικό ήταν η ιδιότητά του να διαχωρίζει το άνυδρο θειικό νάτριο, κάτι το οποίο ελάττωνε τη θερμική αποθηκευτική ικανότητα του υλικού, ύστερα από κάποιο αριθμό κύκλων.

Σε δοκιμές που διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας διάφορους πηκτικούς παράγοντες για τη βοήθεια της τήξης του ΥΑΦ, παρατηρήθηκε ότι η διάρκεια ζωής του υλικού όντως αυξήθηκε εντυπωσιακά, παρέμεινε όμως η ελάττωση της αποθηκευτικής ικανότητας ύστερα από κάποιους (περίπου 1000) κύκλους φόρτισης.

Ο S.Marks με τη σειρά του διεξήγαγε σειρές πειραμάτων στο ίδιο αντικείμενο. Χρησιμοποιώντας ένα είδος πηλού για πηκτικό παράγοντα, είχε τα ίδια αποτελέσματα με την Telkes, αύξηση δηλαδή της διάρκειας ζωής του ΥΑΦ, αλλά παρατηρούμενη ελάττωση των θερμικών ιδιοτήτων. Πειράματά του με άλλους πηκτικούς παράγοντες, όπως με ένα πολυμερές του πολυκαρβοξυλικού οξέος, οδήγησαν στην αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας, αλλά επίσης σε ελάττωση του χρόνου ζωής.

Ο P.Rueffel χρησιμοποίησε πλέγμα τύρφης, το οποίο ενσωμάτωσε στο ΥΑΦ. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να είναι τόσο συμβατά τα δύο υλικά που το πλέγμα αυτό τελικά έδρασε σαν ένας άριστος πηκτικός παράγοντας. Περαιτέρω ανάλυση αυτής της ιδέας έδωσε στο μέλλον μίγμα ΥΑΓ και τυπικού τσιμέντου, το οποίο μίγμα ύστερα από 2000 κύκλους δεν εμφάνιζε ελάττωση στις θερμικές ιδιότητές του. Το σύστημα αυτό αποδείχθηκε χημικώς σταθερό και έχει σπουδαίες προοπτικές όσον αφορά στον τομέα της τοιχοποιίας. [27,28]

#### **6.2.6.2. Παραφίνες**

Μόλις η επιστημονική κοινότητα αντιλήφθηκε ότι η αποθηκευτική ικανότητα των παραφινειδών κυμαίνεται σε αρκετά καλά επίπεδα, άρχισε να εξετάζει τις προοπτικές να αποτελέσει η παραφίνη υποψήφιο ΥΑΦ, λόγω του χαμηλού της κόστους σε σχέση με τα υπόλοιπα ΥΑΦ.

Ο J.Bailey επικεντρώθηκε στη μελέτη θερμοσυσσωρευτών με πλέγμα αλουμινίου σε σχήμα κερήθρας στο εσωτερικό με τη χρήση εικοσανίου με σημείο τήξης τους 32°C.

Το 1974 ο T.Galloway πειραματίστηκε πάνω σε κεριά παραφίνης χρησιμοποιώντας τα σε τρεις διαφορετικές μορφές: χύμα ΥΑΦ σε δεξαμενή με πλαστικό πτερύγιο συναλλαγής θερμότητας, ατσάλινα δοχεία γεμάτα με ΥΑΦ σε δεξαμενή με νερό και τρίτο, μεγάλοι δίσκοι με ΥΑΦ επίσης σε δεξαμενή νερού. [27,28]

### **6.3. Υπόλοιπος κόσμος**

Τα ερευνητικά εργαστήρια των ΗΠΑ επικεντρώνονταν στην έρευνα των ανόργανων ΥΑΦ, την ώρα που τα μεγαλύτερα Ευρωπαϊκά ερευνητικά κέντρα βασίζονταν στις προοπτικές των οργανικών ΥΑΦ για τις μελέτες τους.

Ιδιαίτερως σημαντικά ήταν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές τις μελέτες. Οι πλέον δραστήριες χώρες ήταν η (τότε) Δυτική Γερμανία, η (τότε) ΕΣΣΔ, η Αγγλία, η Σουηδία, η Δανία, η Γαλλία και η Ιταλία. Πέραν από την Ευρώπη πολύ σημαντική ερευνητική πρόοδος έκαναν και οι παραδοσιακά πρωτοπόροι σε επιστημονικά θέματα Ιάπωνες.

#### **6.3.1. (Δυτική) Γερμανία**

Η ερευνητική δραστηριότητα στη Γερμανία απέφερε καρπούς, καθώς οι επιστήμονες συνέταξαν αναλυτικά γραφήματα και πίνακες φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων των ΥΑΦ, καθώς και πληροφορίες για ΥΑΦ για τους τομείς της κατασκευής και της μόνωσης. Τα κύρια υλικά που εξετάστηκαν ήταν οι παραφίνες, τα ένυδρα άλατα και κάποια εύηκτα μίγματα για εφαρμογές κάτω των 100°C. Οι δοκιμές περιλάμβαναν τη χρήση των υλικών σε σωλήνες με πτερύγιο.

Μεγάλη επίσης έρευνα εξέταζε τη διαφορετική θερμική συμπεριφορά των ΥΑΦ σε ηλιακό σπίτι, το οποίο θερμαίνεται από μια αντλία θερμότητας με αποθηκευτικό μέσο το νερό. Οι ερευνητές αντικατέστησαν το νερό πρώτα με πάγο και μετά με παραφίνη (σημείο τήξης 18 με 25 °C), για τρία έτη. Αποδείχθηκε ότι η παραφίνη έχει την καλύτερη συμπεριφορά καθώς επίσης ότι αυξάνει το συντελεστή συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας από 2,6 σε 3,3, καθώς επίσης ότι η παραφίνη χρειάζεται το μισό όγκο από αυτόν του νερού γεγονός που δίνει μικρότερο κόστος εγκατάστασης. [27,28]

#### **6.3.2. Γαλλία**

Η Γαλλία είναι μία από τις χώρες που έδειξαν γρήγορα μεγάλο ενδιαφέρον για τις θερμικές προοπτικές των ΥΑΦ και κατασκεύασαν για ερευνητικούς σκοπούς αρκετά κτίρια με ΥΑΦ. Συγκεκριμένα το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην εισαγωγή των ΥΑΦ και κυρίως παραφινών στην τοιχοποιία. [27,28]

#### **6.3.3. Ηνωμένο Βασίλειο**

Η Αγγλία είναι μία από τις χώρες, όπως και η Γερμανία και η Σουηδία που εκτός από την έντονη ερευνητική δραστηριότητα, είναι παραγωγό υλικών ΥΑΦ με συνεχώς αναπτυσσόμενη βιομηχανία.



Από τις σημαντικότερες ερευνητικές προσπάθειες αυτές των A.Bromley, E.McKay και J.Wilkins, οι οποίοι ίδρυσαν ερευνητικό οργανισμό και ασχολήθηκαν διεξοδικά με τη μελέτη της λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας σε θερμικές εφαρμογές και ιδιαίτερα στα συστήματα αποθήκευσης πάγου. [27,28]

#### **6.3.4. Ιαπωνία**

Η Ιαπωνία κατέχει σημαντικό ρόλο στην έρευνα και ανάπτυξη του τομέα των ΥΑΦ, με σειρά ετών ερευνητικής δραστηριότητας και σημαντική κρατική βοήθεια. Η συνισταμένη της έρευνας των Ιαπώνων επιστημόνων είναι η χρήση ΥΑΦ σε συστήματα θέρμανσης και έχουν στο παρελθόν αναπτυχθεί πολλά συστήματα χρησιμοποιώντας υλικά όπως ένυδρα άλατα νιτριδίων, άλατα φθορίου, φωσφορικά άλατα και θειικό ασβέστιο, τα οποία πέρασαν μετέπειτα επιτυχώς στο εμπόριο.

Η ερευνητική δραστηριότητα μέχρι τη δεκαετία του 1970 περιοριζόταν στις εφαρμογές θέρμανσης, ενώ από το σημείο αυτό και μετά αναγνωρίστηκαν και οι προοπτικές σε εφαρμογές ψύξης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 έγιναν εκτεταμένες πειραματικές έρευνες γύρω από την ενσωμάτωση του άλατος του Glauber σε γύψο και άλλα δομικά υλικά. [27,28]

## **7. Εφαρμογές ΥΑΦ**

### **7.1. Εισαγωγή**

Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε λανθάνουσα μορφή είναι αρκετά εκτεταμένες. Τα πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας με μικρότερη διακύμανση κατά την ανάκτησή της με μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά από την πηγή θερμότητας (μέχρι και ισοθερμοκρασιακά). Οι πρακτικές δυσκολίες που ανακύπτουν οφείλονται στη χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, στη μεταβολή της πυκνότητας, στην αξιοπιστία-σταθερότητα των ιδιοτήτων σε μακρόχρονη χρήση καθώς και στο διαχωρισμό των φάσεων με ενδεχόμενη αλλαγή χημικής σύστασης των υλικών και εμφάνιση φαινομένου υπέρψυξης.

Όπως είναι κατανοητό η ελευθερία που δίνει το εύρος θερμοκρασιών που παράγονται τα υλικά δίνει την ευχέρεια εφαρμογής των ΥΑΦ σε πλήθος περιπτώσεων έμμεσης ή άμεσης αποθήκευσης θερμότητας.

Η αποθήκευση θερμότητας είναι ένα πολύ σημαντικό μέσο εξοικονόμησης ενέργειας, βελτιώνοντας την αξιοποίηση της ήδη υπάρχουσας ενέργειας. Μικρής διάρκειας αποθήκευση είναι απαραίτητη σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές, ενώ μελετώνται εγκαταστάσεις μεγάλης αποθήκευσης ενέργειας (εποχιακή αποθήκευση).

Λαμβάνοντας υπ' όψη την περιοδικότητα των ενεργειακών φαινομένων στη φύση, οι εφαρμογές που συνδυάζουν ηλιακά συστήματα θα πρέπει να προβλέπουν επαρκή ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης για την περίσσεια της ενέργειας και την διάθεσή της, τις ώρες μη διάθεσης από την πηγή.

Το ίδιο σκεπτικό επικρατεί και στα συστήματα ανάκτησης θερμότητας όπου οι περίοδοι διαθεσιμότητας περισσευούμενης ενέργειας και ζήτησης συνήθως δεν ταυτίζονται ή ταυτίζονται εν μέρει. Η ίδια παρατήρηση γίνεται και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια του 24ώρου, ιδιαίτερα σε χώρες με ακραίες κλιματολογικές συνθήκες (κρύο ή ζέστη), κυρίως λόγω των οικιακών καταναλωτών για ανάγκες ψύξης ή θέρμανσης. Αυτή η διακύμανση παρουσιάζει συνήθως τις ελάχιστες τιμές της από τα μεσάνυχτα μέχρι νωρίς το πρωί.

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως και το σύστημα διανομής, έχουν σχεδιαστεί και διαστασιολογηθεί για τις περιόδους μέγιστης ζήτησης, οπότε είναι επόμενο να υπολειτουργούν τις νυχτερινές ώρες. Είναι λοιπόν προφανές ότι καλύτερη διανομή των φορτίων μέσα στο 24ωρο είναι πάντα ευπρόσδεκτη από την εταιρία διαχείρισης του δικτύου διανομής και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένας σχετικά εύκολος τρόπος μετατόπισης των μέγιστων μιας εγκατάστασης σε περιόδους εκτός αιχμών συστήματος είναι η αποθήκευση θερμότητας σε χαμηλή ή υψηλή θερμοκρασία ανάλογα με την εφαρμογή.

Ακολουθεί μία σύντομη παρουσίαση των σημαντικότερων εφαρμογών που χρησιμοποιούν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, εκμεταλλευόμενα τις ιδιότητες των ΥΑΦ.[31,32]

### **7.2. Συστήματα αποθήκευσης μη άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς**

Εκτενείς προσπάθειες έχουν γίνει και εξακολουθούν να γίνονται στο τμήμα των εφαρμογών των ΥΑΦ με συστήματα αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας όπου η απαιτούμενη θερμότητα αποθηκεύεται την ημέρα για να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε ώρες μη ηλιοφάνειας.

Όπως προαναφέρθηκε η χαμηλή τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας δεν βοηθάει την ταχεία απορρόφηση της προσφερόμενης θερμότητας και γι' αυτό το λόγο εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές ενίσχυσής της.

Οι εναλλάκτες που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι :

1. Το ΥΑΦ τοποθετείται μεταξύ παραλλήλων πλακών σε λεπτά και διαδοχικά στρώματα αφήνοντας μεταξύ τους ικανό κενό για τη ροή του μέσου (συνήθως αέρας, νερό, διάλυμα νερού-γλυκόλης, λάδι κλπ)



**ΣΧΗΜΑ 7.1:** (Εναλλάκτης θερμότητας ενισχυμένος με ΥΑΦ. Στη δεξιά φωτογραφία διακρίνονται τα φύλλα στο εσωτερικό του εναλλάκτη και τις συσκευασίες με το ΥΑΦ τοποθετημένες επάνω τους.)

2. Το ΥΑΦ τοποθετείται εντός σωλήνων μικρής διαμέτρου σχηματίζοντας δέσμες σωλήνων και το ρευστό κινείται κάθετα ή παράλληλα στη δέσμη. Οι σωλήνες είναι πολλές φορές και πτερυγοφόροι.
3. Το ΥΑΦ τοποθετείται στο κέντρο ενός δοχείου αποθήκευσης διπλού κελύφους και το ρευστό κυκλοφορεί περιφερειακά.
4. Σε μικρή κλίμακα μόνο έχουν χρησιμοποιηθεί και διατάξεις παρόμοιες του πλακοειδή εναλλάκτη. Στην κυψελοειδή διάταξη αντιμετωπίζονται προβλήματα από τις τάσεις που δημιουργούνται με την αύξηση του όγκου κατά την τήξη του υλικού, φαινόμενο που θέτει όρια στις εφαρμογές της.
5. Το ΥΑΦ τοποθετείται σε δοχείο το οποίο το διαπερνούν πτερυγοφόροι σωλήνες. Κατ' αυτή τη διάταξη το υλικό καλύπτει όλη την περιοχή μεταξύ δοχείου και σωλήνα καθώς και τα κενά μεταξύ των πτερυγίων. Τέτοια διάταξη είναι αποδοτική μόνο αν το ρευστό που περνά από τους σωλήνες είναι υγρό και όχι αέριο.
6. Το ΥΑΦ βρίσκεται σε μορφή μικρής σφαίρας συνήθως με πλαστικό κέλυφος και τοποθετείται εντός δοχείου. Το ρευστό που μεταφέρει τη θερμότητα, εισέρχεται και εξέρχεται από το δοχείο μέσω σωληνώσεων εισαγωγής και εξαγωγής αεραγωγών εάν πρόκειται για αέριο. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη πτώση πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου.[31,32]



**ΣΧΗΜΑ 7.2:** (Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με ΥΑΦ σε σφαιρίδια. Το εργαζόμενο μέσο κυκλοφορεί στον κύλινδρο διαμέσου των σφαιριδίων)

Η αλλαγή όγκου των ΥΑΦ (περίπου 10% είναι μια τυπική τιμή) δεν δημιουργεί προβλήματα μόνο κατά την τήξη του υλικού (αύξηση του όγκου) αλλά και κατά τη στερεοποίηση (μείωση του όγκου) διότι υπάρχει περίπτωση να σχηματιστούν κοιλότητες στο υλικό ή ακόμα και μερική αποκόλληση του υλικού από την επιφάνεια συναλλαγής, φαινόμενο που θα μειώσει δραματικά το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Προβλήματα τέτοιας φύσης εύκολα παρακάμπτονται με τη χρήση σφαιριδίων ενισχυμένων με ΥΑΦ.

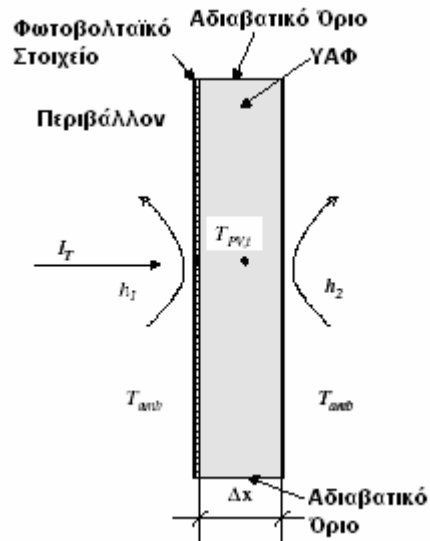
### **7.3. Συστήματα αποθήκευσης άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς**

Η ιδέα έχει πραγματοποιηθεί μόνο σε ερευνητικό επίπεδο χρησιμοποιώντας ένυδρο άλας για ΥΑΦ και λάδι για μέσο μεταφοράς θερμότητας από την πηγή στο σύστημα αποθήκευσης. Στην πειραματική διάταξη φυσαλίδες λαδιού διαπερνούν το ΥΑΦ μεταφέροντας την απαιτούμενη θερμότητα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι αναταράξεις που προκαλούν οι φυσαλίδες στη ροή τους μειώνουν το φαινόμενο του supercooling καθώς και αυτό του διαχωρισμού των φάσεων.[31,32]

### **7.4. Φωτοβολταϊκά πλαίσια**

Έχει παρατηρηθεί, ότι λόγω των υψηλών θερμοκρασιών σε κτίρια, όπου γίνεται χρήση φωτοβολταϊκών, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με αρκετές απώλειες. Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει σχεδιαστεί για να εργάζεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Μια χαρακτηριστική τιμή θερμοκρασίας είναι οι 25°C. Όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στοιχείου ξεπεράσει αυτή την τιμή, η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μειώνεται κατά 0.5%K<sup>-1</sup>. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή ΥΑΦ σε φωτοβολταϊκά στοιχεία με τον εικονιζόμενο τρόπο. Το ΥΑΦ τοποθετημένο σε αδιαβατικό προς το περιβάλλον πλαίσιο, απορροφά την εξέχουσα θερμότητα, διατηρώντας το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε σταθερή θερμοκρασία, εξασφαλίζοντας την αποδοτική λειτουργία του.[33,34]





**ΣΧΗΜΑ 7.3:** Ενισχυμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο

## 7.5. Συστήματα κλιματισμού

Τα παραδοσιακά συστήματα κλιματισμού λειτουργούν σπάνια στο μέγιστο φορτίο, γεγονός που αναδεικνύει την υπερδιαστασιολόγηση των συστημάτων αυτών, καθώς έχουν επιλεγεί για να καλύψουν το μέγιστο φορτίο. Με άλλα λόγια, η λειτουργία τους περιορίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας για να καλύψουν τις μέγιστες απαιτήσεις, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας παραμένουν απενεργοποιημένα.

Επιπρόσθετα, οι βιομηχανικές ψυκτικές διατάξεις διαστασιολογούνται για να ικανοποιήσουν τη μέγιστη στιγμιαία ζήτηση ψύξης, η οποία εμφανίζεται σε λίγες μόνο μέρες το χρόνο. Τα βιομηχανικά συστήματα ψύξης, παρέχουν την ψύξη για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, εκ των οποίων αρκετές απαιτούν μεγάλα ψυκτικά φορτία σε μικρό χρονικό διάστημα.

Ένα σύστημα αποθήκευσης ψύξης, είναι ικανό να μειώσει το μέγιστο φορτίο (το φορτίο για το οποίο διαστασιολογείται η εγκατάσταση) μέχρι και 70%. Αν ληφθεί υπ' όψη και το χαμηλό κοστολόγιο του ηλεκτροπαραγωγού κατά τις νυχτερινές ώρες, γίνεται αντιληπτό το ότι τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα φιλικά προς τους οικονομικούς επενδυτές.[35,36]



**ΣΧΗΜΑ 7.4:** Βιομηχανική μονάδα αποθήκευσης θερμότητας βάσει ΥΑΦ. Σε πρώτο πλάνο, ο εναλλάκτης του συστήματος με τις κυψέλες τοποθέτησης ΥΑΦ

## **7.6. Ηλιακά συστήματα**

Αν ληφθεί υπ' όψη η περιοδικότητα που εμφανίζουν οι πηγές ενέργειας στη φύση, τότε πρέπει να γίνει πρόβλεψη για την αποθήκευση της ενέργειας που δεν χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα τις ώρες με έντονη ηλιοφάνεια, κατά τις οποίες η ενέργεια που απορροφάται είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για κατανάλωση. Συνεπώς θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας ενέργειας και η αντίστοιχη δυνατότητα ανάκτησής της προς ικανοποίηση των θερμικών αναγκών του συστήματος.

Η λειτουργία του συστήματος που περιλαμβάνει τα ΥΑΦ, διαφέρει από τις συνήθεις ηλιακές εφαρμογές, μόνο στο δοχείο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Στις ηλιακές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται σήμερα περισσότερο τα ένυδρα άλατα. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος, στηρίζεται στη θέρμανση του εργαζόμενου μέσου (το οποίο μπορεί να είναι υγρή σιλικόνη ή ορυκτέλαιο) από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που παίρνει ο συλλέκτης. Το εργαζόμενο μέσο, αφού θερμανθεί, οδηγείται στο δοχείο θερμικής αποθήκευσης, όπου βρίσκεται και το ΥΑΦ. Η θερμότητα που μεταφέρει το εργαζόμενο μέσο, διαβιβάζεται στο ένυδρο άλας και απελευθερώνει το κρυσταλλικό νερό. Με τη διαδικασία αυτή, σχηματίζεται κορεσμένο υδατικό διάλυμα του άλατος, στερεό υπόλειμμα του αδιάλυτου άλατος και επίπλευση του εργαζόμενου μέσου σε αυτό. Το εργαζόμενο μέσο οδηγείται κατά ένα μέρος στο συλλέκτη και κατά ένα άλλο μέρος στο δοχείο ανάδευσης, όπου αναδεύεται με το υπόλοιπο μέσο και παραλαμβάνει θερμότητα από μια ηλεκτρική αντίσταση, αν κριθεί σκόπιμο.

Για την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας, το εργαζόμενο μέσο οδηγείται στον εναλλάκτη, όπου μεταφέρει θερμότητα σε ένα άλλο μέσο (συνήθως νερό), για τη χρήση της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας. Αφού το εργαζόμενο μέσο ψυχθεί στον εναλλάκτη, διαβιβάζεται στο κορεσμένο διάλυμα για να προσλάβει θερμότητα. Καθώς το κορεσμένο διάλυμα ψύχεται, επανακρυσταλλώνεται και αποδίδει την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται οργανικό ΥΑΦ, η λειτουργία του συστήματος είναι πανομοιότυπη, με μοναδική διαφορά εκείνη της λειτουργίας των οργανικών ΥΑΦ, καθώς αυτά όταν φορτίζονται λειώνουν και μεταβαίνουν από τη στερεή στην υγρή φάση και όταν αποφορτίζονται το αντίστροφο. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί η αποδοτική χρήση αυτών των συστημάτων, σε εφαρμογές με μικρές θερμοκρασιακές διαφορές, αλλά και μικρό αποθηκευτικό όγκο.

Η ηλιακή ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη κάθε στιγμή, οπότε οι ηλιακές εγκαταστάσεις απαιτούν μία ενδιάμεση αποθηκευτική μονάδα για την παρεχόμενη από τον Ήλιο ενέργεια, ρόλο τον οποίο συνήθως παίζει το νερό σε συστήματα θέρμανσης. Ένα σύστημα βασισμένο σε ΥΑΦ προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα. Μικρότερο όγκο σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα νερού και μεγαλύτερη αποδοτικότητα χάρη στην μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης της ενέργειας. Συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν επίσης να συνδυαστούν με συμβατικά συστήματα θέρμανσης. Ένα «ενισχυμένο» με ΥΑΦ σύστημα ζεστού νερού, παρέχει καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας του νερού.[37-39]

## **7.7. Ηλεκτρονικά εξαρτήματα**

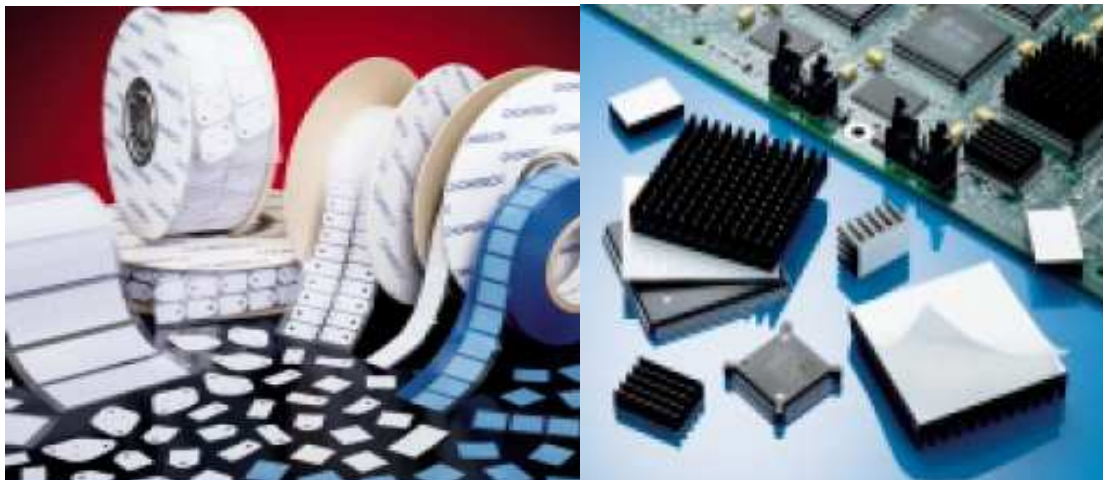
Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι ιδιαίτερως ευαίσθητα στη υπερθέρμανση, επηρεάζοντας αρνητικά τόσο τη διάρκεια ζωής, όσο και την αξιοπιστία του εξαρτήματος. Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που συναντά το ρεύμα καθώς διαπερνά τα καλώδια, τα επίπεδα πυριτίου, τα transistor των επιμέρους ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, αυξάνουν τη θερμοκρασία τους με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος

φθοράς ή και καταστροφής. Σκοπός είναι να διατηρηθεί η θερμοκρασία των εξαρτημάτων αυτών εντός ορίων ασφαλούς λειτουργίας της εκάστοτε συσκευής, χωρίς να χρειαστεί να αυξηθεί το συνολικό της μέγεθος.

Σήμερα, μεταλλικά πτερύγια χρησιμοποιούνται για την απαγωγή θερμότητας από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ενισχύοντας τα συστήματα ψύξης αυτά με ανεμιστήρες καταλλήλου μεγέθους. Η χρησιμοποίηση ΥΑΦ σε αυτά τα συστήματα για την απομάκρυνση των σημείων αιχμής που παρουσιάζει η χρονική κατανομή της θερμοκρασίας του εξαρτήματος, είναι απολύτως αξιόπιστη, καθώς το ΥΑΦ ανανεώνεται από μόνο του και επανέρχεται στην αρχική κατάσταση, μεταξύ δυο διαδοχικών σημείων αιχμής της θερμοκρασίας και δεν είναι απαραίτητος κανενός είδους κινητήρας ή διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας.

Όπως είναι γνωστό τα ΥΑΦ δρουν σε τρεις φάσεις. Κατά την πρώτη φάση η θερμοκρασία του στερεού ΥΑΦ αυξάνεται μέχρι το σημείο τήξης του, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντός του. Κατά τη δεύτερη φάση, η θερμοκρασία του ΥΑΦ παραμένει σταθερή καθώς το ΥΑΦ λιώνει. Κατά τη τρίτη φάση η θερμοκρασία υγρού ΥΑΦ συνεχίζει να αυξάνεται. Για να εισαχθούν τα ΥΑΦ επιτυχώς στις ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει θεωρητικά να μην βρεθούν στην τρίτη φάση, αλλά να παραμείνουν στη δεύτερη, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση.

Πλέον, από πολλές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο ανάπτυξης και εμπορίας υλικών αλλαγής φάσης, διατίθενται στο εμπόριο προϊόντα ειδικά σχεδιασμένα για τοποθέτηση σε ηλεκτρονικές διατάξεις, ιδιαίτερα αποδοτικά. Τα περισσότερα από αυτά τα προϊόντα, που θυμίζουν δεσμίδες με μικρά αυτοκόλλητα χαρτιά, έρχονται σε άμεση επαφή με το εξάρτημα για το οποίο προορίζονται.[40,41]



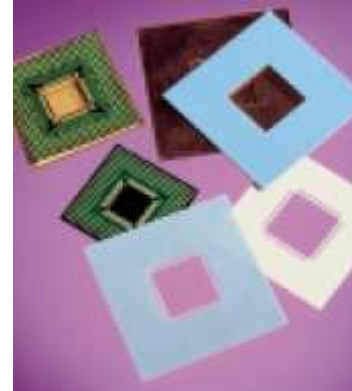
**ΣΧΗΜΑ 7.5:** Προϊόντα με ΥΑΦ για ηλεκτρονικά εξαρτήματα

### **7.7.1. Χρήση σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές**

Οι εφαρμογές των ΥΑΦς στην ψύξη των επεξεργαστών των ηλεκτρονικών υπολογιστών, περιλαμβάνουν προϊόντα όπως τα παραπάνω, αν και πλέον έχουν αναπτυχθεί προϊόντα τα οποία αντικαθιστούν πλήρως τα μεταλλικά πτερύγια ψύξης του επεξεργαστή. Αν και το κόστος τους είναι αρκετά αυξημένο, λόγω κυρίως του μικρού μεγέθους τους, η λειτουργία τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και συμφέρουσα από οικονομικής άποψης, ιδίως όσο αυξάνεται ο αριθμός των επεξεργαστών και η αντίστοιχη επεξεργαστική ισχύς, οπότε και η αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα.



**ΣΧΗΜΑ 7.6:** Προϊόντα για ψύξη επεξεργαστών ηλεκτρονικών πλακετών



Αρκετά πρωτότυπη και έξυπνη είναι η ιδέα ανάπτυξης μίας εύκαμπτης επιφάνειας πάχους 8-10mm, η οποία περιέχει ΥΑΦ στο εσωτερικό της και προορίζεται για χρήση σε φορητούς υπολογιστές. Η λειτουργία της είναι πολύ απλή, απλώς τοποθετείται ο φορητός υπολογιστής επάνω της και το προϊόν αναλαμβάνει να απορροφήσει μεγάλο μέρος των θερμικών φορτίων που αναπτύσσονται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας του Η/Υ. Πρόσθετο πλεονέκτημα του προϊόντος σε περίπτωση εκτός γραφείου χρήσης (όπου συνήθως ο υπολογιστής εναποτίθεται στους μηρούς του χρήστη), είναι ότι προστατεύει τη βουβωνική χώρα του χρήστη από έκθεση σε αυξημένες θερμοκρασίες, που σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, είναι επικίνδυνο τόσο για τη σεξουαλική υγεία όσο και για την αναπαραγωγική δυνατότητα του τελευταίου.[42,43]



**ΣΧΗΜΑ 7.7:** Προϊόν για χρήση σε φορητούς υπολογιστές

Στο σύνολό τους αυτά τα προϊόντα είναι αποτελεσματικά και συντελούν σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά τους:

- Αύξηση του χρονικού διαστήματος πρώτης εκκίνησης του ανεμιστήρα από τα 20 λεπτά στις τέσσερις ώρες, οπότε επιτυγχάνονται καλύτερες συνθήκες εργασίας στον υπολογιστή (π.χ. αθόρυβη λειτουργία) .
- Μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του υπολογιστή κατά 25 %.
- Αύξηση της ζωής του επεξεργαστή.
- Αύξηση των επιδόσεων του επεξεργαστή, λόγω της ελάττωσης της μέσης θερμοκρασία λειτουργίας του.

### 7.7.2. Μονάδα επείγουσας ψύξης

Μια ιδιαίτερα επιτυχής εφαρμογή των ΥΑΦ, είναι η μονάδα επείγουσας ψύξης (cooling emergency unit). Η μονάδα αυτή, αποτελείται από ένα εξωτερικό μεταλλικό πλαίσιο, στο εσωτερικό του οποίου υπάρχουν συσκευασίες με ΥΑΦ και σωληνώσεις που συνδέουν τη μονάδα με το κεντρικό σύστημα κλιματισμού μιας αίθουσας. Τα ΥΑΦ, βρίσκονται μέσα σε σακούλες τοποθετημένες πάνω σε πλάκες αλουμινίου. Η ανάγκη μιας τέτοιας μονάδας, είναι επιθυμητή για χώρους που στεγάζονται ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες στο χώρο μπορούν να αποβούν καταστροφικές για έναν αρκετά δαπανηρό εξοπλισμό. Η εμφάνιση των μεγάλων θερμοκρασιών, οφείλεται κυρίως στις υψηλές θερμοκρασίες του εξωτερικού περιβάλλοντος και στη μεγάλη αποβολή θερμότητας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.



**ΣΧΗΜΑ 7.8:** Μονάδα επείγουσας ψύξης

Τα ΥΑΦ που υπάρχουν στη μονάδα, βρίσκονται αρχικά στη στερεή φάση, είναι δηλαδή θερμικά αφόρτιστα. Μόλις η θερμοκρασία του χώρου αυξηθεί πέραν του φυσιολογικού και ο κλιματισμός της αίθουσας δεν είναι αρκετός για να διατηρήσει τη θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα για τη λειτουργία των ηλεκτρονικών συσκευών, μπαίνει σε λειτουργία η μονάδα επείγουσας ψύξης. Το ψυκτικό υγρό περνά μέσα από τη μονάδα και φορτίζει θερμικά το ΥΑΦ, το οποίο μπορεί να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες θερμότητας και να τις αποθηκεύσει. Μόλις μπει σε λειτουργία η μονάδα, αυξάνεται κατά ένα μεγάλο βαθμό η απόδοση του συστήματος κλιματισμού. Πρέπει βέβαια να προβλέπεται πάντα στο τέλος της λειτουργίας της μονάδας, να αποφορτίζονται τα ΥΑΦ, για να είναι πάντα διαθέσιμη η μονάδα. Η αποφόρτιση της μονάδας μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, με πιο αποδοτικό την απευθείας ψύξη των ΥΑΦ μέσω του συστήματος κλιματισμού, σε λειτουργία όπου αποκόπτεται ο κλιματισμός της αίθουσας, κυρίως σε περιόδους ύφεσης της επεξεργαστικής δραστηριότητας, ή κατά τη διάρκεια της νύχτας.[42]

### 7.7.3. Τηλεπικοινωνίες

Τα συστήματα των τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, περιέχουν μηχανήματα και ηλεκτρονικά εξαρτήματα τα οποία είναι υπεύθυνα για την εύρυθμη λειτουργία του αντίστοιχου δικτύου. Τέτοια εξαρτήματα περιέχουν εξεζητημένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, ιδιαίτερα ακριβά και καταναλωτικά από άποψης ενέργειας, όπως επίσης και πολύ ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες. Πολλά από αυτά δε, είναι διασκορπισμένα ανά την επικράτεια για την κατά τόπους ενίσχυση και σωστή διανομή του σήματος του δικτύου. Το καλύτερο δυνατό σημείο τοποθέτησης των κουβουκλίων που περιέχουν τέτοια μηχανήματα είναι σε ανοιχτούς χώρους (κοιλάδες) και κατά το δυνατόν υψηλότερα (υψώματα, βουνά, κλπ). Ως εκ τούτου, είναι συνήθως τοποθετημένα σε πρόσβασιμες μεν περιοχές, αλλά μακριά από κατοικημένους χώρους, οπότε είναι δύσκολη η συνεχής επιτήρηση της θερμοκρασιακής κατάστασής τους. Τα ΥΑΦ έχουν βρει εφαρμογή και σε αυτά τα συστήματα και παραδειγματικά περιγράφεται παρακάτω μία τέτοια εφαρμογή.

Τα τηλεπικοινωνιακά κουβούκλια είναι μονωμένα, και κλιματιζόμενα φυλάκια, τα οποία προστατεύουν την καρδιά της κινητής τηλεφωνίας, τον Πομποδέκτη Βάσης (Base Station Subsystem (BSS)). Είναι το κομμάτι εκείνο ενός κλασσικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας το οποίο διαχειρίζεται την κίνηση και το σήμα του δικτύου. Εκτελεί, μάλιστα, διάφορες εργασίες σχετικά κυρίως με το δίκτυο, όπως την αποκωδικοποίηση της συνομιλίας, το διαχωρισμό των καναλιών του δικτύου από άλλα δίκτυα (ραδιοφωνικά, αεροπορικά, τηλεοπτικά, κλπ) και τη διαχείριση του σήματος για εξυπηρέτηση όλης της περιοχής κάλυψης.

Ο πομποδέκτης βάσης, καθώς επίσης και η αντίστοιχη μπαταρία είναι ιδιαίτερως θερμοευαίσθητα και ο περιβάλλον χώρος τους πρέπει να διατηρείται διαρκώς κάτω από τους 35°C. Σε υποανάπτυκτες και υπό ανάπτυξη χώρες, εμφανίζεται συχνά το φαινόμενο της διακοπής του ρεύματος, καθώς και μονοφασικού ρεύματος, αναγκάζοντας τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας να εφοδιάζουν τα καταλύματα αυτά με ντιζελογεννήτριες για να υποστηρίξουν το σύστημα κλιματισμού του κουβουκλίου στην περίπτωση διακοπής ή μονοφασικού ρεύματος. Τα ΥΑΦ που εγκαθίστανται σε αυτά τα κουβούκλια απορροφούν θερμότητα από το εσωτερικό(θερμότητα η οποία παράγεται από τη λειτουργία του BSS) ελαχιστοποιώντας ή ακόμα και εξαλείφοντας την ανάγκη χρήσης της γεννήτριας για κλιματισμό, επομένως έχοντας οικονομικό όφελος λόγω της μικρότερης ποσότητας καυσίμου που καταναλώνει η γεννήτρια. Το ΥΑΦ θα επαναφορτιστεί όποτε είναι διαθέσιμη η πηγή ενέργειας, οπότε θα δουλεύει το κανονικό σύστημα κλιματισμού, άρα και θα αποβάλλει την αποθηκευμένη θερμότητα.[44,45]



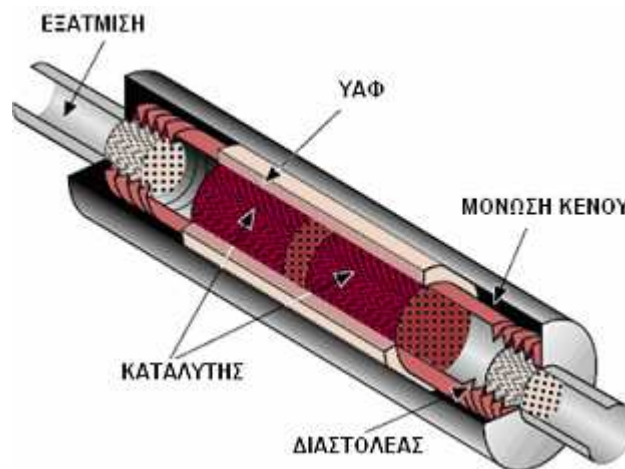
**ΣΧΗΜΑ 7.9:** Συσκευασίες ΥΑΦ (πλάκες και κύλινδροι) που χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνιακά κουβούκλια

## 7.8. Οχήματα

Όπως είναι πλέον φανερό, τα ΥΑΦ έχουν αξιοσημείωτες δυνατότητες βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς διαφόρων συστημάτων και δεν θα μπορούσαν να αποτελέσει εξαίρεση ο τομέας των οχημάτων. Πολύ ενδιαφέροντα στοιχεία προκύπτουν από την αυτοκινητοβιομηχανία, στα πλαίσια της οποίας έχουν δοκιμαστεί ΥΑΦ σε πληθώρα εφαρμογών. Δύο από τα πλέον ενδιαφέροντα και επιτυχημένα παραδείγματα περιγράφονται παρακάτω.

Τα ΥΑΦ χρησιμοποιούνται ήδη σήμερα σε μία μπαταρία λανθάνουσας θερμότητας, την οποία προσφέρει η BMW σαν προαιρετικό εξοπλισμό στα μοντέλα της σειράς 5. Η αρχή λειτουργίας είναι αρκετά απλή. Το υλικό αποθήκευσης ενέργειας είναι συνδεδεμένο με το ψυγείο του αυτοκινήτου και αποθηκεύει την πλεονάζουσα θερμότητα όταν ο κινητήρας λειτουργεί στα θερμοκρασιακά όρια σχεδίασης. Αυτή η θερμότητα είναι μετά διαθέσιμη στο επόμενο ξεκίνημα του οχήματος με κρύο κινητήρα, ώστε να θερμανθεί ο κινητήρας γρηγορότερα, οπότε βελτιώνει το συνολικό συντελεστή κατανάλωσης καυσίμου (km/lt καυσίμου), όπως επίσης και για τη θέρμανση της καμπίνας του οχήματος (οδηγική άνεση-θερμική άνεση). Χάρη στην εξαιρετική μόνωση της μπαταρίας λανθάνουσας θερμότητας, μπορεί να διατηρήσει την αποθηκευμένη ενέργεια με το όχημα σταματημένο σε περιβάλλον  $-20^{\circ}\text{C}$  για τουλάχιστον δύο εικοσιτετράωρα.

Μία ακόμη εφαρμογή των ΥΑΦ είναι στο σύστημα εξαγωγής του οχήματος. Με χρήση ΥΑΦ διατηρείται ο καταλύτης στη θερμοκρασία σχεδιασμού, ελαττώνοντας τις –αναγκαστικά – αυξημένες εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων κατά το ξεκίνημα του κρύου κινητήρα.



**ΣΧΗΜΑ 7.10:** ΥΑΦ σε καταλύτη αυτοκινήτου

Ο καταλύτης (καταλυτικός μετατροπέας) που πλέον είναι αναφαίρετο εξάρτημα όλων των σύγχρονων αυτοκινήτων, μετατρέπει μέσω οξειδωσης στα ευγενή μέταλλα που περιέχει (Ρόδιο, Παλλάδιο, Λευκόχρυσος) τα μονοξείδια αζώτου και άνθρακα από την καύση του καυσίμου στον κύλινδρο, σε λιγότερο βλαβερά και σίγουρα όχι δηλητηριώδη διοξείδια. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει η θερμοκρασία του καταλύτη να είναι πολύ υψηλή, καθώς για την εν λόγω χημική διαδικασία η μεγάλη θερμοκρασία είναι απαραίτητος παράγοντας. Αυτή όμως η θερμοκρασία δεν αναπτύσσεται άμεσα κατά την εκκίνηση του αυτοκινήτου, αλλά μετά από λίγα λεπτά. Έχει παρατηρηθεί ότι κατά την περίοδο της «κρύας εκκίνησης» εκλύεται το 60%-80% των τοξικών καυσαερίων.[46-49]

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού σχεδιάστηκε ένας τριοδικός καταλύτης ενισχυμένος με ΥΑΦ, με σκοπό να αποθηκεύουν θερμότητα κατά την κίνηση του αυτοκινήτου και να την απελευθερώνουν στην επόμενη εκκίνησή του.

Σε οχήματα που εφαρμόστηκε το εν λόγω σύστημα τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά. Οι κινητήρες τέθηκαν σε λειτουργία μετά 24 ώρες από την προηγούμενη εκκίνησή τους και μετρήθηκαν οι εκπομπές των καυσαερίων τους. Διαπιστώθηκε ότι οι εκπομπές υδρογονανθράκων και μονοξειδίου του άνθρακα ήταν μειωμένες κατά 84% και 91% αντίστοιχα, συγκρινόμενες με τις εκπομπές κινητήρων με συμβατικό καταλύτη.

### **7.9. Μεταφορές αγαθών**

Ο τομέας των μεταφορών σε πολλές περιπτώσεις περιλαμβάνει τη μεταφορά προϊόντων τα οποία είναι ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και απαιτούν πολύ συγκεκριμένα και στενά θερμοκρασιακά πλαίσια κατά τη μεταφορά τους.

Είτε τα μεταφερόμενα αγαθά απαιτούν χαμηλές είτε υψηλές θερμοκρασίες, στο συνολικό κόστος μεταφοράς, προστίθεται ένα ιδιαίτερα αυξημένο κόστος το οποίο έχει να κάνει με τη διατήρηση της θερμοκρασίας, είτε πρόκειται για όχημα-ψυγείο, είτε για όχημα με κάποια θερμαντική διάταξη.

Η μεταφορά ευαίσθητων νωπών τροφίμων, ευαίσθητων στις θερμοκρασιακές αλλαγές φαρμακευτικών ειδών, διάφορων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, χημικών, εκρηκτικών, απαιτεί κλιματιζόμενα οχήματα. Τέτοια οχήματα καθιστούν απαγορευτική από πλευράς κόστους τη λειτουργία τους, καθώς χρησιμοποιούν σαν καύσιμο ντίζελ. Το κόστος της ενέργειας η οποία παράγεται από ντίζελ είναι 6 φορές μεγαλύτερη από το αντίστοιχο κόστος της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το τεράστιο πλεονέκτημα των ΥΑΦ είναι ότι μπορούν να απορροφήσουν ή να αποδώσουν σεβαστά ποσά θερμότητας σχεδόν ισοθερμοκρασιακά. Είναι προφανές ότι ανάλογα με τις θερμοκρασιακές απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής επιλέγεται και υλικό με αντίστοιχο σημείο τήξης.



**ΣΧΗΜΑ 7.11:** Τυπικές πλάκες με ΥΑΦ για ενίσχυση συσκευασιών μεταφοράς προϊόντων

Σε γενικές γραμμές, πριν από τη μεταφορά φορτίζονται τα ΥΑΦ είτε σε ψυγείο, είτε σε φούρνο, ώστε να είναι έτοιμα για χρήση. Το πολύ θετικό εδώ είναι ότι το ΥΑΦ παρέχει τη δυνατότητα φόρτισής του καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια μη αιχμής, που ως γνωστό, είναι φθηνότερη.

Η μεταφορά ζεστών γευμάτων για παράδειγμα, απαιτεί μία πηγή θερμότητας, διαφορετικά δεν θα ικανοποιήσει τους πελάτες-καταναλωτές. Μία ηλεκτρική



θερμαντική μονάδα δεν μπορεί να είναι διαθέσιμη κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες, και σε αυτές τις περιπτώσεις τα ΥΑΦ προσφέρουν ιδανική λύση, αφού επιτρέπουν την κατασκευή ενός αυτό-θερμαινόμενου σκεύους μεταφοράς.

Η κατασκευή των δοχείων μεταφοράς προβλέπει την προθέρμανση των πλακών που περιέχουν τα ΥΑΦ σε ένα κοινό φούρνο ή μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων. Μόλις οι πλάκες με το ΥΑΦ φορτιστούν, αποθηκεύονται ένα μεγάλο ποσό λανθάνουσας θερμότητας τοποθετούνται στα θερμικά μονωμένα δοχεία σαν εσωτερική επένδυση.

Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί, ότι ένα μεγάλο πλεονέκτημα των ΥΑΦ στην εφαρμογή αυτή είναι η αποφόρτιση του ΥΑΦ σε σταθερή θερμοκρασία, χωρίς να υπερθερμαίνει το εσωτερικό περιβάλλον του δοχείου.[50-52]



Πλέον οι εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο, έχουν αναπτύξει πλήθος τυποποιημένων προϊόντων μεταφοράς, τα οποία είναι εφοδιασμένα με εγκοπές. Αυτές οι εγκοπές πέραν της ευελιξίας και ευκολίας στον τομέα της συναρμολόγησης του κιβωτίου μεταφοράς, εμφανίζουν το πρόσθετο πλεονέκτημα της αεροστεγούς κατά το δυνατόν μεταφοράς των αγαθών, γεγονός το οποίο ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες.

Πέρα όμως από αυτές τις συσκευασίες προσφέρονται και έτοιμα κιβώτια ενισχυμένα με ΥΑΦ για τη μεταφορά οσοδήποτε μεγάλου όγκου προϊόντων, ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες οποιουδήποτε πελάτη ή επιχείρησης.



**ΣΧΗΜΑ 7.12:** Συσκευασίες μεταφοράς με ΥΑΦ σε διάφορα μεγέθη



Η μεταφορά κρύων προϊόντων υπακούει στους ίδιους κανόνες, το μόνο που αλλάζει είναι το υλικό που χρησιμοποιείται για να ικανοποιήσει τις ανάλογες θερμοκρασίες και ο τρόπος φόρτισης του υλικού που συνήθως είναι ένα τυπικό ψυγείο ή καταψύκτης.[53]



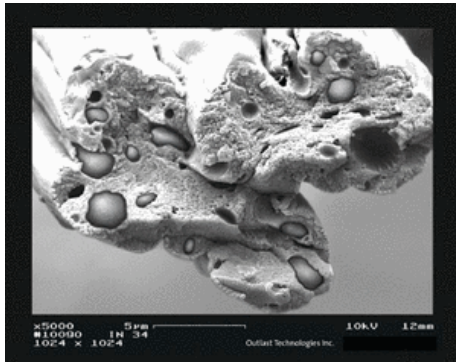
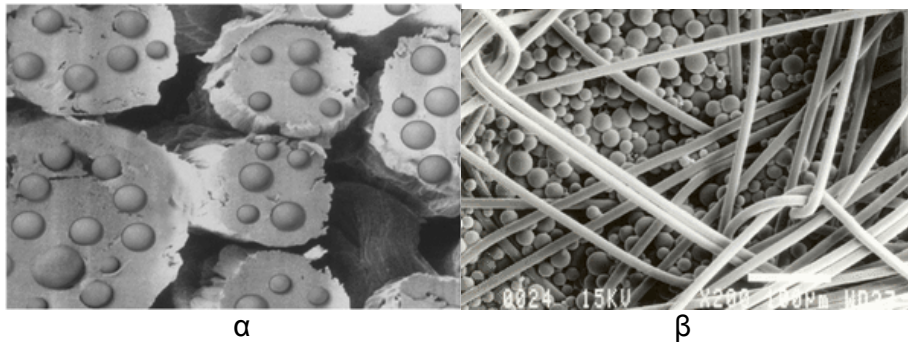
**ΣΧΗΜΑ 7.13:** Μερικές από τις πλέον γνωστές συσκευασίες ΥΑΦ για μεταφορά κρύων αγαθών.

### **7.10. Θερμική Ένδυση**

Η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα έχει ως στόχο να παρέχουν θερμική άνεση, ομοιόμορφα κατανεμημένη θερμοκρασία και λιγότερο ιδρώτα.

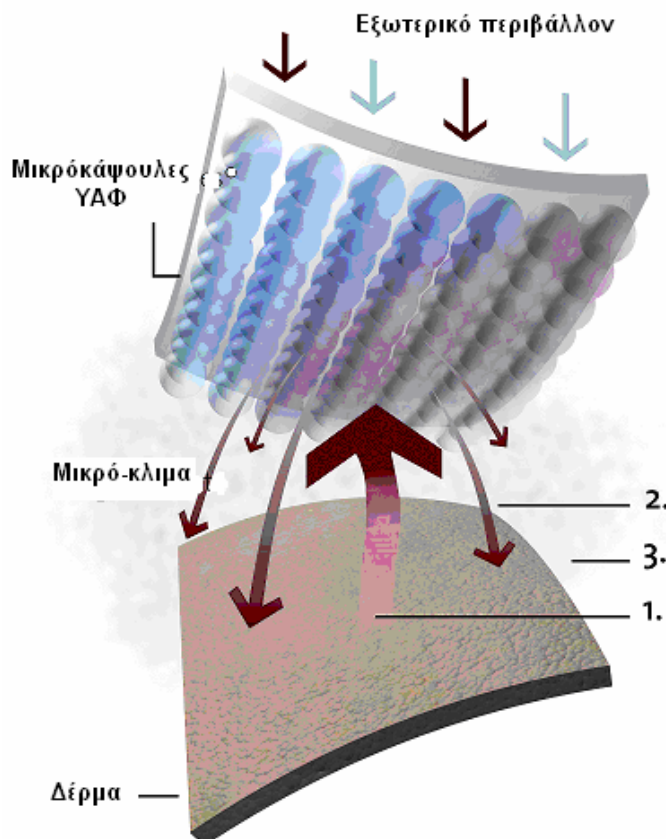
Η εισαγωγή των ΥΑΦ σε ρούχα ξεκίνησε από διαστημικές εφαρμογές, στις στολές των αστροναυτών, για τη προστασία τους από τις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. Σήμερα οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα και γενικότερα στα υφάσματα έχουν επεκταθεί. Χρησιμοποιούνται σε στολές που εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα σε πυροσβεστικές, ορειβατικές και αγωνιστικές (F1) στολές. Η χρήση τους όμως έχει επεκταθεί και σε καθημερινά ρούχα και άλλα υφάσματα, όπως κουβέρτες, κάλτσες, παπούτσια κλπ.

Στα ενδύματα χρησιμοποιούνται κυρίως οργανικά ΥΑΦ σε μικροκάψουλες, για να μην εμφανίζονται διαρροές κατά τη μετάβαση στην υγρή φάση. Τα μικρο-ΥΑΦ αυτά όταν προστίθενται στις υφασμάτινες ίνες ή ανάμεσα στα στρώματα των ενδυμάτων, μπορούν να ελαττώσουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μπορούν να αυξήσουν τη θερμοχωρητικότητα (του ενδύματος) περίπου 10 φορές. Αυτά τα ανεπτυγμένα θερμικά χαρακτηριστικά μπορούν να εμφανιστούν στα σύγχρονα ρούχα με εμβάπτιση των ινών του υφάσματος σε διάλυμα που περιέχει μικροσκοπικές μονάδες ΥΑΦ (μικρο-ΥΑΦ) ή με την προσθήκη των μικρο-ΥΑΦ σε πολυμερή, τα οποία μετά οδηγούνται σε εξολκείς για σχηματισμό πολυμερών ινών. Συνήθως (προφανώς είναι η πλέον οικονομική μέθοδος) οι μικροκάψουλες με τα ΥΑΦ, τοποθετούνται κατά στρώματα και σε σχετικά πειράματα έχει αποδειχθεί η αποδοτικότερη χρήση δύο στρωμάτων με ΥΑΦ. Επειδή τα ΥΑΦ παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη πυκνότητα από τα συνήθη υλικά των ενδυμάτων, αλλά και λόγω του υψηλού κόστους των ΥΑΦ, χρησιμοποιείται ΥΑΦ κατά 20-35% επί του ολικού βάρους του ενδύματος. Τα παραφινούχα ΥΑΦ που χρησιμοποιούνται συνήθως εμφανίζουν το φαινόμενο της τήξης στους 28-30°C.



**ΣΧΗΜΑ 7.14:** Ηλεκτρονικές μικρογραφίες υλικών ένδυσης ενισχυμένων με μικροκάψουλες ΥΑΦ. (α) με ανάμιξη του υλικού του ενδύματος με ΥΑΦ, (β) σε στρώματα. Στην τρίτη (γ) φωτογραφία εντυπωσιακό είναι το γεγονός ότι σύμφωνα με την κλίμακα του μικροσκοπίου, η μικροκάψουλα έχει διάμετρο μικρότερη από 5μm.

Προφανώς για θερμοκρασίες χαμηλότερες από το σημείο τήξης των ΥΑΦ, το υλικό βρίσκεται εξ ολοκλήρου στη στερεή του φάση, αν και επειδή το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται σε συνήθεις συνθήκες στους 36°C, προσφέρει συνήθως ένα ποσό θερμότητας στο ΥΑΦ, το οποίο μπορεί να επανακτήσει στην περίπτωση που η θερμοκρασία του ελαττωθεί. Αν η θερμοκρασία τείνει να αυξηθεί, τότε το ΥΑΦ απορροφά θερμότητα για να μην υπερθερμανθεί το ανθρώπινο σώμα.[54-56]



- 1) Το ΥΑΦ απορροφά την πλεονάζουσα θερμότητα
- 2) Η αποθηκευμένη θερμότητα ελευθερώνεται προς το ανθρώπινο σώμα όποτε κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό
- 3) Το αποτέλεσμα είναι ένα μικρόκλιμα σταθερής θερμοκρασίας

**ΣΧΗΜΑ 7.15:** Αρχή λειτουργίας των ενισχυμένων με ΥΑΦ ενδυμάτων.

Με αυτή τη μέθοδο προσθήκης μικρο-ΥΑΦ στα ρούχα, είναι δυνατός ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των λεγόμενων έξυπνων ενδυμάτων.

Οι εφαρμογές που αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι πολλές, από βαριά ένδυση, μπουφάν, αδιάβροχα, κουβέρτες, προστατευτικά φωτιάς για πυροσβέστες, στολές κατάδυσης και πολλά άλλα.

Η χρήση των ΥΑΦ έχει πλέον εδραιωθεί στον τομέα της ένδυσης, με πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα και για τον πιο απαιτητικό χρήστη. Προϊόντα όπως στολές για σκι, κυνηγετικά γιλέκα και θερμικά εσώρουχα, είναι μία θερμομονωτική μέθοδος πολύ διαφορετική με ό,τι έχει επικρατήσει μέχρι σήμερα, μεθόδους δηλαδή που βασίζονται στην αποθήκευση αέρα μεταξύ των ινών ή στρωμάτων υλικού. Χάρη στα μικρο-ΥΑΦ, η θερμότητα που απορροφάται οδηγεί το υλικό να αλλάξει φάση (από στερεό σε υγρό) σε μοριακό επίπεδο, αποθηκεύοντας ή απελευθερώνοντας ενέργεια, ανάλογα με τη θερμοκρασία του δέρματος. Η θερμότητα αυτή διατηρείται στο ΥΑΦ και όταν έρθει η ώρα ελευθερώνεται ομοιόμορφα και σταδιακά, δημιουργώντας ένα πολύ πιο αποτελεσματικό θερμομονωτικό στρώμα σταθερής θερμοκρασίας μεταξύ του δέρματος και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Αυτό σταδιακά θα οδηγήσει στην εξαφάνιση των δύσχρηστων και καθόλου πρακτικών θερμομονωτικών ρούχων που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα. [54-56]



**ΣΧΗΜΑ 7.16:** Εμπορικά ενδύματα και εσώρουχα ενισχυμένα με ΥΑΦ

Η χρήση των ΥΑΦ σε εσώρουχα αποδεικνύεται αποτελεσματική στον τομέα της θερμικής μόνωσης και μάλιστα πολύ πιο αποτελεσματική από τα λεγόμενα «ισοθερμικά» εσώρουχα. Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης τέτοιων εσωρούχων είναι διατηρούν το σώμα σε καλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η χρήση ενός ογκώδους, άβολου στην κίνηση και αντιαισθητικού εξωτερικού ενδύματος.



**ΣΧΗΜΑ 7.17:** Ενδύματα ειδικών κατηγοριών ενισχυμένα με ΥΑΦ

Τα γάντια και οι σκούφοι όπως και τα καπέλα είναι ομάδες ενδυμάτων που έγιναν και πάλι επίκαιρα, λόγω της χρησιμότητας και της αποτελεσματικότητας που

τους προσέφερε ο συνδυασμός τους με ΥΑΦ. Ειδικότερα τα γάντια που σε συγκεκριμένες εφαρμογές είναι απαραίτητα πλέον γίνονται περισσότερο χρηστικά, μικρότερα σε όγκο και περισσότερο αποτελεσματικά.

Τα ΥΑΦ χρησιμοποιούνται ακόμα και για να βελτιώσουν τις συνθήκες του μικροκλίματος που περιβάλλει τον άνθρωπο κατά τη διάρκεια του ύπνου, με τη χρήση των ΥΑΦ σε σεντόνια, παπλώματα και μαξιλάρια, αλλά και στρώματα. Η θερμική συμπεριφορά των ΥΑΦ εξασφαλίζει τις κατάλληλες συνθήκες ύπνου με τη θερμοκρασία να κυμαίνεται απόλυτα στα όρια της θερμικής άνεσης, χωρίς ζέστη αλλά και χωρίς κρύο.



**ΣΧΗΜΑ 7.18:** Χρήση ΥΑΦ σε στρώματα και λευκά είδη

Επιπρόσθετα, πρόσφατες έρευνες δείχνουν την καταλληλότητα των ΥΑΦ σε κράνη, με σκοπό την ψύξη του κομιστή. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, το ΥΑΦ απορροφά τη θερμότητα που εκλύεται από το κεφάλι του κομιστή, αλλά και την ανεπιθύμητη θερμότητα που προέρχεται από το περιβάλλον. Γίνεται κατανοητό, ότι η θερμότητα αποθηκεύεται στο κράνος χωρίς να γίνεται δυσάρεστη στον κομιστή για ένα χρονικό διάστημα που μέχρι σήμερα φτάνει τις δυο ώρες, αλλά αναμένεται με την εξέλιξη των ΥΑΦ να αυξηθεί ικανοποιητικά. Βέβαια, αυτή η θερμότητα δεν αποβάλλεται προς το περιβάλλον, συνεπώς θα πρέπει πριν ξαναχρησιμοποιηθεί το κράνος να αποφορτισθεί, μη φορώντας το, ή καλύτερα βυθίζοντάς το σε κρύο νερό για σύντομο χρονικό διάστημα.

Τα ΥΑΦ που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για τα κράνη είναι τόσο τα οργανικά, αλλά και κάποια ανόργανα άλατα. Στα ανόργανα άλατα δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην συσκευασία, τα οποία πολύ οξειδωτικά. Το σημείο τήξης των ΥΑΦ που χρησιμοποιούνται εδώ είναι στην περιοχή των 28<sup>0</sup>C.

Αξιοσημείωτη είναι η χρήση των ΥΑΦ σε υποδήματα και πάτους υποδημάτων προσφέροντας στο χρήστη, ένα άνετο περιβάλλον για τα πόδια του. Με την εξομαλυμένη θερμοκρασία εντός του υποδήματος, επιτυγχάνεται πέραν της θερμικής άνεσης, λιγότερη κόπωση, και λιγότερο ιδρώτα, ο συνδυασμός του οποίου με υψηλές θερμοκρασίες οδηγεί σε μυκητιάσεις και άλλες δερματοπάθειες. Τα τελευταία είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε περιπτώσεις όπως των αθλητών ή άλλων επαγγελματιών που είναι υποχρεωμένοι να φορούν συγκεκριμένα υποδήματα.

Ένα από τα πρώτα και πλέον επιτυχημένα προϊόντα ένδυσης με ΥΑΦ είναι ένα γιλέκο ενισχυμένο με σακούλες γεμάτες με κατάλληλο υλικό. Το γιλέκο φοριέται πάνω από μία μόνο φανέλα ή και κατάσαρκα και έχει σαν σκοπό να απομακρύνει την εξεχούσα θερμότητα σε περιπτώσεις αυξημένης δραστηριότητας. [54-56]



**ΣΧΗΜΑ 7.19:** Γιλέκο ενισχυμένο με αφαιρούμενες συσκευασίες ΥΑΦ

Θεωρήθηκε σωστό να αναλυθεί ξεχωριστά γιατί γνώρισε μεγάλη απήχηση από πολλούς φορείς, όπως αστυνομικά και πυροσβεστικά σώματα, ένοπλες δυνάμεις και από πολλές ιδιωτικές επιχειρήσεις. Το σημαντικό γεγονός είναι ότι είναι ένα ένδυμα μικρό σε όγκο και μπορεί να συνδυαστεί με σχεδόν όλες τις στολές, ή με οποιοδήποτε συνδυασμό ρούχων.

### **7.11. Ιατρικά προϊόντα**

Η τεχνολογία των ΥΑΦ χρησιμοποιείται στον ιατρικό εξοπλισμό κυρίως στις εφαρμογές εκείνες που απαιτούν μια παθητική διαχείριση της θερμοκρασίας στο ανθρώπινο σώμα. Χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της θερμικής άνεσης σε εφαρμογές στις οποίες δεν είναι εφικτή η συχνή κίνηση, για την ανακούφιση των ασθενών. Παραδειγματικές εφαρμογές είναι οι ζώνες αντιμετώπισης ορθοπεδικών προβλημάτων, οι οποίες συνήθως είναι αρκετά σφικτές και προκαλούν εφίδρωση. Επίσης πολύ χρήσιμη εφαρμογή είναι τα καλύμματα για την πλάτη και το κάθισμα αναπηρικών αμαξιδίων, τα οποία απορροφούν τη θερμότητα από το σώμα του ασθενούς, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία, αποφεύγοντας έτσι το αίσθημα δυσφορίας λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της εφίδρωσης.

Επίσης τα ΥΑΦ χρησιμοποιούνται σαν παθητικά συστήματα ψύξης για τη συντήρηση ανθρώπινων οργάνων κατά τη μεταφορά τους με κάποιο μεταφορικό μέσο. Η διατήρηση μιας χαμηλής θερμοκρασίας είναι ζωτικής σημασίας κατά τη μεταφορά των ευπαθών σε θερμοκρασίες ανθρώπινων οργάνων ή του ανθρώπινου αίματος. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των ΥΑΦ στις εφαρμογές αυτές είναι η μεγάλη αξιοπιστία τους, καθώς στις εφαρμογές αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μην εμφανίζεται διακύμανση της θερμοκρασίας.[57,58]



**ΣΧΗΜΑ 7.20:** ΥΑΦ για μεταφορά αίματος

## 7.12. Χρήση ΥΑΦ σε κτηριακές εφαρμογές

### 7.12.1. Δομικά υλικά

Η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας στην πέτρα είχε παρατηρηθεί από τους αρχαίους χρόνους και είχε αξιοποιηθεί στην κατασκευή κατοικιών. Η χρήση όμως υλικών που αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή αισθητής θερμότητας, παρουσιάζει συγκεκριμένα προβλήματα όπως για παράδειγμα την υπερβολική ποσότητα υλικού που απαιτείται, καθώς επίσης και τις μεγάλες διακυμάνσεις στο θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο κυμαίνεται η θερμοκρασία του υλικού αποθήκευσης.

Ιδιότητα	Πέτρα	Νερό	Οργανικό ΥΑΦ	Ανόργανο ΥΑΦ
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	2240	1000	800	1600
Ειδική Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg)	1.0	4.2	2.0	2.0
Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/kg)	---	333	190	230
Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/m <sup>3</sup> )	---	33	152	368
Μάζα Υλικού για 1MJ (kg)	67000	16000	5300	4350
Όγκος Υλικού για 1MJ (m <sup>3</sup> )	30	16	6.6	2.7
Σχετική Μάζα Υλικού	15	4	1.25	1.0
Σχετικός Όγκος Υλικού	11	6	2.5	1.0

**ΣΧΗΜΑ 7.21:** Ιδιότητες δομικών υλικών για πέτρα, νερό και τυπικά ΥΑΦ

Τα δομικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα στα κτίρια παραμένουν στη στερεή κατάσταση σε ολόκληρο το εύρος θερμοκρασιών χρήσης τους. Ομοίως συμπεριφέρονται και τα κλασσικά δομικά υλικά τα οποία ως χαρακτηριστικό έχουν την αντίσταση που προβάλλουν στη διαμέσου τους ροή της θερμότητας. Αντίθετα με αυτή την προσέγγιση μόνωσης των κτιρίων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν υλικά που αποθηκεύουν τη θερμότητα που εισέρχεται στο κτίριο από το κέλυφός του κατά την περίοδο του θέρους, ώστε να μην αυξηθεί η θερμοκρασία των χώρων, ή να αποθηκεύουν τη θερμότητα που προσπίπτει στο κτίριο υπό τη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας κατά το χειμώνα.

Για χρήση στις κατασκευές τα ΥΑΦ πρέπει να έχουν σημείο τήξης λίγο μεγαλύτερο της θερμοκρασίας δωματίου, ώστε σε συνήθεις συνθήκες δωματίου να είναι στερεό. Κάθε αλλαγή θερμοκρασίας προκαλεί τήξη του υλικού, οπότε και απορρόφηση θερμότητας από το περιβάλλον. Πτώση της θερμοκρασίας θα έχει ως αποτέλεσμα απελευθέρωση ενέργειας ξανά προς τον περιβάλλοντα αέρα.

Η βασική ιδέα των συστημάτων αποθήκευσης ως μέσα εξοικονόμησης ενέργειας είναι η μετατόπιση των μέγιστων της ενεργειακής ζήτησης της εγκατάστασης σε ώρες μη αιχμής, ή η εξομάλυνση της καμπύλης ενεργειακής ζήτησης της εγκατάστασης ώστε να μην παρουσιάζονται σημεία αιχμής κατά την 24ωρη λειτουργία της, άρα μικρότερα θερμικά και ψυκτικά φορτία.

Έρευνες και εφαρμογές που έχουν γίνει και γίνονται αποδεικνύουν ότι δομικά υλικά τα οποία έχουν εμπλουτιστεί με ΥΑΦ καθώς και εγκαταστάσεις που περικλείουν ΥΑΦ μπορούν να αποθηκεύσουν 5-14 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου από τα συμβατικά δομικά υλικά.[59-62]



**ΣΧΗΜΑ 7.22:** Τσιμέντο. Αριστερά απλό, δεξιά ενισχυμένο με ΥΑΦ

Η εφαρμογή των ΥΑΦ στην τοιχοποιία μπορεί να γίνει είτε με χρήση των ΥΑΦ αυτούσιων (σαν στρώμα υλικού μέσα στα υλικά του τοίχου), ή σαν συστατικό σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ή το γύψο (γυψοσανίδες ή σοβάς με ΥΑΦ). Η χρήση των ΥΑΦ σε γυψοσανίδα συνήθως γίνεται σε αναλογία 20-30% κατά βάρος. Ειδικά για τη χρησιμοποίηση οργανικών ΥΑΦ η χρήση τους σε συνδυασμό με μη αναφλέξιμα και πυρασφαλή υλικά εξασφαλίζει εν μέρει την μη αναφλεξιμότητα του τελικού προϊόντος. Η ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε τσιμέντο ή γύψο εξασφαλίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τη συγκράτηση του υλικού ακόμη και μετά την πλήρη υγροποίησή του, καθώς και την μη πρόσληψη υγρασίας από τον αέρα του περιβάλλοντος. Σε πολλές περιπτώσεις πριν την ενσωμάτωση του ΥΑΦ (πχ λιπαρά οξέα, ένυδρα άλατα) σε κάποιο δομικό υλικό είναι απαραίτητη η προσθήκη κάποιου καλύμματος στο ΥΑΦ. Για την κατηγορία των παραφινών πειραματικές μελέτες απέδειξαν τη συμβατότητά τους με το τσιμέντο ή το γύψο και γι' αυτό το λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί δομικά υλικά εμπλουτισμένα με παραφίνες.



**ΣΧΗΜΑ 7.23:** Τούβλο ενισχυμένο με σωλήνες ΥΑΦ

Το πλέον προσιτό δείγμα χρήσης των ΥΑΦ ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία τους είναι στην τοιχοποιία. Κατά τη θερινή περίοδο η θερμότητα από το περιβάλλον εισέρχεται στο κέλυφος του κτιρίου διαπερνώντας τα στρώματα των δομικών υλικών και αντιμετωπίζει τη θερμική αντίσταση της μόνωσης. Σε κοινή κατασκευή τοιχοποιίας όση θερμότητα διαπεράσει το στρώμα της μόνωσης θα εισέλθει στον εσωτερικό χώρο. Στην περίπτωση τοιχοποιίας με ΥΑΦ αυτή η θερμότητα δεν θα εισέλθει στο χώρο, καθώς θα αποθηκευτεί στο στρώμα του ΥΑΦ.



Στην χειμερινή περίοδο, ο αέρας του εσωτερικού χώρου έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από το εξωτερικό περιβάλλον. Αντίστοιχα λοιπόν, η στρώση ΥΑΦ αποθηκεύει όση θερμότητα έχει διαφύγει από τα στρώματα του τούβλου, του σοβά και της μόνωσης.[59-62]



**ΣΧΗΜΑ 7.24:** Συσκευασίες ΥΑΦ για κτιριακές εφαρμογές

Η εμπορική περιοχή των υλικών αλλαγής φάσης είναι γεμάτη από παραδείγματα εταιριών και οργανισμών οι οποίοι αποφάσισαν να ασχοληθούν με τα ΥΑΦ, ανέπτυξαν κάποια προϊόντα, τα διέθεσαν στο εμπόριο και για κάποιους λόγους τελικά οδηγήθηκαν στην οικονομική καταστροφή. Οι λόγοι είναι αρκετοί, άλλοι περισσότερο και άλλοι λιγότερο προφανείς, το ίδιο όμως σημαντικοί, όπως τελικά αποδείχθηκε, για τη βιωσιμότητα της επιχείρησης που τα αναπτύσσει. Αυτό σκιαγραφεί το πόσο λεπτομερή σχεδίαση και μελέτη προϋποθέτει ένα θερμικό σύστημα με ΥΑΦ.

Οι βασικότεροι λόγοι εμπορικής αποτυχίας προϊόντων ΥΑΦ :

- Κακή επιλογή υλικού, συχνά περιλαμβάνοντας χημικά τα οποία δεν εμφάνιζαν ομοιόμορφη τήξη εξ ορισμού, οπότε εμφανιζόταν μεγάλη απώλεια αποθηκευτικής ικανότητας ύστερα από συγκεκριμένο αριθμό κύκλων λειτουργίας, οδηγώντας σε αποσύνθεση του υλικού.
- Κακή επιλογή μεθόδου ή και υλικού συσκευασίας του ΥΑΦ, οδηγώντας σε διαβρωτικά φαινόμενα και μειωμένα επίπεδα στεγανότητας.
- Κακός σχεδιασμός, γεγονός που οδηγούσε στην κατασκευή προϊόντων τα οποία ήταν ασύμβατα με τα δομικά υλικά ή με το όποιο σύστημα για το οποίο το αρχικό προϊόν προοριζόταν.

Κατά τα τελευταία 30 χρόνια, η τεχνολογία επέτρεψε τη δημιουργία και την ανάπτυξη μικροσυσκευασμένων ΥΑΦ σε κάψουλες, μορφή η οποία είναι ιδανική για τη χρήση σε συνεργασία με δομικά υλικά οποιασδήποτε μορφής. Πλέον η χρήση τέτοιων υλικών θεωρείται δεδομένη σε κτίρια τα οποία σχεδιάζονται να είναι υψηλής ενεργειακής απόδοσης και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.

Παρ' ότι η έρευνα γύρω από τα πλεονεκτήματα κάθε μορφής ακόμα συνεχίζεται, φαίνεται πως τα ένυδρα άλατα έχουν μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα μαζί με μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι παραφίνες είναι επίσης εύφλεκτες, ενώ τα ένυδρα άλατα όχι. Κατά την τοποθέτησή τους σε τοίχους κτιρίων, δεν έχει παρατηρηθεί ότι τα ΥΑΦ εκλύουν βλαβερά αέρια, αλλά οι παραφίνες είναι σημαντικά τοξικότερες από τα ένυδρα άλατα. Οι πειραματικές ενδείξεις ύστερα από ενδελεχή εξέταση τείνουν να καταδείξουν την υπεροχή των

ένυδρων αλάτων σε βάρος των παραφινών όσον αφορά στη χρηστικότητα τους ως υλικά αλλαγής φάσης.[59-62]

Τα υλικά αυτά πρέπει να διαθέτουν συγκεκριμένες θερμοδυναμικές, κινητικές και χημικές ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες αναφέρονται στη συνέχεια.

#### Θερμοδυναμικές ιδιότητες

1. Θερμοκρασία τήξης μέσα στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας.
2. Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα για να παρέχει πρόσθετο απόθεμα αισθητής θερμότητας.
3. Υψηλή θερμική αγωγιμότητα στερεής και υγρής φάσης για να έχουμε αποτελεσματική φόρτιση και αποφόρτιση του συστήματος.
4. Μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης.
5. Ομοιόμορφη τήξη του υλικού αλλαγής φάσης για σταθερή αποθηκευτική ικανότητα του υλικού σε κάθε κύκλο τήξης/ πήξης.

#### Κινητικές ιδιότητες

1. Υψηλός βαθμός πυρηνοποίησης για να αποφευχθεί υπέρψυξη της υγρής φάσης.
2. Υψηλός βαθμός ανάπτυξης κρυστάλλων.

#### Χημικές ιδιότητες

1. Εντελώς αναστρέψιμος κύκλος ψύξης- τήξης.
2. Απουσία χημικής αποικοδόμησης μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων τήξης-ψύξης.
3. Απουσία διαβρωτικότητας στα υλικά κατασκευής.
4. Μη τοξικά, μη εύφλεκτα και μη εκρηκτικά υλικά για λόγους ασφαλείας.

### **7.12.2. Τοιχοποιία**

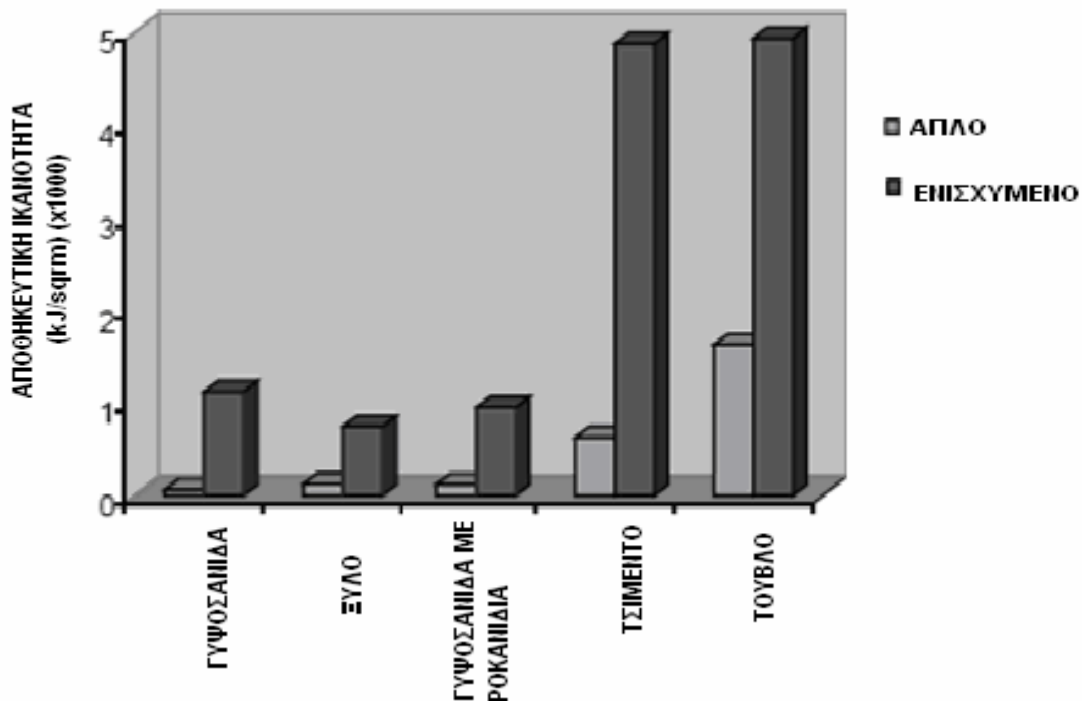
Παρότι έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες γύρω από πειράματα με χρήση διαφόρων ΥΑΦ σε διαφορετικούς τύπους τοίχων, δεν έχει έως τώρα κανείς καταλήξει σε μία οικουμενική μέθοδο χρήσης των ΥΑΦ σε τοίχους, η οποία να παρέχει γενικές κατευθύνσεις χρήσης και εγκατάστασης, καθώς και τεχνικά-θερμικά μεγέθη και γενικές οδηγίες για την τελική επιλογή του είδους, της ποσότητας και του τρόπου εφαρμογής του ΥΑΦ σε τοίχο, με βάση τις εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες..

Είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι η θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ καθορίζει τη βέλτιστη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας του τοίχου, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Σύμφωνα με ερευνητικά αποτελέσματα αποδεικνύεται πως ο αποδοτικότερος τρόπος ρύθμισης του τοίχου, επιτυγχάνεται με επιλογή ΥΑΦ του οποίου η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ κοντά με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία του τοίχου και όχι του περιβάλλοντος.

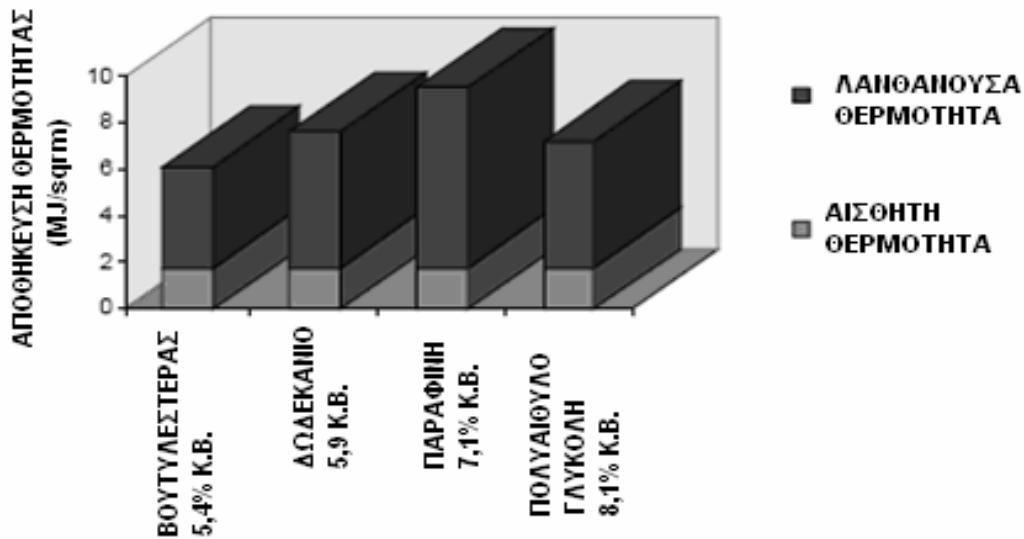
Εξισώνοντας τη θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ με τη μέση ημερήσια του τοίχου μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το μεγαλύτερο μέρος της αποθηκευτικής ικανότητας του ΥΑΦ, καθώς και να πετύχουμε την εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στον εσωτερικό χώρο. Αφού λοιπόν δύναται να υιοθετηθεί μία μόνο θερμοκρασία αλλαγής φάσης (χρήση ενός μόνο ΥΑΦ) αποδεικνύεται πως αυτή η θερμοκρασία θα πρέπει να κυμαίνεται γύρω από τη συνολική μέση θερμοκρασία του τοίχου, δηλαδή τη μέση τιμή της ημερήσιας θερμοκρασίας και την μέση τιμή της συνάρτησης της θερμοκρασίας του τοίχου σε σχέση με το πάχος του.

Για παράδειγμα ο αποδοτικός σχεδιασμός ενός νότιου εξωτερικού τοίχου ο οποίος χρησιμοποιείται για απορρόφηση ενέργειας ώστε να δύναται να παρέχει μία καθυστέρηση στο φαινόμενο μεταφοράς της θερμότητας της τάξης των 10 ωρών, απαιτεί παχύ στρώμα τσιμέντου 12-16in (31-41cm). Αυτός ο όγκος περιορίζει την ευελιξία του κατασκευαστή σε θέματα κάτοψης και γενικότερου σχεδιασμού εσωτερικού ή εξωτερικού και δεν συμβαδίζει με την ελαφρού τύπου κατασκευή που υιοθετείται στις κατοικίες τα τελευταία χρόνια. Επίσης, αφού η θερμότητα σε τέτοιες εφαρμογές αποθηκεύεται υπό μορφή αισθητής, βάσει της θερμοχωρητικότητας των υλικών του τοίχου, μπορεί πολύ εύκολα να παρατηρηθεί το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του χώρου, φαινόμενο το οποίο αντιτίθεται στη λεγόμενη ανθρώπινη θερμική άνεση και ως εκ τούτου ελαττώνει δραματικά τη χρηστικότητα του μελετούμενου χώρου.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα αυτά που προκύπτουν από τις κλασσικές εγκαταστάσεις των παθητικών ηλιακών συστημάτων. Σε συστήματα λανθάνουσα θερμότητας, χρησιμοποιείται ένα ΥΑΦ για να απορροφά ή να αποβάλλει αντίστοιχα, σημαντικό ποσό θερμότητας κατά τις μεταβάσεις φάσεων στις οποίες αυτό υποβάλλεται, ενώ η θερμοκρασία του παραμένει πρακτικά σταθερή. Η αποθηκευτική ικανότητα των κλασσικών οργανικών ΥΑΦ (παραφίνες, λιπαρά οξέα) είναι συνήθως μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ικανότητα των παραδοσιακών δομικών υλικών (τσιμέντο, πέτρα, τούβλο, ξύλο, κλπ), αναφορικά πάντα με την ίδια ποσότητα μάζας. Επομένως η ίδια αποθηκευτική ικανότητα επιτυγχάνεται με πολύ λιγότερη μάζα. [63-66]



**ΣΧΗΜΑ 7.25:** Σύγκριση της αποθηκευτικής ικανότητας απλής και ενισχυμένης εκδοχής κλασσικών δομικών υλικών.



**ΣΧΗΜΑ 7.26:** Αποθηκευτική ικανότητα τυπικού σκυροδέματος ενισχυμένου με διαφορετικό ΥΑΦ ανά περίπτωση

Όπως αποδεικνύεται, είναι δυνατή η σημαντική μείωση του πάχους του τοίχου, με συγκριτικά παρόμοιες θερμικές ιδιότητες, με τη χρήση παραφίνης σε τυπικό τοίχο Trombe. Αυτό ανοίγει νέους ορίζοντες στη χρήση ΥΑΦ σε ελαφρές κατασκευές με παθητικά ηλιακά συστήματα. Η χρήση ΥΑΦ με κατάλληλο σημείο τήξης εξομαλύνει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο εσωτερικό του χώρου, ελαττώνει την πιθανότητα εμφάνισης υπερθέρμανσης στον εσωτερικό χώρο και γενικότερα ενισχύει την αίσθηση θερμικής άνεσης στο εσωτερικό.

Ακόμα, η πρακτικά σταθερή θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο εσωτερικό του κτιρίου, ελαττώνει την πιθανότητα εμφάνισης υψηλού θερμικού φορτίου θέρμανσης ή ψύξης, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη χρήση μικρότερων θερμαντικών και κλιματιστικών σωμάτων, που ως γνωστό λειτουργούν με καλύτερο βαθμό απόδοσης συγκριτικά με τις μεγαλύτερες μονάδες.

Τις τελευταίες δεκαετίες υπήρξαν αρκετές μελέτες που κατέδειξαν τα οφέλη από τη χρήση ΥΑΦ σε κτίρια. Οι μελέτες αυτές περιλαμβάνουν παραδείγματα ενσωμάτωσης τέτοιων υλικών στα παραδοσιακά δομικά υλικά, όπως γυψοσανίδες και μπλοκ τσιμέντου (τσιμεντόλιθοι), για εξοικονόμηση ενέργειας και ενίσχυση της αίσθησης θερμικής άνεσης. Εξετάστηκαν υλικά όπως λιπαρά οξέα, οκταδεκάνιο και συγκεκριμένοι τύποι παραφίνης με σημεία τήξης κοντά στη θερμοκρασία δωματίου.

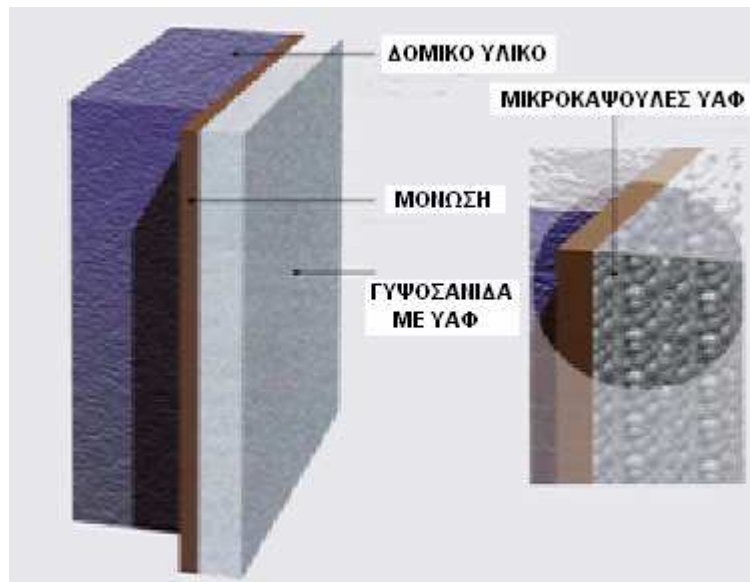
Η χρήση ΥΑΦ σε γυψοσανίδες μπορεί να καταλήξει σε απόσβεση επένδυσης λόγω οικονομίας στην κατανάλωση ενέργειας μέσα σε τρία με πέντε χρόνια. Ακόμα και αν υπάρχουν αρκετές επιβεβαιωμένες επιτυχείς προσπάθειες, υπάρχει ακόμα ανάγκη κατάληξης σε ένα οικουμενικό μοντέλο μελέτης και εφαρμογής ΥΑΦ στα δομικά υλικά ικανό να εφαρμοστεί και να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα-συμπεράσματα σε πραγματικές μικρότερης ή μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές.

Η αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας προσπάθειας εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής, από τα χαρακτηριστικά του φορτίου του εξεταζόμενου χώρου και τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του επιλεγμένου ΥΑΦ. Αριθμός μελετών ασχολήθηκε με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως για κάθε δεδομένη εφαρμογή με γνωστά κλιματολογικά μεγέθη καθώς και γνωστές πληροφορίες γύρω από το προφίλ του φορτίου, η επιτυχία του συστήματος βασίζεται στο μεγαλύτερο βαθμό της στην επιλογή του σημείου τήξης του ΥΑΦ.

Η εύρεση του κατάλληλου σημείου τήξης είναι μία πρόκληση για κάθε τέτοια εφαρμογή. Προτείνεται γενικά ότι η ημερήσια αποθηκευόμενη ενέργεια από ένα ΥΑΦ μεγιστοποιείται όταν το σημείο τήξης του είναι κοντά στη μέση ημερήσια θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο χώρο. [63-69]

#### 7.12.2.1. Γυψοσανίδα με ΥΑΦ

Διάφορα ΥΑΦ, συνήθως κάποια παραφίνη μπορούν να προστεθούν σε γυψοσανίδα ή σοβά ή κάποιο άλλο επενδυτικό υλικό τοιχοποιίας, δημιουργώντας ένα είδος δομικού υλικού που λειτουργεί σαν αποθηκευτικό υλικό. Το ΥΑΦ στερεοποιείται ελευθερώνοντας θερμότητα όταν είναι διαθέσιμες ψυκτικές πηγές, και υγροποιείται απορροφώντας θερμότητα όταν απαιτείται ψύξη. Τα ΥΑΦ προσφέρουν σημαντική αλλαγή στη θερμοχωρητικότητα μιας εγκατάστασης και για καθαρές ουσίες ελευθερώνουν την αποθηκευμένη θερμότητα με σχεδόν μηδενική αλλαγή στη θερμοκρασία τους.



**ΣΧΗΜΑ 7.27:** Εφαρμογή ενισχυμένης γυψοσανίδας σε τοίχο

Τα ΥΑΦ επιτρέπουν στην αποθήκευση θερμότητας να γίνει μέρος των κτιρίων, επιτρέποντας σημαντική αποθήκευση θερμότητας χωρίς αλλαγή θερμοκρασίας δωματίου. Ακριβώς επειδή η θερμότητα αποθηκεύεται μέσα στο κτίριο, εκεί όπου λαμβάνουν χώρα και υπολογίζονται τα φορτία, και όχι εξωτερικά, δεν απαιτείται επιπλέον μεταφορά ενέργειας.

Η αυξημένη αποθηκευτική ικανότητα της ενισχυμένης γυψοσανίδας, μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία δωματίου κοντά στο ανώτατο όριο ανθρώπινης θερμικής άνεσης, χωρίς μηχανικό σύστημα κλιματισμού. Σε περιοχές όπου λόγω κλίματος, κατά τη διάρκεια της ημέρας έχουμε μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα εξαερισμού κατά τη διάρκεια της νύχτας για να απομακρύνει την αποθηκευμένη θερμότητα από τη γυψοσανίδα.

Αναγνωρίστηκαν αμέσως οι προοπτικές εφαρμογής μιας τέτοιας μεθόδου καθώς επίσης και τα πιθανά οφέλη από κάτι τέτοιο, αφού πλέον στις ΗΠΑ μόνο κατασκευάζονται πάνω από 7 δισεκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα γυψοσανίδας ετησίως. Επίσης αναγνωρίστηκαν οι ικανότητες μιας τέτοιας εφαρμογής στο να

ελαττώνει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εντός του χώρου και βέβαια να ενισχύει τη θερμική άνεση.

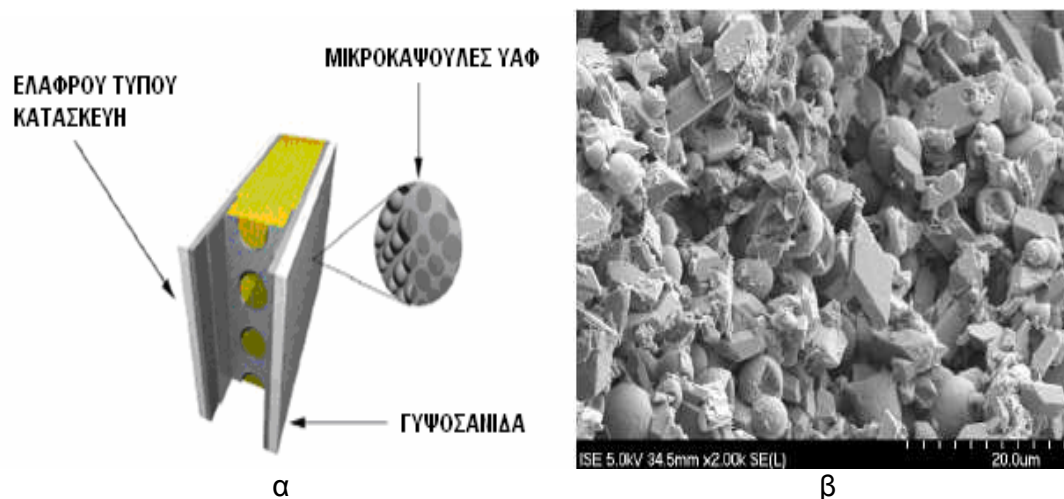
Ακολούθησαν άλλα ερευνητικά προγράμματα τα οποία πειραματίστηκαν με τη θερμοκρασία τήξης, το υλικό και τις μεθόδους μικροσυσκευασίας, καθώς και την επίδραση του υλικού στη γυψοσανίδα στους τομείς της δομικής αντοχής, εξωτερικής επιφάνειας, ασφάλειας και λειτουργικότητας.

Οι ερευνητές κατέληξαν σε δύο κύριους τρόπους συνδυασμού της κλασσικής γυψοσανίδας με ΥΑΦ:

Η πρώτη μέθοδος, αποτελεσματική αν και κάπως πρωτόγονη, υπαγορεύει τη βύθιση της έτοιμης γυψοσανίδας σε λεκάνη με υγρό ΥΑΦ (συνήθως παραφίνη), ώστε το πορώδες υλικό της γυψοσανίδας να απορροφήσει το ΥΑΦ. Από πειράματα προέκυψε πως μία τυπική δομή γυψοσανίδας μπορεί να απορροφήσει περίπου 30% του βάρους της σε λιγότερο από 10 λεπτά.

Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει τη μικροσυσκευασία του ΥΑΦ σε κάψουλες σφαιρικής μορφής διαμέτρου 3μm. Τα σφαιρίδια είναι από HDPE και έχουν σκοπό να συγκρατούν το ΥΑΦ όταν αυτό βρίσκεται στην υγρή φάση. Τα σφαιρίδια ανακατεύονται με την πρώτη ύλη της γυψοσανίδας κατά το στάδιο της κατασκευής και διαμόρφωσης της τελευταίας.

Μερίδα ερευνών επίσης επικεντρώθηκε στη μελέτη αναφλεξιμότητας του τελικού προϊόντος. Δοκιμές απέδειξαν ότι ο περιορισμός του κατά βάρους ποσοστού του προστιθέμενου ΥΑΦ στο 15 με 20% καθώς επίσης και η επίστρωση της γυψοσανίδας με πυροπροστατευτικό υλικό, ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο ανάφλεξης της γυψοσανίδας, πράγμα ούτως ή άλλως ελάχιστα πιθανό, κυρίως λόγω της χαμηλής τάσης ατμών των παραφινούχων ουσιών.



**ΣΧΗΜΑ 7.28:** Σύγχρονη ελαφρού τύπου κατασκευή, εφοδιασμένη με γυψοσανίδες με ΥΑΦ(α) και ηλεκτρονική μικρογραφία της γυψοσανίδας(β)

Τα ΥΑΦ μπορούν να γίνουν ενεργό κομμάτι της οικοδομής όχι μόνο σε κατοικίες αλλά σε όλα τα κτίρια γενικότερα, με την ευρεία χρήση τους στα δομικά υλικά. Μπορούν να παρέξουν σταθερές εσωτερικές συνθήκες χωρίς μηχανική κλιματιστική υποβοήθηση σε πολλές περιπτώσεις κτιρίων με έντονη δραστηριότητα, αλλά κυρίως με έντονες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του χώρου:[67-71]

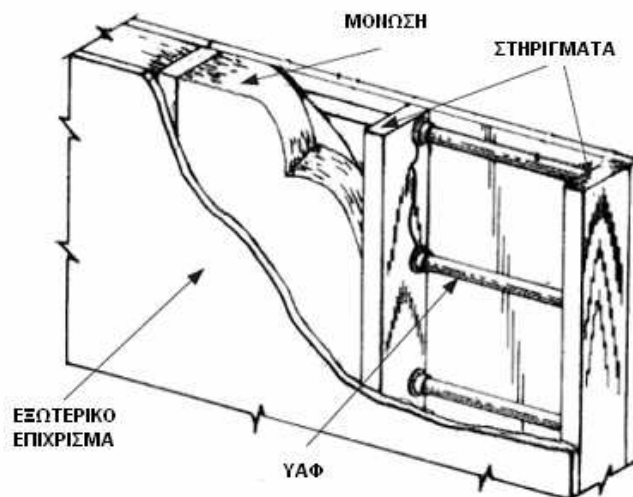
- Αίθουσες διδασκαλίας, αμφιθέατρα, αίθουσες συνεδριάσεων
- Κέντρα διασκέδασης, εστιατόρια, αίθουσες χορού, αίθουσες κινηματογράφου
- Αθλητικές αίθουσες, κλειστά γήπεδα ή στάδια
- Γραφεία

Η χρήση τους είναι τόσο αποτελεσματική, που με λίγο πιο προσεκτική μελέτη θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε χώρους όπου η διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική, όπως:

- Αποθήκες φαρμάκων ή άλλων χημικών
- Αποθήκες τροφίμων των οποίων η διατήρηση απαιτεί θερμοκρασίες σταθερά χαμηλότερες από ένα συγκεκριμένο όριο.
- Αίθουσες ηλεκτρονικών υπολογιστών ή άλλου ευαίσθητου (και συνήθως ακριβού) ηλεκτρονικού εξοπλισμού.
- Αίθουσες νοσοκομείων, χειρουργεία

#### **7.12.2.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τοίχου με ΥΑΦ**

Οι τοίχοι με μόνωση που περιέχει ΥΑΦ έχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους και τα αντίστοιχα υλικά μόνωσης στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Επειδή η επιφάνεια που εκτίθεται είναι μεγάλη και το ΥΑΦ απορροφά θερμότητα σε ένα μικρό μόλις θερμοκρασιακό εύρος, πρέπει το τμήμα που περιέχει το ΥΑΦ να μην έρχεται σε άμεση επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία. Η μόνωση με ΥΑΦ έχει πολύ μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά είδη μόνωσης και προσφέρει εξαιρετική μετάδοση θερμότητας. Δεν έχει ιδιαιτερότητες ως προς την εγκατάστασή του, οπότε και το όποιο επιπλέον κόστος εγκατάστασης είναι πολύ μικρό.



**ΣΧΗΜΑ 7.29:** Σχεδιάγραμμα τοίχου με ενισχυμένη με ΥΑΦ μόνωση

Παρ' όλ' αυτά υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα, όπως η ιδιαιτερότητα σχεδιασμού για κάθε ξεχωριστό κλίμα, ένα σημείο τήξης μπορεί να εξυπηρετεί άριστα ένα κλίμα, αλλά το πιθανότερο είναι ότι δεν εξυπηρετεί καθόλου όλα τα άλλα.

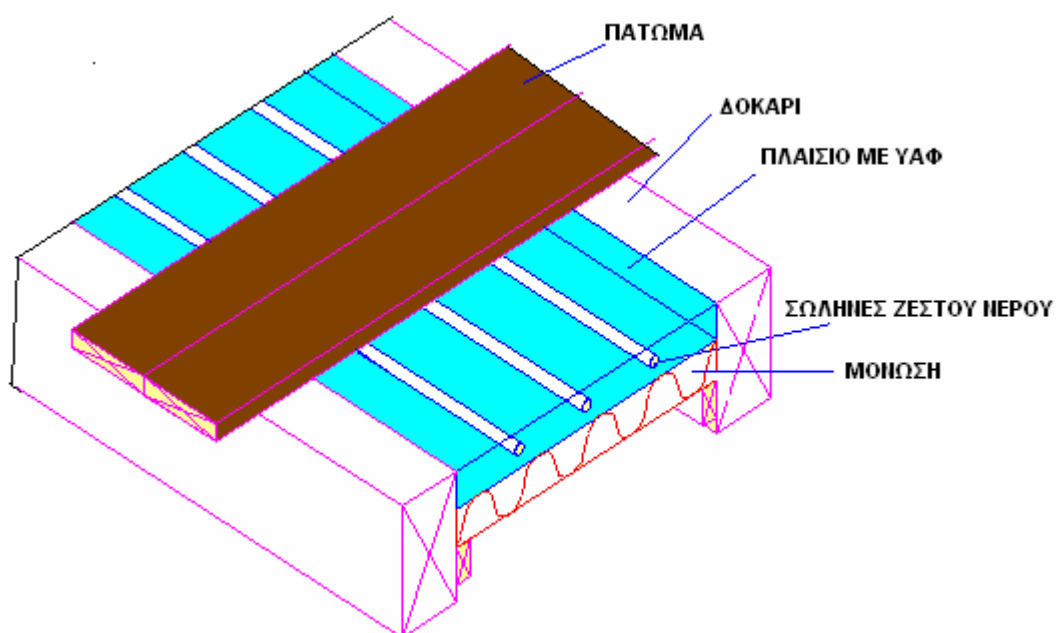
Όπως είναι εύκολα κατανοητό, η εύρεση της κατάλληλης θερμοκρασίας είναι διπλά (κυριολεκτικά) δύσκολο πρόβλημα όταν μιλάμε για κλίματα με ανάγκη και για ψυκτικές και για θερμαντικές συσκευές. Οι κατασκευαστές δεν είναι διατεθειμένοι να περιπλέξουν την παραγωγική τους διαδικασία, ώστε να λάβουν υπ' όψη τις κλιματολογικές ιδιαιτερότητες. Η διαδικασία κατά την οποία η εμφάνιση της γυψοσανίδας γίνεται στον τόπο τοποθέτησής της, ενδέχεται να χωλαίνει από πλευράς ελέγχου τελικής ποιότητας. Άλλα σημεία που ενδεχομένως χρίζουν μνείας ή προσοχής, είναι η εμφάνιση επιφανειακών ασταθών ατελειών ("bloomings"), βραδυφλεγία, διάβρωση μετάλλων, οσμή, και τα «παραδοσιακά» θέματα σε τέτοιου είδους εφαρμογές, όπως για παράδειγμα η ικανότητα της μπογιάς να συγκρατείται επί του τοίχου (της γυψοσανίδας).

Υπάρχουν σπουδαίες προοπτικές για την επικράτηση των γυψοσανίδων με ΥΑΦ. Παρ' όλ' αυτά υπάρχουν ακόμα αρκετές τεχνικές και διάφορα θέματα οποία πρέπει να τεθούν υπό εξέταση, προτού οι γυψοσανίδες με ΥΑΦ μπουν σε γραμμή παραγωγής και γίνουν κοινώς αποδεκτές σαν προϊόν. [72]

### 7.12.3. Συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ΥΑΦ

Σήμερα η ενδοδαπέδια θέρμανση παρουσιάζει το μεγάλο πλεονέκτημα της ομοιόμορφης θερμικής άνεσης σε ολόκληρο το χώρο που θερμαίνεται, για ένα φάσμα θερμοκρασιών περίπου 25-28°C. Το περιβάλλον που διαμορφώνει η ενδοδαπέδια θέρμανση είναι πολύ φιλικό προς τον άνθρωπο, το ίδιο το σύστημα δεν παρουσιάζει προβλήματα ή κινδύνους για τους χρήστες και επίσης δεν παρεμβαίνει στην αισθητική του χώρου, κάτι που καθιστά την εφαρμογή κατάλληλη για οποιουδήποτε είδους εσωτερικό χώρο.

Η ενδοδαπέδια θέρμανση μπορεί να εφαρμοστεί με τα συστήματα ύδατος (θερμά-υγρά) και με τα ηλεκτρικά συστήματα (ξηρά). Στα συστήματα ύδατος, το νερό θερμαίνεται κυρίως με την καύση πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Συνεπώς η εφαρμογή των ΥΑΦ δεν προσφέρει κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα αν έχουμε σαν πρώτη ύλη συμβατικά καύσιμα. Αυτό δεν συμβαίνει και στην περίπτωση που η ενδοδαπέδια χρησιμοποιείται για να συνδυαστεί με κάποιο σύστημα που θα εκμεταλλεύεται κάποια διαφορετική πηγή ενέργειας, όπως η ηλιακή.

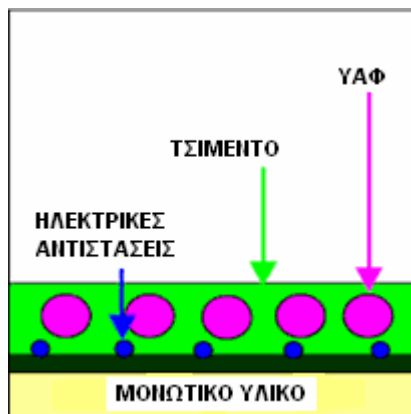


**ΣΧΗΜΑ 7.30:** Διάταξη υγρού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης



Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση νερού. Αν για τη χρονική στιγμή που θερμαίνεται το νερό δεν υπάρχουν απαιτήσεις θέρμανσης του χώρου ή/και ζεστού νερού χρήσης, τότε η θερμική ενέργεια θα πρέπει να αποθηκευτεί. Η αποθήκευση αυτή μπορεί να γίνει στο ΥΑΦ που βρίσκεται στο δάπεδο, αφού προορίζεται για τη θέρμανση του χώρου. Η φόρτιση του ΥΑΦ εξασφαλίζει θερμότητα για μετέπειτα χρήση.

Από την άλλη πλευρά, τα ηλεκτρικά συστήματα, μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα ΥΑΦ, εκμεταλλευόμενα το χαμηλό κοστολόγιο του ηλεκτρισμού στις ώρες μη αιχμής. Στο σύστημα αυτό, χρησιμοποιούνται κυρίως σφαιρίδια ΥΑΦ που καλύπτουν τις ηλεκτρικές αντιστάσεις.[73-75]



**ΣΧΗΜΑ 7.31** :Διάταξη ξηρού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης

Η λειτουργία της εγκατάστασης, προορίζεται κυρίως για τις ώρες μη αιχμής, προσφέροντας θερμότητα από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Τη θερμότητα αυτή πρώτα θα απορροφήσουν οι κόκκοι του ΥΑΦ που περιβάλλουν τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Η θερμότητα αυτή, αρχικά θα αποθηκευτεί με τη μορφή της αισθητής θερμότητας στο ΥΑΦ, μέχρι να φτάσει το σημείο τήξης του. Μια αντιπροσωπευτική τιμή για το σημείο τήξης των ΥΑΦ για τις εν λόγω εφαρμογές είναι οι 28°C. Μόλις το ΥΑΦ φτάσει το σημείο τήξης του, τότε αρχίζει να λιώνει, αποθηκεύοντας θερμική ενέργεια υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Πρακτικά, ένα μικρό ποσοστό από την παραγόμενη στις αντιστάσεις θερμότητα διαφεύγει από το ΥΑΦ και κατευθύνεται προς τη βάση του πατώματος, πριν ακόμα το ΥΑΦ αποκτήσει την ονομαστική λανθάνουσα θερμότητα. Η ροή θερμότητας προς την αντίθετη κατεύθυνση συναντά τη μεγάλη θερμική αντίσταση της θερμομόνωσης και είναι ανεπιθύμητη.

Η λειτουργία του συστήματος συνεχίζει φορτίζοντας τους κόκκους με τα ΥΑΦ μέχρι να αποθηκευτεί η μέγιστη λανθάνουσα θερμότητα στο σύστημα. Από εκείνη τη στιγμή και μετά, όλη η θερμότητα που παράγεται στις ηλεκτρικές αντιστάσεις κατευθύνεται στο χώρο, αφού έχει πρώτα αποθηκευτεί στη βάση του δαπέδου της κατασκευής. Η διαδικασία που αναλύθηκε παραπάνω εμφανίζει ως χρονική καθυστέρηση το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που μπαίνει σε λειτουργία η εγκατάσταση θέρμανσης, μέχρι τη στιγμή που θα φορτιστεί πλήρως το ΥΑΦ. Αυτήν την χρονική καθυστέρηση πρέπει να εκμεταλλευτούμε για να επιτύχουμε μείωση του κόστους λειτουργίας της εγκατάστασης.

Όταν οι ηλεκτρικές αντιστάσεις σταματήσουν να λειτουργούν, το σύστημα συνεχίζει να λειτουργεί. Η θερμότητα που προσφέρεται στο χώρο από το σύστημα προέρχεται από την αποφόρτιση των κόκκων. Με άλλα λόγια το ΥΑΦ αρχίζει να αποφορτίζεται, προσφέροντας στο χώρο τη λανθάνουσα θερμότητα που είχε αποθηκεύσει από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Το χρονικό διάστημα που θα συνεχίσει

να λειτουργεί το σύστημα μετά από τη διακοπή λειτουργίας των αντιστάσεων, είναι ο χρόνος αποφόρτισης του ΥΑΦ.

Σήμερα στην ενδοδαπέδια θέρμανση, χρησιμοποιείται ένα στρώμα από θερμομπετόν που καλύπτει τις ηλεκτρικές αντιστάσεις του συστήματος. Η καινοτομία στον τομέα των κατασκευών, έχει να κάνει με την αντικατάσταση του θερμομπετόν, από το στρώμα κόκκων του ΥΑΦ. Το κόστος των ΥΑΦ για την ενδοδαπέδια θέρμανση δεν είναι σημαντικό, καθώς τοποθετούνται παραφίνες (μικρό κόστος) χωρίς συσκευασία για να επιβαρύνει το κόστος.[73-75]



**ΣΧΗΜΑ 7.32:** Κόκκοι και διάταξη ΥΑΦ για αντικατάσταση θερμομπετόν σε εγκατάσταση ενδοδαπέδιας θέρμανσης

Τα αποτελέσματα από τη χρήση των ΥΑΦ κρίνονται ιδιαίτερα θετικά και η χρήση των καινοτομικών συστημάτων που περιλαμβάνουν τα ΥΑΦ φαίνεται να κερδίζει έδαφος στον κτιριακό τομέα, ιδίως έπειτα από την πολύ επιτυχημένη εφαρμογή των ΥΑΦ τοιχοποιία.

## 8. Συμπεράσματα

Η εξέταση ενός υλικού όταν αυτό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σαν ΥΑΦ σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, πρέπει να έχει τρεις βασικούς άξονες:

- Να είναι υλικό το οποίο να αλλάζει φάση από τη στερεή στην υγρή και αντίστροφα μέσα στα θερμοκρασιακά πλαίσια της εφαρμογής και να αποθηκεύει ικανοποιητική ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας.
- Κατάλληλο δοχείο για το υλικό αυτό.
- Μία κατάλληλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας για τη μεταφορά της θερμότητας από το σύστημα προς το δοχείο με το ΥΑΦ και αντίστροφα.

Υπάρχουν επίσης πολλοί άλλοι παράγοντες που θα έπρεπε να εξεταστούν κατά την ανάπτυξη τέτοιου συστήματος, όπως για παράδειγμα δεν είναι αρκετή η μελέτη και κατάληξη σε υλικό κατάλληλων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, αλλά το υλικό αυτό θα πρέπει να είναι συμβατό και με τα υλικά του συστήματος και κυρίως με τα υλικά του δοχείο στο οποίο αυτό συσκευάζεται.

Η εμπειρία από τον σχεδιασμό θερμικών συστημάτων αποθήκευσης, από τα πρώτα ανεπιτυχή, ή μη αποδοτικά συστήματα, μέχρι τα σύγχρονα, προκύπτει ότι υπάρχουν μερικοί βασικοί άξονες πάνω στους οποίους πρέπει να κινηθεί ο σχεδιαστής του συστήματος και συγκεκριμένα σημεία τα οποία χρίζουν προσοχής.

Ένα από τα σημαντικότερα σημεία τα οποία οι πρώτοι σχεδιαστές το παρέβλεπαν, ήταν η ανάλυση του υποψήφιου υλικού και η μελέτη της συμπεριφοράς του ύστερα από συγκεκριμένο αριθμό κύκλων.

Άλλο ένα σημείο το οποίο πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα είναι η δοκιμή αντοχής και διάβρωσης του δοχείου στο οποίο θα βρίσκεται το ΥΑΦ. Πολλές εφαρμογές απέτυχαν να αποδώσουν τα αναμενόμενα όταν κυκλοφόρησαν στο εμπόριο, γιατί τα προηγούμενα δεν είχαν προβλεφθεί, και το ΥΑΦ κατέστρεφε το δοχείο του πιο γρήγορα από τη διάρκεια ζωής του ΥΑΦ.

Από μελέτες και αρκετά επιτυχημένα, πλέον, εμπορικά συστήματα, φαίνεται πως ένα από τα πλέον κατάλληλα υλικά συσκευασίας είναι το υψηλής πυκνότητας πολουρεθάνιο ([HDPE]-high density polyurethane).

## 9. Βιομηχανικές εγκαταστάσεις αποθήκευσης θερμότητας

### 9.1 Γενικά

Ο όρος αποθήκευση θερμικής ενέργειας αναφέρεται στο πλήθος εκείνων των τεχνολογικών εφαρμογών που σκοπός τους είναι η αποθήκευση ενέργειας υπό μορφή θερμότητας σε θερμικούς ταμιευτήρες με σκοπό την μετέπειτα χρησιμοποίησή της. Χρησιμοποιούνται για να εξομαλύνουν την ενεργειακή ζήτηση μεταξύ ημέρας και νύχτας. Ο δε θερμικός ταμιευτήρας μπορεί να διατηρεί μια θερμοκρασία ανώτερη ή κατώτερη αυτής του περιβάλλοντος.

Τα συστήματα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (ΑΘΕ) περιλαμβάνουν και εφαρμογές ψύξης και θέρμανσης. Ένα ΑΘΕ θέρμανσης προσθέτει ενέργεια στο μέσο αποθήκευσης, ενώ ένα ΑΘΕ ψύξης, αφαιρεί ενέργεια από το μέσο, το οποίο είναι συνήθως περιορισμένο σε κάποιο ταμιευτήρα ή κάποιο δοχείο.

Τα ΑΘΕ ψύξης χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, σε κλιματιστικές εφαρμογές: τη νύχτα η φθηνή ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για να φορτιστεί το δοχείο με κρύο υλικό, το οποίο κατά τη διάρκεια της ημέρας, θα ικανοποιήσει σημαντικό μέρος του ψυκτικού φορτίου. Το μέσο αποθήκευσης ψύχεται στον ψύκτη και αποθηκεύεται στο μονωμένο δοχείο για μετέπειτα χρήση. Όταν απαιτείται ψύξη, ο ατμοποιητής την παράγει εκμεταλλευόμενος τη θερμοδυναμική κατάσταση του μέσου αποθήκευσης χρησιμοποιώντας το από το δοχείο. Τα συστήματα με ΥΑΦ είναι περισσότερο ακριβά από τα συστήματα ψυχρού νερού, αλλά είναι εύκολα στη χρήση και στη συντήρηση και απαιτούν πολύ λιγότερο χώρο.

Μέσο αποθήκευσης	Αποθηκευτική Ικανότητα	Σημειώσεις
Πάγος	334,000 J/kg	+ λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες + χαμηλή απαίτηση χώρου
Κρύο νερό	40,000 J/kg	+ για συνήθεις θερμοκρασίες - υψηλή απαίτηση χώρου
ΥΑΦ	160,000 J/kg	+ για συνήθεις θερμοκρασίες + χαμηλή απαίτηση χώρου

**ΣΧΗΜΑ 9.1:** Μέσα αποθήκευσης συστημάτων ΑΘΕ

Η επικρατούσα σήμερα εφαρμογή είναι αυτή η οποία κατά τη διάρκεια της νύχτας παράγει πάγο, ή διαφορετικά κρύο νερό ή κάποιο άλλο εύτηκτο διάλυμα, το οποίο μετά χρησιμοποιείται κυρίως σε κλιματιστικές εγκαταστάσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας κατέστη δυνατή εξ αιτίας της μεγάλης λανθάνουσας θερμότητας τήξης του νερού. Ένας μετρικός τόνος νερού, δηλαδή ένα κυβικό μέτρο μπορεί να αποθηκεύσει 334 MJ ενέργειας.[76,77]

#### 9.1.1 Κλιματιστικές εγκαταστάσεις

Η πλέον διαδεδομένη εφαρμογή είναι αυτή της μεγάλης κλίμακας κλιματιστικών εφαρμογών (μεγάλα κτίρια ή ολόκληρα συγκροτήματα εγκαταστάσεων) ή στα συστήματα κρύου νερού. Οι κλιματιστικές εγκαταστάσεις τέτοιου είδους κτιρίων είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για το φορτίο αιχμής, ιδίως τις ζεστές καλοκαιρινές ημέρες, όπου ούτως ή άλλως οι κλιματιστικές εγκαταστάσεις εκ κατασκευής αποδίδουν σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Σε τέτοιες εγκαταστάσεις ένας

σχετικά μικρός ψύκτης μπορεί να παράξει μία ποσότητα πάγου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το νερό κυκλοφορεί διαμέσου του πάγου με αποτέλεσμα να υπάρχει κρύο νερό, το οποίο υπό άλλες συνθήκες θα ήταν το φορτίο που θα καλείτο να καλύψει η κλιματιστική εγκατάσταση.

Ένα επιμέρους σύστημα αποθήκευσης ελαττώνει το κόστος της εγκατάστασης αν οι ψύκτες δουλεύουν επί 24ώρου βάσεως. Τη νύχτα παράγουν πάγο, ο οποίος κατά τη διάρκεια της ημέρας χρησιμοποιείται για να ψύξει το νερό ανακυκλοφορίας του κλιματιστικού συστήματος. Ένα τέτοιο σύστημα συνήθως λειτουργεί σε φάση δημιουργίας πάγου 16 με 18 ώρες την ημέρα και σε φάση ψύξης νερού περίπου 6. Το κόστος ελαττώνεται αφού πλέον οι ψύκτες χρειάζεται να έχουν το μισό μέγεθος από μία κλασσική εγκατάσταση.

Η απόδοση ψυκτών κλιματισμού μετράτε από τον συντελεστή συμπεριφοράς τους (COP). Θεωρητικά, τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορούν να έχουν ακόμα πιο αποδοτικούς ψύκτες επειδή η θερμότητα απορρίπτεται στον περισσότερο δροσερό νυχτερινό αέρα, παρά στον ζεστότερο ημερήσιο. Στην πράξη όμως αυτό το πλεονέκτημα αντισταθμίζεται από τις θερμικές απώλειες κατά τη διαδικασία σχηματισμού και τήξης του πάγου.

Ακόμα μερικά πλεονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι ότι από τη στιγμή που υπάρχει εξοικονόμηση ενέργειας με τη χρήση αυτής της μεθόδου, εισάγεται λιγότερο καύσιμο από κάθε χώρα, καταναλώνεται λιγότερο καύσιμο γενικότερα και υπάρχουν σημαντικά ωφέλη ως προς την προστασία του περιβάλλοντος αφού όλα τα παραπάνω συνεπάγονται λιγότερη ρύπανση.

Μία νέα άποψη σε αυτές τις τεχνολογίες χρησιμοποιεί τον πάγο σαν συμπυκνωτικό για το ψυκτικό μέσο μιας διάταξης. Σε αυτή την περίπτωση, κλασσικό ψυκτικό μέσο εισάγεται σε σωλήνες όπου και χρησιμοποιείται. Αντί λοιπόν να υπάρχει χρήση μηχανικού συμπιεστή για την επαναφορά του ψυκτικού στην υγρή φάση, όπως συνηθίζεται, χρησιμοποιείται η χαμηλή θερμοκρασία του πάγου για να εκτελέσει αυτή τη διαδικασία. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει στα υπάρχοντα κλασσικά συστήματα κλιματισμού να μετατραπούν σε συστήματα αποθήκευσης, κάτι το οποίο ήταν δύσκολο να επιτευχθεί με την έως τώρα τεχνολογία συστημάτων κρύου νερού. [76,77]

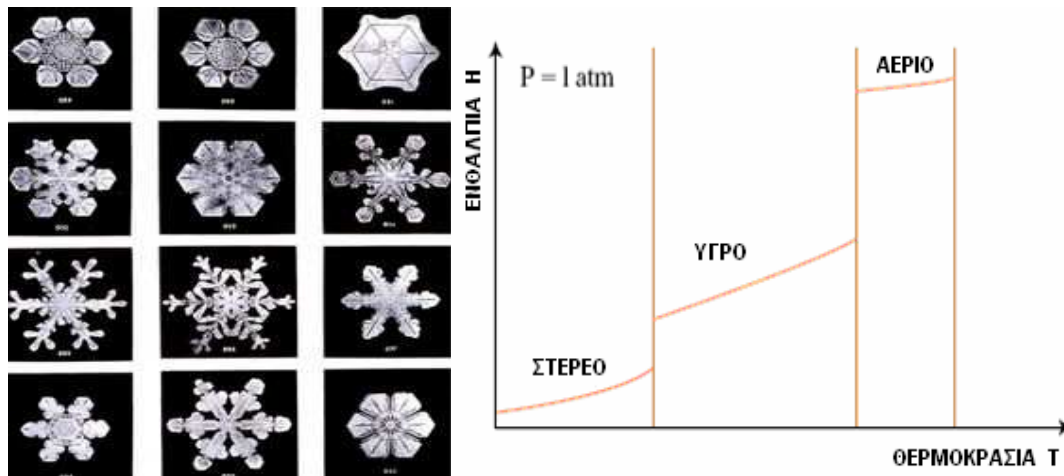
### **9.1.2 Συστήματα βελτίωσης απόδοσης επίγειων στροβιλομηχανών**

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε εφαρμογές ψύξης του αέρα εισαγωγής σε στροβιλομηχανές. Αντί να αυξάνεται η ηλεκτρική ζήτηση τις νυχτερινές ώρες, αυτή η τεχνική αυξάνει την παραγωγική ικανότητα της εγκατάστασης. Για την παραγωγή του πάγου κατά τις νυχτερινές ώρες, ο στρόβιλος είναι συχνά συνδεδεμένος με τον μηχανικό συμπιεστή ενός μεγάλου ψύκτη. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, νερό κυκλοφορεί διαμέσω του πάγου, ψύχεται και οδηγείται μέσω σωλήνων στην είσοδο της μηχανής σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Έτσι επιτυγχάνεται η ψύξη του αέρα εισαγωγής σε θερμοκρασίες κοντά στο σημείο στερεοποίησης του νερού, πράγμα που σημαίνει ότι η πυκνότητα του αέρα αυξάνει, άρα ο στρόβιλος απορροφά μεγαλύτερη ποσότητα εργαζόμενου μέσου, άρα επιτυγχάνεται περισσότερη παραγωγή ενέργειας και επομένως περισσότερο αποδοτική παραγωγή ενέργειας.[76,77]

## 9.2. Πάγος

### 9.2.1 Γενικά

**Πάγος** είναι το κοινό όνομα που δίνεται σε κάθε ένα από τα 14 διαφορετικά είδη στερεής μορφής του νερού. Παρ' όλ' αυτά συνήθως περιγράφει τη μορφή  $I_h$ , η οποία είναι και η πλέον άφθονη. Είναι μία κρυσταλλική στερεή μορφή, η οποία μπορεί να είναι διάφανη ή να έχει ένα λευκό-ιώδες χρώμα, ανάλογα με την περιεκτικότητα του υγρού σε ακαθαρσίες ή εγκλωβισμένο αέρα. Άλλου είδους ακαθαρσίες, όπως το χρώμα, μπορεί να αλλάξουν εντελώς το χρώμα του πάγου.



**ΣΧΗΜΑ 9.2:** Εξαγωνικοί κρύσταλλοι πάγου και διάγραμμα ενθαλπίας του νερού για τις τρεις φάσεις του

Η πλέον συνήθης αλλαγή φάσης του πάγου συντελείται κάτω από τους  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $273.15\text{ K}$ ,  $32\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) σε κανονική πίεση μίας ατμόσφαιρας. Παρ' όλ' αυτά μπορεί να στερεοποιηθεί κατ' ευθείαν από την αέρια φάση, χωρίς να περάσει από την υγρή, υπό μορφή παγετού. Ο πάγος εμφανίζεται σε διάφορες μορφές, όπως χαλάζι, παγετώνες κλπ. Παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στα κλιματολογικά φαινόμενα, καθώς ανακλά το 90% των ηλιακών ακτίνων που φτάνουν στη Γη. Επίσης, τα παγόβουνα που αποσπώνται από τις παγωμένες μάζες των πολικών περιοχών έχουν ρυθμιστικό ρόλο σε φαινόμενα όπως η μέση θερμοκρασία του πλανήτη (και οι διαταραχές της), η παγκόσμια υδάτινη στάθμη και γενικότερα στον κύκλο του νερού.[78]

### 9.2.2. Χαρακτηριστικά

Σαν φυσικά υπάρχον κρυσταλλικό στερεό, ο πάγος κατατάσσεται στις ανόργανες ουσίες. Ένα ασύνηθες φαινόμενο που χαρακτηρίζει το νερό υπό μορφή πάγου σε πίεση μίας ατμόσφαιρας είναι ότι το στερεό είναι περίπου 8% λιγότερο πυκνό από την υγρή μορφή. Το νερό είναι η μόνη μη μεταλλική ουσία που

διαστέλλεται όταν στερεοποιείται, έχει πυκνότητα  $0.917 \text{ g/cm}^3$  στους  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , τη στιγμή που το νερό έχει πυκνότητα  $0.9998 \text{ g/cm}^3$  στην ίδια θερμοκρασία. Η υγρή μορφή φτάνει το μέγιστο της πυκνότητάς της, το  $1.00 \text{ g/cm}^3$ , στους  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  και διαστέλλεται, καθώς τα μόρια του υγρού συγκεντρώνονται για να δημιουργήσουν την εξαγωνική μορφή των κρυστάλλων του πάγου, καθώς η θερμοκρασία πέφτει στους  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των δεσμών υδρογόνου οι οποίοι δημιουργούνται διαμοριακά και ευθυγραμμίζουν τα μόρια του νερού καθώς αυτό παγώνει, κάτι που κάνει το νερό λιγότερο πυκνό. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι ο πάγος επιπλέει στο νερό, πράγμα ιδιαίτερος σημαντικό για το κλίμα της Γης, αφού οι υδάτινες λεκάνες παγώνουν επιφανειακά και όχι ολόκληρες. Η πυκνότητα του πάγου αυξάνει λίγο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (στους  $-180 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $93 \text{ K}$ ) είναι  $0.9340 \text{ g/cm}^3$ ).

Όταν το νερό παγώνει απορροφά τόση ενέργεια όση θα απορροφούσε για να θερμανθεί στους  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  από τους  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Είναι επίσης θεωρητικά δυνατόν να υπερθερμανθεί το νερό σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από το σημείο βρασμού, χωρίς να έχουμε τη μετάβαση στην αέρια φάση. Έρευνες όπου ακτίνες λέιζερ ενεργούσαν πάνω σε κομμάτι πάγου, απέδειξαν ότι ο πάγος μπορεί να θερμανθεί έως και σε θερμοκρασία δωματίου για πολύ σύντομη περίοδο ( $250 \text{ ps}$ ) χωρίς να λιώσει. Επίσης είναι πιθανό ο πυρήνας ενός κρυστάλλου πάγου να έχει σημείο τήξεως πάνω από τους  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  και το κανονικό σημείο των  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  να είναι απλά ένα επιφανειακό φαινόμενο.

Άλλη μια συνέπεια της μικρότερης πυκνότητας του πάγου σε σχέση με το νερό είναι ότι η πίεση (η αύξηση της πίεσης) ελαττώνει το σημείο στερεοποίησης, πιθανότατα οδηγώντας το υλικό ξανά στην υγρή φάση. Μέχρι προσφάτως η εντύπωση που υπήρχε ήταν ότι ο πάγος είναι ολισθηρός επειδή η πίεση ενός αντικειμένου πάνω σε ένα στρώμα πάγου προκαλούσε την τήξη ενός λεπτού στρώματος πάγου μεταξύ του πάγου και του αντικειμένου, παρέχοντας λίπανση.

Πλέον αυτό δεν θεωρείται παραδεκτό. Εξακολουθεί πάντως να υπάρχει διαφωνία και μη ταύτιση απόψεων γύρω από το γιατί ο πάγος γλιστράει. Μία θεωρία που αρχίζει να βρίσκει υποστηρικτές αναφέρει πως τα μόρια του πάγου που βρίσκονται σε επαφή με αυτά του αέρα δεν μπορούν να αναπτύξουν ισχυρούς δεσμούς με τα μόρια πάγου που βρίσκονται στα εσωτερικά στρώματα του πάγου (άρα είναι περισσότερο ελεύθερα να κινούνται, περίπου σαν μόρια νερού). αυτά τα μόρια παραμένουν σε ημί-στερεή φάση παρέχοντας λίπανση ανεξάρτητα από την ύπαρξη αντικειμένου το οποίο ασκεί πίεση. Το φαινόμενο αυτό όμως δεν φαίνεται να αληθεύει σε όλες τις θερμοκρασίες. Οι ακραίες συνθήκες που επικρατούν στο Νότιο Πόλο φαίνεται να δημιουργούν πάγο και χιόνι τα οποία δεν είναι ολισθηρά.

Ο «καθημερινός» πάγος ή χιόνι είναι εξαγωνικός πάγος ( $\text{ice } I_h$ ). Κάτω από μεγαλύτερες πιέσεις και διάφορες θερμοκρασίες, ο πάγος μπορεί να παράξει περίπου μία δωδεκάδα διαφορετικές φάσεις.

Στο διάστημα ο εξαγωνικός κρυσταλλικός πάγος είναι ιδιαίτερα σπάνιος. Αντ' αυτού συναντάται πολύ συχνά ο άμορφος πάγος.

Ο όρος «πάγος» χρησιμοποιείται ευρύτατα για να περιγράψει γενικά τη στερεή μορφή ουσιών που συνήθως βρίσκονται στην υγρή ή αέρια φάση. Για παράδειγμα ο όρος ξηρός πάγος αναφέρεται στο στερεό διοξείδιο του άνθρακα.[78]

### **9.2.3. Ο πάγος σε διάφορες συνθήκες πίεσης**

Τα περισσότερα υγρά όσο αυξάνεται η πίεση, παγώνουν και σε υψηλότερη θερμοκρασία, καθώς η πίεση βοηθά στο να μένουν περισσότερο κοντά τα μόρια μεταξύ τους. Στο νερό όμως οι ισχυροί δεσμοί υδρογόνου διαφοροποιούν την κατάσταση: το νερό παγώνει σε θερμοκρασία κατώτερη του μηδενός σε πίεση μεγαλύτερη της μίας ατμόσφαιρας. Συνεπώς το νερό διατηρεί τη στερεή του φάση και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες του μηδενός και πιέσεις μικρότερες της μίας

ατμόσφαιρας. Η τήξη του πάγου υπό πίεση ενδέχεται να είναι μία εξήγηση για την κίνηση των παγετώνων. Ο πάγος που δημιουργείται σε υψηλές πιέσεις έχει διαφορετική κρυσταλλική δομή και πυκνότητα από τον κανονικό πάγο. Πάγος, νερό και ατμός μπορούν να συνυπάρχουν στο λεγόμενο τριπλό σημείο (273.16 K και 611.73 Pa.)[78]

Μορφή	Χαρακτηριστικά
<b>Άμορφος πάγος</b>	Εμφανίζει έλλειψη κρυσταλλικής δομής και εμφανίζεται σε τρεις μορφές: χαμηλής πυκνότητας (LDA) που σχηματίζεται σε ατμοσφαιρική πίεση ή χαμηλότερη, υψηλής πυκνότητας (HDA) και πολύ υψηλής πυκνότητας (VHDA), οι οποίοι σχηματίζονται σε υψηλότερες πιέσεις. Ο LDA σχηματίζεται από την εξαιρετικά γρήγορη ψύξη νερού ("hyperquenched glassy water", HGW), από την επαφή ατμού σε επιφάνειες πολύ χαμηλής θερμοκρασίας ("amorphous solid water", ASW) ή με τη θέρμανση μορφών υψηλής πυκνότητας σε πίεση περιβάλλοντος ("LDA").
<b>Ice I<sub>h</sub></b>	Συνήθης εξαγωνικός κρύσταλλος πάγου. Ουσιαστικά σχεδόν όλη η ποσότητα πάγου στη Βιόσφαιρα είναι τέτοιας μορφής, εκτός από ένα μικρό ποσοστό που είναι I <sub>c</sub> .
<b>Ice I<sub>e</sub></b>	Μετασταθής κυβική κρυσταλλική μορφή πάγου. τα άτομα του οξυγόνου είναι τοποθετημένα σε διαμαντοειδή διάταξη. Εμφανίζεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 130-150 K, και διατηρεί τη σταθερότητά του έως τους 200 K, οπότε και μετατρέπεται σε πάγο I <sub>h</sub> . Εμφανίζεται συνήθως στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.
<b>Ice II</b>	Ρομβοεδρική διάταξη με πολύ αυστηρή δομή. Δημιουργείται από πάγο ice I <sub>h</sub> με τη συμπίεση του τελευταίου σε θερμοκρασίες από 190-210 K. Όταν θερμαίνεται δίνει πάγο ice III.
<b>Ice III</b>	Τετραγωνική κρυσταλλική δομή, δημιουργείται από την ψύξη του νερού στους 250 K υπό πίεση 300 MPa. Η λιγότερο πυκνή από τις δομές υψηλής πυκνότητας. Πυκνότερη από το νερό.
<b>Ice IV</b>	Μετασταθής ρομβοεδρική δομή. Δεν δημιουργείται χωρίς την εισαγωγή κάποιου παράγοντα σχηματισμού πυρήνα.
<b>Ice V</b>	Κρυσταλλική (τρεις ασύμμετροι άξονες) δομή. Δημιουργείται από την ψύξη του νερού στους 253 K υπό πίεση 500 MPa. Η πλέον περίπλοκη δομή από όλες.
<b>Ice VI</b>	Τετραγωνική κρυσταλλική δομή. Δημιουργείται από την ψύξη του νερού στους 270 K υπό πίεση 1.1 GPa.
<b>Ice VII</b>	Κυβική δομή. Τα άτομα υδρογόνου βρίσκονται εν αταξία και οι δεσμοί υδρογόνου σχηματίζουν δύο αλληλοκαλυπτόμενα πλέγματα.
<b>Ice VIII</b>	Μία περισσότερο τακτοποιημένη δομή από αυτή του πάγου ice VII. Εδώ τα υδρογόνα καταλαμβάνουν δεδομένες θέσεις. Δημιουργείται από την ψύξη του πάγου ice VII κάτω από τους 5 °C.
<b>Ice IX</b>	Τετραγωνική μετασταθής δομή. Δημιουργείται σταδιακά από πάγο ice III με ψύξη από τους 208 K στους 165 K σταθερά στους 140 K και σε πιέσεις μεταξύ 200 και 400 MPa. Έχει πυκνότητα 1.16 g/cm <sup>3</sup> , ελαφρώς μεγαλύτερη από τον συνηθισμένο πάγο.
<b>Ice X</b>	Proton-ordered συμμετρική δομή. Δημιουργείται περίπου στα 70 GPa.
<b>Ice XI</b>	Ορθορομβική δομή καταστάσεως ισορροπίας χαμηλής θερμοκρασίας του εξαγωνικού πάγου. Είναι φεροηλεκτρικό.
<b>Ice XII</b>	Τετραγωνική μετασταθής πυκνή δομή. Εμφανίζεται σε συνθήκες μεταξύ των πάγων ice V και ice VI. Δημιουργείται από θέρμανση υψηλής πυκνότητας άμορφου πάγου από τους 77K έως περίπου τους 183K σε πίεση 810 MPa.

**ΣΧΗΜΑ 9.3:** Μορφές πάγου



### **9.3. Συστήματα αποθήκευσης θερμότητας με πάγο**

#### **9.3.1 Εισαγωγή**

Η αποθήκευση θερμότητας με τη βοήθεια πάγου, είναι σήμερα ένας τεχνητός και βιομηχανικός τρόπος αποθήκευσης ψυκτικής ισχύος σε μορφή πάγου στο σημείο τήξης του νερού, δηλαδή στους 0°C. Για την παραγωγή αυτής της ενέργειας τα ψυκτικά μηχανήματα πρέπει να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από τις συνήθεις, ώστε να είναι διαθέσιμο ψυκτικό υγρό στους -6 έως -3°C, ανάλογα με τη διάρκεια του κύκλου.

Στην αποθήκευση θερμότητας με πάγο, ο στόχος είναι η τεχνολογία να μπορεί να εκμεταλλευτεί τη λανθάνουσα θερμότητα του νερού. Οι ψυκτικές εγκαταστάσεις που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία είναι υποχρεωτικό να λειτουργούν σε θερμοκρασίες κατά πολύ χαμηλότερες από αυτές που λαμβάνουν χώρα σε μία εφαρμογή κλιματισμού. Ανάλογα με την τεχνολογία της μονάδας, μπορεί να χρησιμοποιούνται είτε ειδικά μηχανήματα παραγωγής πάγου, ή συνηθισμένοι ψύκτες, διαμορφωμένοι κατάλληλα για χαμηλές θερμοκρασίες

Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου παραγωγής ψύξης είναι η πιθανή ελάττωση του ηλεκτρικού φορτίου αιχμής που απαιτείται και/ή ελάττωση της χωρητικότητας του απαραίτητου εγκατεστημένου ψύκτη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με συνδυασμό αποθήκευσης και κρύου νερού και πάγου. Κανονικά τα συστήματα αποθήκευσης πάγου έχουν ένα κατά 15-20% ακριβότερο αρχικό κόστος (κτίσης και εγκατάστασης) από τα συστήματα αποθήκευσης κρύου νερού. Παρ' όλ' αυτά ενώ το σύστημα πάγου απαιτεί 4-6 φορές μικρότερο όγκο αποθήκευσης, σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα νερού και μπορεί να αποδειχτεί ιδανική λύση για εφαρμογές όπου οι περιορισμοί του χώρου είναι ιδιαίτερως αυστηροί.

Τα συστήματα αποθήκευσης πάγου μπορούν επίσης να εμφανίσουν πλεονεκτήματα όταν η διαφορά στην τιμή της ηλεκτρικής μονάδας μεταξύ ημέρας και νύχτας είναι σημαντική και συνεπώς να υπάρχει ένα επιπλέον κριτήριο για να αναλάβει το σύστημα πάγου μεγαλύτερο κομμάτι της ψυκτικής παραγωγής στο ενδιαμέσο περιόδων αιχμής και μη-αιχμής.

Κυρίως λόγω της μεγαλύτερης ψυκτικής ικανότητας ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης κρύου νερού, τα συστήματα πάγου μπορούν να προτιμηθούν παρόλο το βάρος της αρχικής επένδυσης.[76,79,80]

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης πάγου, μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

- Σύστημα Ice-on-coil
- Σύστημα Sheet ice harvester
- Πάγος σε μικροκάψουλες
- Υλικά αλλαγής φάσης
- Διφασικό μίγμα νερού-πάγου

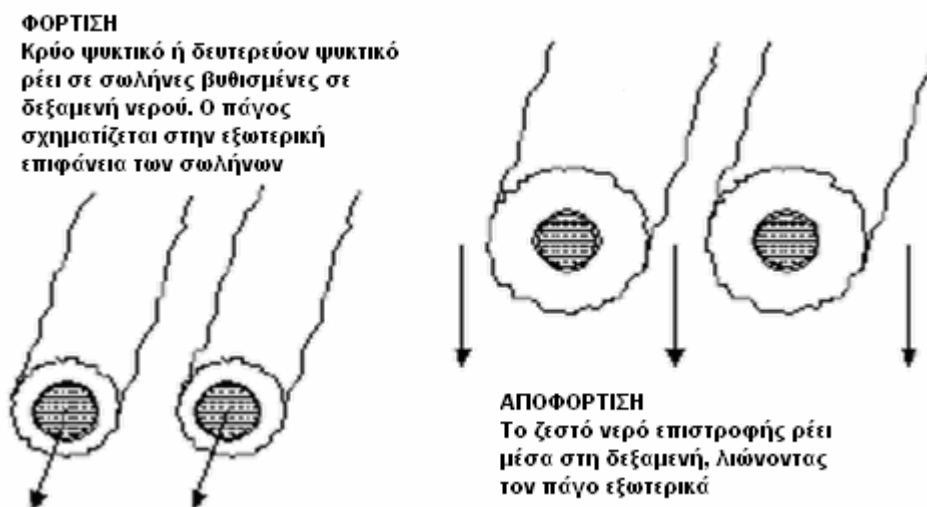
#### **9.3.2. Συστήματα Ice on Coil**

Υπάρχουν δύο βασικές εφαρμογές της τεχνολογίας ice-on-coil, η εξωτερική και η εσωτερική τήξη. Και οι δύο εναλλακτικές χρησιμοποιούν την τεχνική όπου ο πάγος σχηματίζεται στην εξωτερική επιφάνεια σωλήνων ή σερπαντίνων, οι οποίες είναι βυθισμένες σε δεξαμενή νερού. Κατά την περίοδο φόρτισης το ψυκτικό μέσο (τυπικό για αυτές τις εφαρμογές: 25% προπυλογλυκόλη και 75% νερό) περνάει μέσα από τους σωλήνες και δημιουργεί στην εξωτερική τους επιφάνεια ένα στρώμα πάγου.

Για την εφαρμογή εξωτερικής τήξης το σύστημα αποθήκευσης πάγου χρειάζεται ψύκτη ικανό να παράξει θερμοκρασίες φόρτισης από  $-7$  έως  $-30^{\circ}\text{C}$  για το σχηματισμό 40 mm πάγου. Για σύστημα σχηματισμού 65 mm πάγου, οι αντίστοιχες θερμοκρασίες θα πρέπει να είναι  $-12$  έως  $-9^{\circ}\text{C}$ . Το σύστημα χρησιμοποιεί συνήθεις ψύκτες, οι οποίοι εμφανίζουν θερμοκρασίες φόρτισης από  $-6$  ως  $-3^{\circ}\text{C}$ . [76,79,80]

### 9.3.2.1 Εξωτερική τήξη

Κατά την αποφόρτιση του συστήματος εξωτερικής τήξης το ζεστό νερό που επιστρέφει από το σύστημα επανακυκλοφορεί στη δεξαμενή, αυξάνοντας τη μέση θερμοκρασία του νερού με αποτέλεσμα να λιώσει ο πάγος από έξω προς τα μέσα, και ως άμεση συνέπεια, το νερό ψύχεται και πάλι. Αέρας οδηγείται μέσα στη δεξαμενή και απελευθερώνεται μέσα σε αυτήν κατά την εκκίνηση του κύκλου φόρτισης και κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης, ώστε να ευνοηθεί η ομοιόμορφη δημιουργία του στρώματος πάγου και η εξομάλυνση των τοπικών διαφορών θερμοκρασίας στη δεξαμενή.



**ΣΧΗΜΑ 9.4:** Σύστημα εξωτερικής τήξης

Ο πάγος διαμορφώνεται γύρω από τους σωλήνες κατά τη φάση της θερμικής φόρτισης σε πάχος έως και 65 mm. Συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για να περιοριστεί το πάχος αυτού του στρώματος πάγου και να αποφευχθεί το φαινόμενο της "γεφύρωσης" του στρώματος μεταξύ δύο διαδοχικών σωλήνων, γεγονός το οποίο εμποδίζει την ελεύθερη κυκλοφορία του νερού στη δεξαμενή και ελαττώνει το βαθμό απόδοσης, καθώς η θερμοκρασία εξόδου του νερού είναι υψηλότερη λόγω της μικρότερης επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας. [76]

#### 9.3.2.1.1. Ιδιότητες Δεξαμενών

Οι δεξαμενές για τα συστήματα εξωτερικής τήξης είναι ανοιχτές άρα ατμοσφαιρικής πίεσης, πράγμα το οποίο απαιτεί κάποιο σύστημα ελέγχου και σταθεροποίησης της στατικής πίεσης του όλου συστήματος ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο υπερχειλίσης στην ανοιχτή δεξαμενή. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί είτε με εναλλάκτες θερμότητας είτε βαλβίδες σταθερής πίεσης και αντλίες.

Το σύστημα επεξεργασίας του νερού φυσιολογικά δεν χρειάζεται κάποια ιδιαίτερη μετατροπή, πέραν των κλασσικών εφαρμογών. Κάποια ιδιαίτερη φροντίδα και προστασία εναντίον της διάβρωσης μπορεί να χρειαστεί σε εγκαταστάσεις εξωτερικής τήξης, όπου το νερό στη δεξαμενή αερίζεται, αφού η τελευταία είναι ανοιχτή. Και σε αυτή την περίπτωση όμως, αν χρησιμοποιηθούν εναλλάκτες θερμότητας για τη σταθεροποίηση της στατικής πίεσης, το σύστημα διανομής του νερού παραμένει κλειστό και έτσι δεν χρειάζεται κάποια περεταίρω μέριμνα.

Το σύστημα αποθήκευσης με εξωτερική τήξη μπορεί επίσης να συνδυαστεί με περισσότερες δεξαμενές. Πολλαπλές δεξαμενές στις περισσότερες εφαρμογές είναι συνδεδεμένες παράλληλα. Η εν σειρά σύνδεση των δεξαμενών χρησιμοποιείται μερικές φορές όταν απαιτείται μεγάλος ρυθμός αποφόρτισης από το σύστημα, όπου ζητούμενο είναι η για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα παραμονή του νερού στη δεξαμενή. Όμως η ροή του νερού μεταξύ των εν σειρά συνδεδεμένων δεξαμενών κυβερνάται μόνο από την υψομετρική διαφορά στάθμης στις αντίστοιχες δεξαμενές. Μία σύνδεση με μεγάλη διατομή είναι απαραίτητη ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πτώση πίεσης και η διαφορά στάθμης μεταξύ των δεξαμενών. Παρ' όλ' αυτά η εν σειρά σύνδεση περισσότερων από δύο δεξαμενών γενικά δεν συνιστάται. [76]

### **9.3.2.1.2. Στρατηγικές Λειτουργίας**

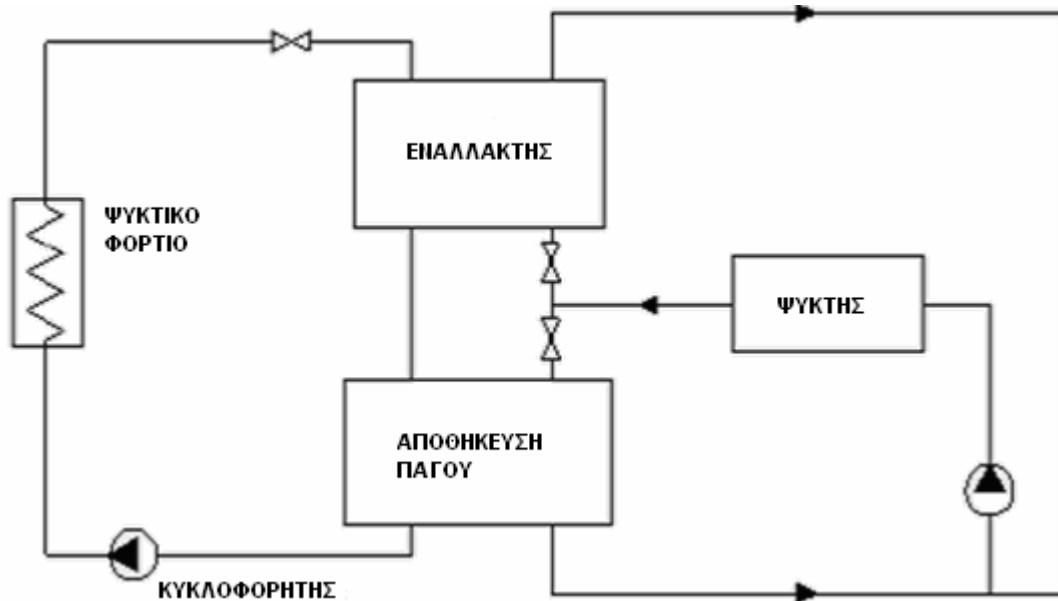
Συστήματα αποθήκευσης πάγου εξωτερικής τήξης είναι ιδανικά για εφαρμογές και συστήματα που απαιτούν καθαρό νερό χωρίς πρόσθετα στον ψυκτικό κύκλο ή απαιτούν παροχή νερού σε θερμοκρασία 1-2°C.

Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές διατάξεις συστημάτων εξωτερικής τήξης:

- Συστήματα που χρησιμοποιούν το ψυκτικό μέσο κατευθείαν μέσα στις σωληνώσεις
- Συστήματα που δημιουργούν πάγο έμμεσα χρησιμοποιώντας ένα δευτερεύον ψυκτικό το οποίο ψύχεται από ένα ψύκτη (chiller).

Το σύστημα άμεσης ψύξης δημιουργεί πάγο με τις σωληνώσεις να λειτουργούν σαν ατμοποιητής, εννοώντας ότι το ψυκτικό περνάει μέσα από τη μονάδα αποθήκευσης. Αυτή η εφαρμογή χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία.

Το δευτερεύον ψυκτικό σύστημα είναι πολύ σύνηθες για εφαρμογές ΘΨΚ (θέρμανσης –ψύξης – κλιματισμού -εξαερισμού), καθώς είναι περισσότερο εύκολο και απλούστερο σε σχεδιασμό, εγκατάσταση και συντήρηση και επίσης λόγω του μειωμένου όγκου του ψυκτικού μέσου. Το σύστημα άμεσης ψύξης είναι περισσότερο αποδοτικό καθώς υπάρχει συγκριτικά «λιγότερη » μεταφορά θερμότητας μεταξύ ψυκτικού και επιφάνειας σχηματισμού πάγου. Το σχήμα 9.5 παρουσιάζει μία εγκατάσταση δευτερεύοντος ψυκτικού με εξωτερική τήξη. Εδώ η δεξαμενή είναι συνδεδεμένη με το σύστημα διανομής. Κατά την αποφόρτιση του συστήματος, ένας εναλλάκτης θερμότητας επιτρέπει στον ψύκτη να ενισχύσει την ψύξη της δεξαμενής. Ένας πιθανός δεύτερος ψύκτης στο κύκλωμα του κρύου νερού μπορεί να βοηθήσει ακόμη περισσότερο.



**ΣΧΗΜΑ 9.5:** Διάταξη εξωτερικής τήξης με δευτερεύον ψυκτικό μέσο

Η ελαχιστοποίηση του φαινομένου της γεφύρωσης των στρωμάτων πάγου καθώς και ο περιορισμός του πάχους αυτών κατά τη φάση της φόρτισης του συστήματος, είναι οι δύο βασικές έννοιες του συστήματος ελέγχου για εγκατάσταση αποθήκευσης με σωληνώσεις και εξωτερική τήξη.

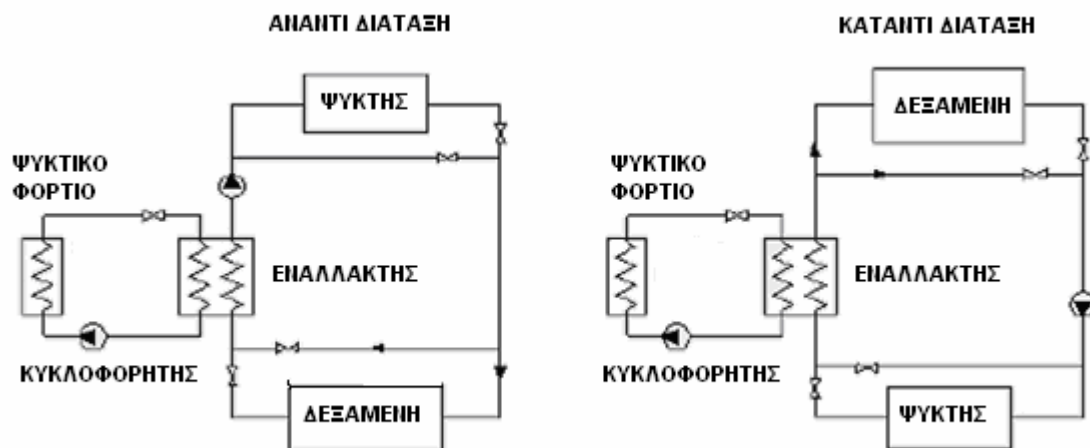
Για να μεγιστοποιηθεί την απόδοση και να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας και τα κόστη γενικότερα, όλη η ποσότητα του σχηματιζόμενου πάγου πρέπει να λιώνει τουλάχιστον μία φορά την εβδομάδα. Σε περιπτώσεις όπου η εγκατάσταση λειτουργεί σε μερικό φορτίο, ο ψυκτικός κύκλος πρέπει να περιορίζεται, ώστε να αποθηκεύεται μόνο η απαραίτητη ενέργεια. Η πλήρης αποφόρτιση του συστήματος βοηθά επίσης ώστε να μην εμφανίζεται το φαινόμενο της «γεφύρωσης». Το σύστημα ελέγχου του πάχους του πάγου πρέπει να διαθέτει αισθητήρα πάχους, και να μπορεί να σταματά τη φόρτιση του συστήματος όταν επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι τέτοιου ελέγχου, και ο πιο απλός από αυτούς βασίζεται στο γεγονός ότι ο πάγος έχει μεγαλύτερο όγκο από το νερό, οπότε ένας αισθητήρας στάθμης του νερού στη δεξαμενή μπορεί να ελέγξει τον αποθηκευμένο πάγο. Μια άλλη μέθοδος αποτελείται από καθετήρα γεμάτο με υγρό που τοποθετείται σε συγκεκριμένη απόσταση από τους σωλήνες του συστήματος. Καθώς σχηματίζεται πάγος αγκαλιάζει τον καθετήρα προκαλώντας την πήξη του υγρού στο εσωτερικό του, τότε αυξάνεται η πίεση, η οποία μπορεί τελικά να μετρηθεί. Κάθε μονάδα παραγωγής πάγου πρέπει να έχει και ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου του παραγόμενου πάγου.

### **9.3.2.2 Εσωτερική τήξη**

Το σύστημα εσωτερικής τήξης αποφορτίζεται καθώς το ζεστό νερό που επιστρέφει περνά μέσα από τους σωλήνες και λιώνει τον πάγο από μέσα προς τα έξω. Πρώτα τήκεται ο πάγος στο όριο του σωλήνα δημιουργώντας ένα στρώμα νερού μεταξύ του σωλήνα και του πάγου. Καθώς η διαδικασία προχωρά, το στρώμα του νερού διογκώνεται εις βάρος του πάγου έως ότου φτάσουμε στην κατάσταση που ο πάγος φτάνει σε οριακό πάχος σπάει και τα κομμάτια ανακατεύονται με το νερό στη δεξαμενή αποθήκευσης.

Και εδώ υπάρχουν δύο συστήματα εσωτερικής τήξης (σχήμα 9.6) όπου η αποθήκευση συνδέεται σε σειρά με τον ψύκτη με διάταξη είτε ανάντι είτε κατάντι. Για την ανάντι διάταξη ο ψύκτης προ-ψύχει το ζεστό νερό επιστροφής προτού αυτό εισέλθει στη δεξαμενή. Αποτέλεσμα είναι μια περισσότερο αποδοτική λειτουργία ψύξης λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας λειτουργίας. Από την άλλη η χαμηλότερη θερμοκρασία εισόδου στη δεξαμενή ελαττώνει την αποθηκευτική ικανότητα.

Στην κατάντι διάταξη το νερό επιστροφής εισέρχεται στον ψύκτη αφού έχει ψυχθεί στη δεξαμενή αποθήκευσης. Αυτή η διάταξη παρέχει μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα, καθώς επίσης εξασφαλίζει και μία σταθερή θερμοκρασία παροχής. Ωστόσο, η απόδοση του ψύκτη είναι χαμηλότερη και ο ψύκτης λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία εισόδου. [79]



**ΣΧΗΜΑ 9.6:** Ανάντι και κατάντι διατάξεις

### 9.3.2.2.1. Υλικά στις σωληνώσεις

Το πλέον συνηθισμένο υλικό το οποίο χρησιμοποιείται για τις σωληνώσεις στο σύστημα ice-on-coil με εσωτερική ψύξη είναι το πολυαιθυλένιο με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα ( $0.31 \text{ W/m.K}$ ).

Αναλύσεις συγκρίνουν το πολυαιθυλένιο με άλλα υλικά με διαφορετική αγωγιμότητα, υλικά με υψηλή αγωγιμότητα ( $372 \text{ W/m.K}$ ) όπως ο χαλκός καθώς και με χαμηλή αγωγιμότητα ( $1.73 \text{ W/m.K}$ ) όπως το νικέλιο, το μαγνήσιο, ή μίγμα τιτανίου καθώς και διάφορα πλαστικά υλικά. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης έδειξε ότι τα μεταλλικά κράματα (πχ νικέλιο, μαγνήσιο, τιτάνιο) ή φορμαλδεΰδη πλαστικά (πχ ούριο-φορμαλδεΰδη, μελαμίνη, πλαστικά φαινόλης, πολυεστέρες), βελτιώνουν τη μεταφορά θερμότητας, ελαττώνοντας τους χρόνους φόρτισης και αποφόρτισης της δεξαμενής. Το κόστος όμως τέτοιων υλικών είναι σε γενικές γραμμές υψηλότερο από το πολυαιθυλένιο. Σκοπός της εξέλιξης είναι η δημιουργία μεταλλικών κραμάτων φτηνών και καταλλήλων για τη διαμόρφωση τέτοιων σωληνών. [79]

### 9.3.2.2.2. Ιδιότητες Δεξαμενής

Στις εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ο ψυκτικός κύκλος της εγκατάστασης μπορεί να συνδεθεί κατευθείαν με τον ψυκτικό κύκλο ενός κτιρίου, ή να είναι συνδεδεμένοι μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, σχήμα 9.6.

Σε συστήματα ψύξης κατοικιών προτιμάται η μέθοδος του εναλλάκτη. Παρ' όλ' αυτά σαν σύστημα εσωτερικής τήξης χρησιμοποιεί ένα διάλυμα γλυκόλης στους

σωλήνες και είναι κατάλληλο σε συστήματα που χρησιμοποιούν γλυκόλη στον ψυκτικό κύκλο του κτιρίου και μπορούν να είναι περισσότερο αποδοτικά από τα συστήματα εξωτερικής τήξης.

Είναι περισσότερο αποδοτικό να υπάρχουν περισσότερες μικρές δεξαμενές συνδεδεμένες, από το να υπάρχει μία μεγάλη δεξαμενή εξ αιτίας των πολλών σε αριθμό και μεγάλων σε μήκος σωλήνων που είναι απαραίτητες σε μία μεγάλη δεξαμενή. Το μεγάλο μήκος των σωλήνων είναι επιζήμιο στη θερμική απόδοση αφού η κλίση της θερμοκρασίας μεταξύ του δευτερεύοντος ψυκτικού και της διεπιφάνειας νερού/πάγου, ελαττώνεται όσο αυξάνει το μήκος του σωλήνα.

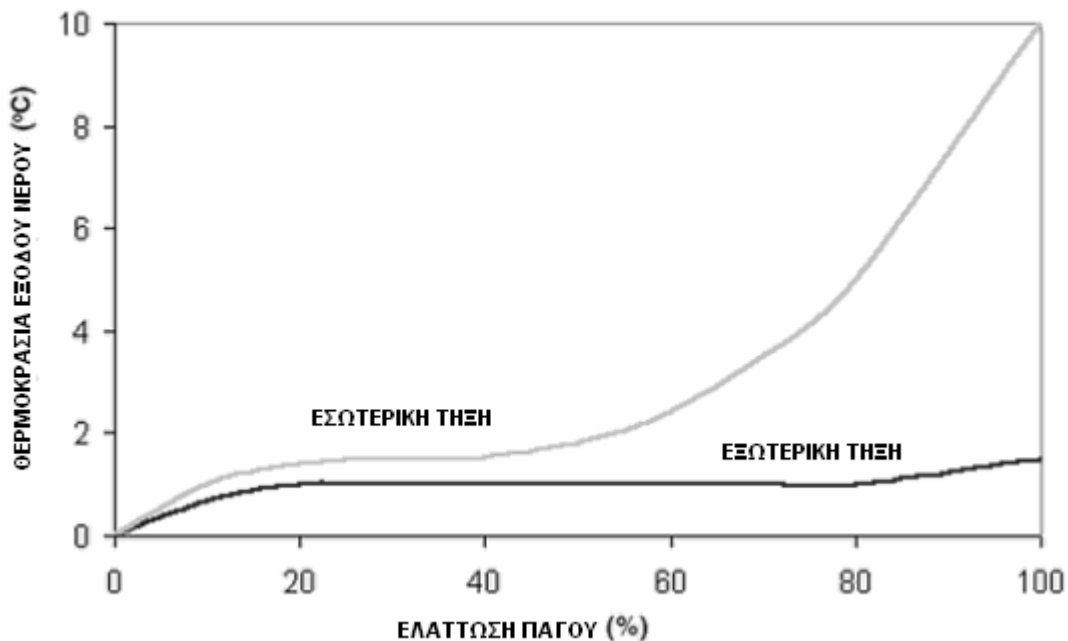
Αύξηση του αριθμού των σωλήνων προκαλεί μείωση της αντίστοιχης παροχής με αποτέλεσμα την μειωμένη μεταφορά θερμότητας του δευτερεύοντος υγρού.

Από την άλλη με μικρότερες δεξαμενές οι χρόνοι φόρτισης και αποφόρτισης ελαττώνονται.

Η δεξαμενή του συστήματος εσωτερικής ψύξης έχει μικρό κόστος συντήρησης λόγω έλλειψης εσωτερικών κινούμενων εξαρτημάτων. Πέρα απ' αυτό, ο τρόπος σύνδεσης του συστήματος παρέχει τη δυνατότητα να προστεθεί εύκολα δεξαμενή σε παράλληλη με μικρό κόστος εγκατάστασης.

### 9.3.2.3. Φόρτιση και αποφόρτιση

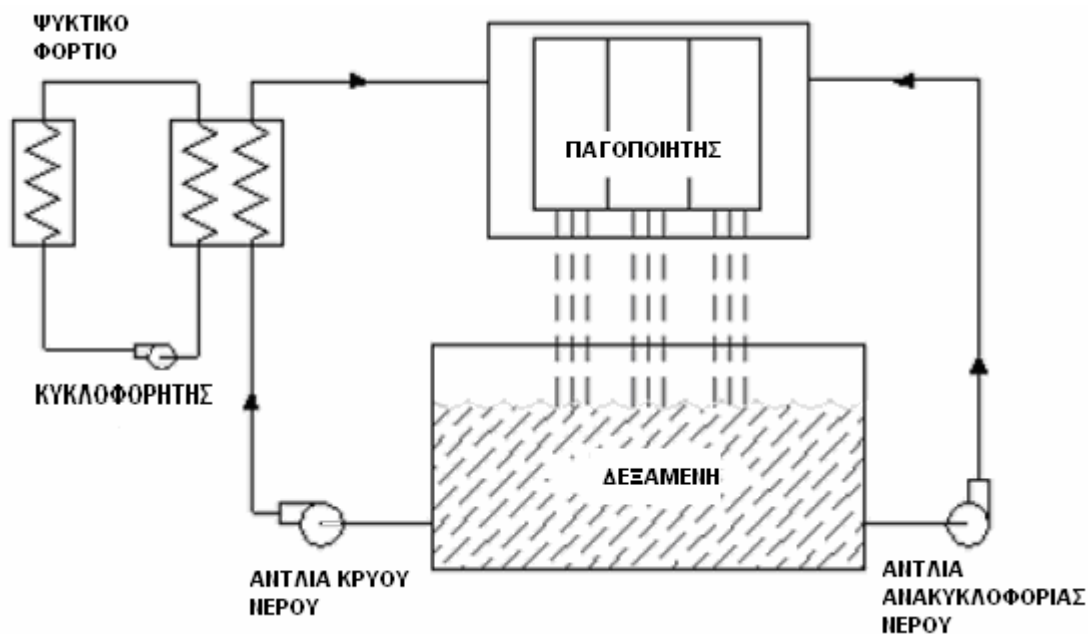
Η διαφορά μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής τήξης φαίνεται (σχήμα 9.7) το οποίο αποδίδει τη θερμοκρασιακή αλλαγή κατά τη διάρκεια της καταστροφής του πάγου. Η εξωτερική τήξη παρέχει σταθερή θερμοκρασία αποφόρτισης περίπου στον  $+1^{\circ}\text{C}$ , κάτι που είναι αποτέλεσμα των φυσαλίδων αέρα που οδηγείται στη δεξαμενή για να προωθήσει την ομοιόμορφη δημιουργία και τήξη του πάγου, ομοιομορφία η οποία βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας. Για την εσωτερική τήξη ο πάγος γύρω από το σωλήνα λιώνει δίνοντας τη θέση του σε ένα υδάτινο δαχτυλίδι, μεταξύ του σωλήνα και του πάγου το οποίο συνεχώς μεγαλώνει. Καθώς το νερό απομονώνει τους σωλήνες, πράγμα το οποίο αυξάνει την αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας, η θερμοκρασία της γλυκόλης αυξάνει με το χρόνο. [79]



**ΣΧΗΜΑ 9.7:** Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος

### 9.3.3. Σύστημα Sheet ice harvester

Το σύστημα sheet ice harvester φτιάχνει πάγο πάνω σε μία μεγάλη επίπεδη επιφάνεια ενός ατμοποιητή ή στο εσωτερικό ή εξωτερικό ενός κυλινδρικού ατμοποιητή, ο οποίος και στις δύο περιπτώσεις βρίσκεται πάνω από μία δεξαμενή νερού/ πάγου. Ο πάγος δημιουργείται από την ανακυκλοφορία νερού 0°C από τη δεξαμενή αποθήκευσης στην κορυφή των επιπέδων επιφανειών του ατμοποιητή, όπου κυλά ελεύθερο σχηματίζοντας ένα λεπτό φιλμ πάνω στις επιφάνειες αυτές. Τα κομμάτια πάγου που δημιουργούνται από αυτή τη διαδικασία απελευθερώνονται, συνήθως με την κυκλοφορία ζεστού ψυκτικού αερίου στον ατμοποιητή, και πέφτουν μέσα στη δεξαμενή όπου και ανακατεύεται με το ψυχρό νερό. Άλλοι τύποι ice harvesters χρησιμοποιούν μηχανικές μεθόδους απελευθέρωσης του πάγου. Ο πάγος απελευθερώνεται περιοδικά όταν το πάχος του φιλμ φτάσει τα 6-10 mm. Το σχήμα 9.8 παρουσιάζει σχηματικά ένα ice harvester. Μία αντλία ανακυκλοφορίας χρησιμοποιείται για να παρέχει ελάχιστη ροή για τη βροχή του παγοποιητή.



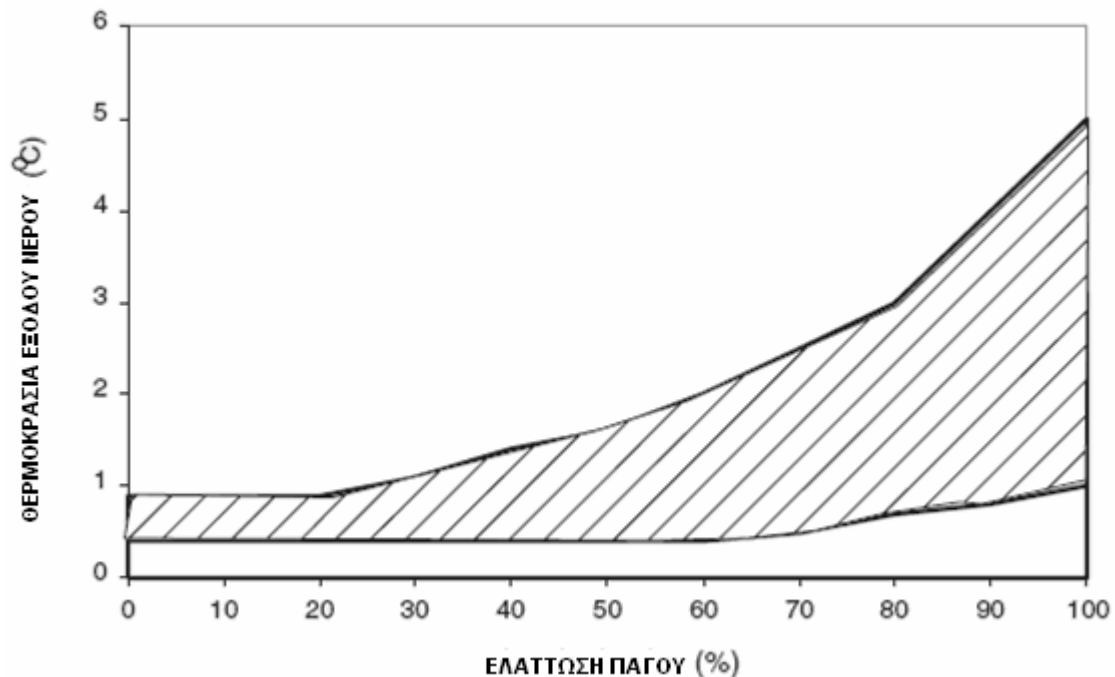
ΣΧΗΜΑ 9.8: Διάταξη ice harvester

#### 9.3.3.1. Φόρτιση και αποφόρτιση

Η επίδοση του συστήματος ice harvester κατά τη φόρτισή του παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως ποσότητας πάγου στη δεξαμενή, χαρακτηριστικό που δεν συναντάται σε άλλες εφαρμογές αποθήκευσης πάγου. Ο κύκλος φόρτισης διαρκεί από 10 έως 30 min. Ο χρόνος αποφόρτισης εξαρτάται από το σύστημα ελέγχου, την εγκατάσταση του ατμοποιητή και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτή λαμβάνει χώρα και κυμαίνεται από 20 έως 90 sec. Ο αποθηκευμένος πάγος μπορεί να λειώσει πού γρήγορα, αν είναι κατάλληλα βρεγμένος. Ο πάγος που παράγεται από 24ωρη φόρτιση της εγκατάστασης μπορεί να λειώσει σε λιγότερο από 3 λεπτά αν υπάρχει άμεση ανάγκη ψυκτικού φορτίου.

Οι θερμοκρασίες αποφόρτισης από μία καλά σχεδιασμένη δεξαμενή αποθήκευσης παραμένουν περίπου μεταξύ 1 και 2°C έως ότου το 80-90% του δημιουργημένου πάγου έχει αφαιρεθεί. Σε αυτό το σημείο η επιφάνεια επαφής μεταξύ πάγου και του νερού στη δεξαμενή έχει ελαττωθεί αρκετά, οπότε η θερμοκρασία

αυξάνεται. Το σχήμα 9.9 δείχνει ένα τυπικό εύρος θερμοκρασιών αποφόρτισης κατά τη διάρκεια του κύκλου αποφόρτισης.



**ΣΧΗΜΑ 9.9:** Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος

Το σύστημα ice harvester μπορεί να λειτουργήσει και σαν παραγωγός πάγου και σαν ψύκτης νερού. Η επιλογή μεταξύ των δύο λειτουργιών γίνεται αυτόματα και εξαρτάται από τη θερμοκρασία του νερού που εισέρχεται στον ατμοποιητή. Αν το νερό βρίσκεται κοντά στο σημείο πήξης του, επιλέγεται η λειτουργία του παγοποιητή και ο κύκλος απόψυξης ενεργοποιείται περιοδικά ώστε να απελευθερώνεται ο πάγος.

Στη λειτουργία του παγοποιητή το σύστημα ice harvester παράγει θερμοκρασίες ατμοποίησης στο εύρος των  $-9$  με  $-3^{\circ}\text{C}$  και στη λειτουργία του ψύκτη  $1^{\circ}\text{C}$  ή και υψηλότερες. Το σύστημα ice harvester ξεχωρίζει τις λειτουργίες παραγωγής πάγου και αποθήκευσης ενέργειας, πράγμα που κάνει την εγκατάσταση ευέλικτη ώστε να χρησιμοποιείται σε περιόδους μη-αιχμής. Αφού ο πάγος δεν αποθηκεύεται πάνω στην επιφάνεια παραγωγής, δεν είναι απαραίτητη η πλήρης τήξη του πάγου κάθε μέρα για τη διατήρηση υψηλού βαθμού απόδοσης λειτουργίας. Το σύστημα και η δεξαμενή αποθήκευσης είναι εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα πράγμα το οποίο σημαίνει ότι συστήματα ελέγχου ποιότητας του νερού και συστήματα προστασίας ενάντια της διάβρωσης είναι απαραίτητα, αφού το νερό στη δεξαμενή έρχεται συνεχώς σε επαφή με τον αέρα λόγω της ανακυκλοφορίας.

Η δεξαμενή είναι γενικότερα απλή, χωρίς εσωτερικά εξαρτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα αποθήκευσης. Η γεωμετρία της δεξαμενής παρ' όλ' αυτά μπορεί να επηρεάσει την αποθηκευτική ικανότητα της μονάδας, καθώς η γωνία με την οποία τα φίλμ του πάγου πέφτουν στη δεξαμενή μπορεί να έχουν σαν συνέπεια όταν η τελευταία γεμίζει, να αφήνουν κενά στο εσωτερικό της όπου δεν υπάρχει καθόλου πάγος, πράγμα που προφανώς ελαττώνει την ποσότητα του πάγου που τελικά δέχεται η δεξαμενή. Οι δεξαμενές αυτές είναι αρκετά συχνά χτισμένες στον τόπο της εγκατάστασης, τσιμεντένιες και παραλληλεπίπεδες. Παρ' όλ' αυτά συναρμολογίσιμο τσιμέντο (έτοιμοι τοίχοι), χάλυβας ή υαλοβάμβακας είναι υλικά τα οποία επίσης

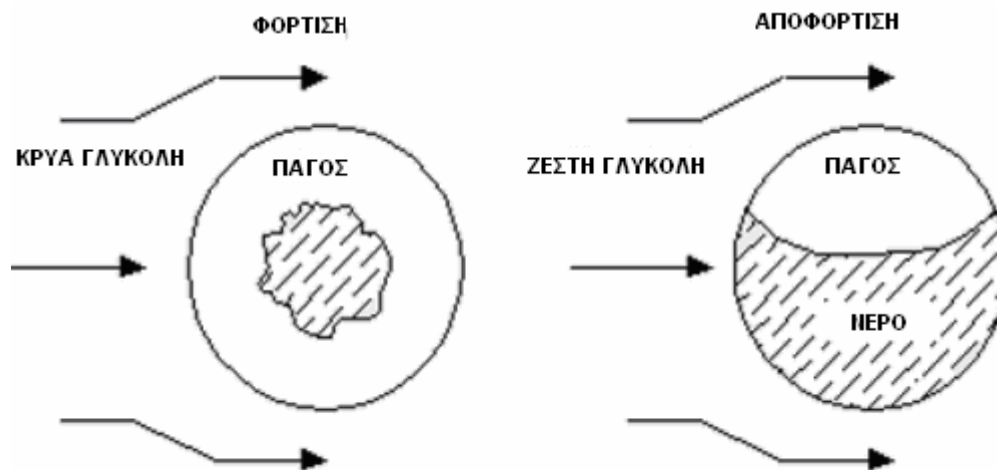


μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή δεξαμενής. Οι επιφάνειες του ατμοποιητή συνήθως είναι από ανοξείδωτο χάλυβα. [79]

#### 9.3.4. Πάγος σε μικροκάψουλες

Αυτή η τεχνική βασίζεται σε μικρά δοχεία (μικροκάψουλες) τα οποία είναι γεμάτα με νερό και εμβαπτισμένα σε δεξαμενή αποθήκευσης. Το νερό στο εσωτερικό της κάψουλας παγώνει και ο πάγος λιώνει όταν το δευτερεύον ψυκτικό πχ γλυκόλη/νερό, κυκλοφορεί μέσα στη δεξαμενή. Η θερμοκρασία φόρτισης είναι από  $-6$  έως  $-3^{\circ}\text{C}$ .

Τα πλαστικά αυτά δοχεία μπορεί να είναι παραλληλεπίπεδα, σφαιρικά ή δακτυλιοειδή. Στις ΗΠΑ υπάρχουν διαθέσιμα δύο σχέδια παραλληλεπίπεδα δοχεία (17 και 4,2 lt) και σφαιρίδια με πτυχωσεις ή λακκάκια διαμέτρου περίπου 100mm. Στην Ευρώπη σκληρές άκαμπτες σφαίρες χρησιμοποιούνται επίσης με διαμέτρους 95mm και 75mm. Ο αριθμός των δοχείων που απαιτούνται για την εκάστοτε εφαρμογή εξαρτάται από την απαιτούμενη αποθηκευτική ικανότητα. Για παράδειγμα, 3.5kW αποθηκευτικής ικανότητας μπορούν να παραχθούν με περίπου 70 σφαίρες διαμέτρου 10cm. Το σχήμα 9.10 παρουσιάζει την αρχή λειτουργίας του συστήματος αυτού.



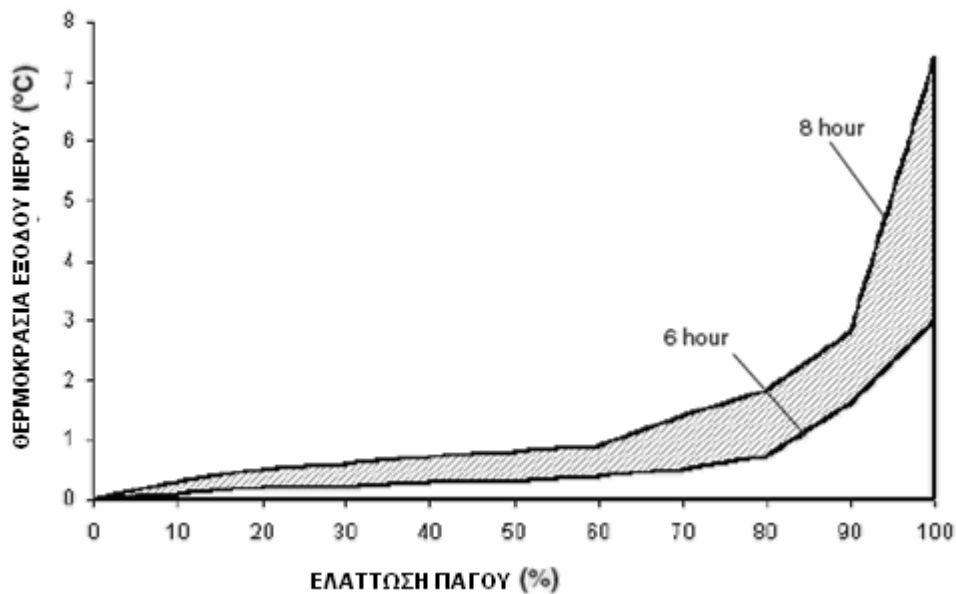
**ΣΧΗΜΑ 9.10:** Αρχή λειτουργίας συστήματος με πάγο σε μικροκάψουλες

Η αποθήκευση πάγου σε κάψουλες απαιτεί περίπου 0.019 με  $0.023\text{m}^3$  δεξαμενής ανά kWh διαθέσιμης αποθηκευτικής ικανότητας. Η δεξαμενή μπορεί να είναι ανοικτή και σε ατμοσφαιρική πίεση, ή κλειστή και υπό πίεση, κατασκευασμένη από χάλυβα, τσιμέντο, υαλοβάμβακα κλπ. Οι κάψουλες είναι κατασκευασμένες από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο και είναι σχεδιασμένες να ακολουθούν την διαστολή του παγωμένου νερού. Σε δεξαμενές με σφαιρικές κάψουλες το δευτερεύον ψυκτικό ρέει κάθετα στη δεξαμενή, ενώ για παραλληλεπίπεδες κάψουλες ρέει οριζόντια. Το σχήμα και το μέγεθος της δεξαμενής περιορίζεται μόνο από την τελική ικανότητα της δεξαμενής να εξασφαλίζει ίδια θερμοροή μεταξύ των δοχείων (κάψουλες).

Ένα τέτοιο σύστημα ενσωματωμένου πάγου μπορεί να λειτουργήσει με τον ψύκτη ανάντι ή κατάντι, αντίστοιχα, όπως στο σχήμα 9.6. Είναι επίσης δυνατή μια σύνδεση των δεξαμενών και του ψύκτη εν παραλλήλω. [79]

### 9.3.4.1 Φόρτιση και αποφόρτιση

Ο πάγος σε μικροκάψουλες έχει ένα σταθερά ελαττούμενο ρυθμό αποφόρτισης, αν διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία αποφόρτισης, ή μια σταθερά αυξανόμενη θερμοκρασία, αν διατηρείται σταθερός ο ρυθμός αποφόρτισης. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι αποτέλεσμα της συνεχώς ελαττούμενης επιφάνειας πάγου η οποία έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα του δοχείου καθώς λιώνει ο πάγος. Το σχήμα 9.11 παρουσιάζει ένα τυπικό εύρος θερμοκρασιών αποφόρτισης για σταθερούς ρυθμούς αποφόρτισης για περιόδους από 6 έως 8 ώρες με θερμοκρασία εισόδου 10°C.



**ΣΧΗΜΑ 9.11:** Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος

Οι κάψουλες αυτές είναι ευαίσθητες στο φαινόμενο supercooling ή στην ψύξη του νερού πιο κάτω από το σημείο πήξης του, πριν ξεκινήσει η παραγωγή πάγου. Το φαινόμενο supercooling, το οποίο λαμβάνει χώρα μόνο σε πλήρως αποφορτισμένες δεξαμενές όπου δεν υπάρχει καθόλου πάγος στο εσωτερικό τους, έχει σαν αποτέλεσμα ελαττωμένους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας στην αρχή της φόρτισης. Προσθέτοντας συμπυκνωτικούς παράγοντες η επίδραση του φαινομένου της υπέρψυξης μπορεί να εξομαλυνθεί. [79]

### 9.3.5. Υλικά αλλαγής φάσης

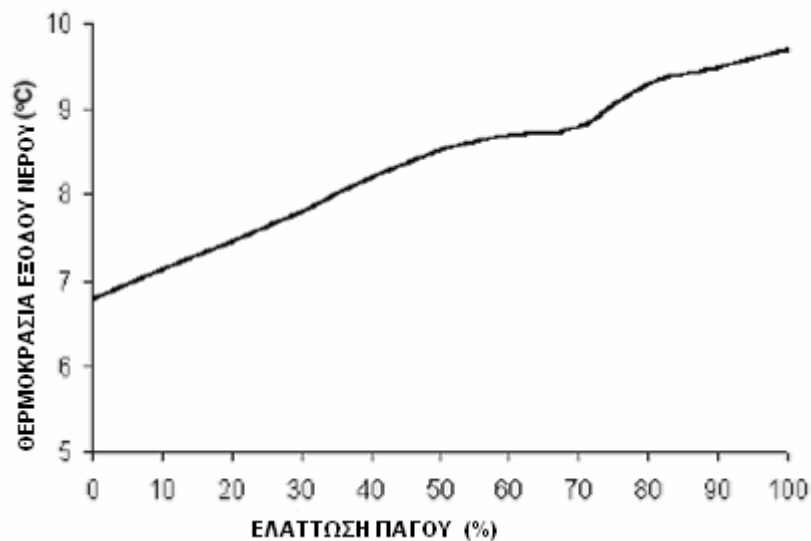
Τα εύτηκτα άλατα είναι ένα χημικό μίγμα το οποίο αλλάζει φάση από τη στερεά στην υγρή και αντίστροφα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Τα εύτηκτα (ή ευτηκτικά) άλατα έχουν χρησιμοποιηθεί για θερμικές εφαρμογές ήδη από το 19<sup>ο</sup> αιώνα, αλλά μόλις πρόσφατα χρησιμοποιήθηκαν για ψυχρή αποθήκευση. Το πιο σύννητες υλικό για ψυχρές εφαρμογές είναι ένα μίγμα ανόργανου άλατος, νερού και σταθεροποιητικών παραγόντων, το οποίο αλλάζει φάση στους 8.3°C. Αυτή η φόρμουλα έχει ειδική λανθάνουσα θερμότητα 5.4 kJ/kg και πυκνότητα 1490 kg/m<sup>3</sup>. Αυτό το ΥΑΦ μπορεί να ενσωματωθεί σε παραλληλεπίπεδα πλαστικά δοχεία, ή ακόμα σε σφαιρικές και δακτυλιοειδείς κάψουλες. Η δεξαμενή αποθήκευσης μπορεί

να είναι ελεύθερη σε ατμοσφαιρική πίεση (ανοικτή) ή κλειστή και υπό πίεση, και να είναι από τσιμέντο, χάλυβα ή υαλοβάμβακα.

Το εύτηκτο άλας μπορεί να φορτιστεί με συμβατικούς ψύκτες και να δώσει κρύο νερό από 4 έως 6°C. Αυτό επιτρέπει στο σύστημα αποθήκευσης ψύξης να συνδεθεί με ένα υπάρχον σύστημα χωρίς μεταβολές στους υπάρχοντες ψύκτες και με ελάχιστες ή καθόλου αλλαγές στο σύστημα διανομής, όπως επίσης να συνδυαστεί σε ανάντι ή κατάντι συνδέσεις.

Επί του παρόντος εξελίσσεται ένα εύτηκτο άλας το οποίο μεταβαίνει φάση στους 5°C. Η θερμοκρασία αποφόρτισης του η οποία κυμαίνεται μεταξύ 6 και 7°C είναι συμβατή με τα συνήθη συστήματα διανομής και κλιματισμού. Επίσης υπάρχουν εύτηκτα μίγματα αλάτων για τον υποβιβασμό της θερμοκρασίας αποθήκευσης για συστήματα αποθήκευσης πάγου. Συστήματα ice-on-coil με εσωτερική τήξη χρησιμοποιούν ΥΑΦ με κατάλληλα πρόσθετα, και έτσι είναι δυνατή η επίτευξη θερμοκρασιών στερεοποίησης από -2 έως -11°C.

Οι κάψουλες που περιέχουν τα ΥΑΦ δεν επιπλέουν αφού η πυκνότητα του εύτηκτου άλατος είναι περίπου 1,5 φορά αυτής του νερού. Ακόμη, δεν διαστέλλεται με την στερεοποίηση, οπότε δεν εμφανίζεται πίεση-τάση στα τοιχώματα της κάψουλας. Το σχήμα 9.12 παρουσιάζει τα τυπικά της θερμοκρασίας αποφόρτισης ενός εύτηκτου άλατος, όπου η θερμοκρασία αυξάνει σταθερά κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης περίπου από τους 7°C στην αρχή της αποφόρτισης έως περίπου τους 10°C. [79,80]



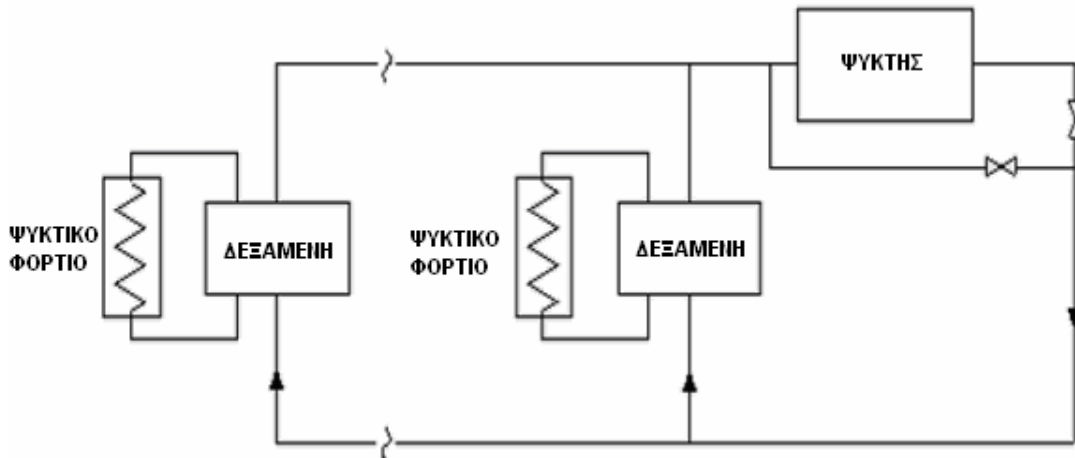
**ΣΧΗΜΑ 9.12:** Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος

### **9.3.6. Διφασικό μίγμα**

Σε ένα σύστημα διφασικού μίγματος πάγου, κομμάτια πάγου δημιουργούνται από μία γεννήτρια πάγου σε διμερές υγρό μίγμα (πχ νερό και γλυκόλη) και μεταφέρονται στη δεξαμενή αποθήκευσης, όπου και τα κομμάτια πάγου αποθηκεύονται μαζί με νερό. Αυτή το διφασικό μίγμα οδηγείται από τη δεξαμενή σε σημεία ανάγκης ψυκτικού φορτίου μέσω αντλιών, όπου και ο πάγος του μίγματος λιώνει. Το ζεστό νερό επιστροφής επανατροφοδοτείται είτε στην παγογεννήτρια διάταξη είτε κατ' ευθείαν στη δεξαμενή για να ψυχθεί εκ νέου. Το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να έχει διάφορες διατάξεις, οι περισσότερες συνηθισμένες εκ των οποίων είναι οι μέθοδοι διανεμημένης και κεντρικής αποθήκευσης.

### 9.3.6.1. Συστήματα διανεμημένης αποθήκευσης

Σε ένα σύστημα διανεμημένης αποθήκευσης το διφασικό μίγμα πάγου μέσω αντλιών οδηγείται σε ένα αριθμό από δεξαμενές και αποθηκεύεται. Κάθε τέτοια δεξαμενή βρίσκεται εγκατεστημένη σε κάθε ξεχωριστό κτίριο του δικτύου της ψυκτικής εγκατάστασης. Το διφασικό μίγμα πάγου εισέρχεται στη δεξαμενή όπου τα κομμάτια πάγου διαχωρίζονται από το νερό λόγω βαρύτητας. Το σύστημα έτσι έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί νερό χωρίς πάγο για τις ψυκτικές του ανάγκες, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.13.



**ΣΧΗΜΑ 9.13:** Διάταξη συστήματος διανεμημένης αποθήκευσης

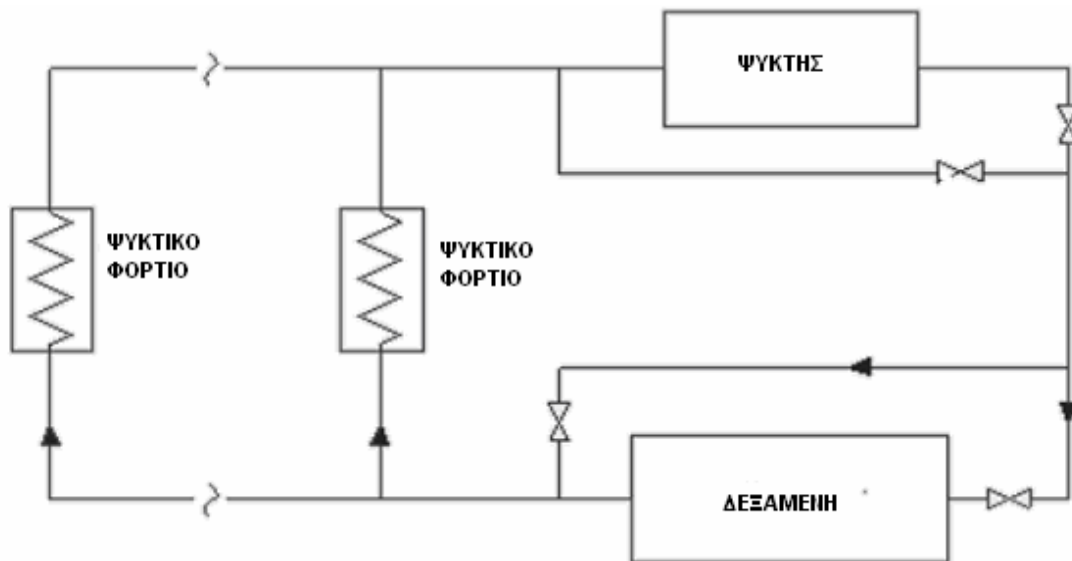
Οι δεξαμενές αποθήκευσης του διανεμημένου συστήματος παρέχουν μία ρύθμιση του συστήματος διανομής και του επιμέρους ψυκτικού φορτίου κάθε κτιρίου. Η απόζευξη του συστήματος ψύξης επιτρέπει στο σύστημα διανομής να παρέχει το μέσο ψυκτικό φορτίο, παρά το ψυκτικό φορτίο αιχμής. Εάν το μέσο ψυκτικό φορτίο είναι αισθητά χαμηλότερο από το φορτίο αιχμής, μπορεί να εγκατασταθεί δίκτυο σωληνώσεων διανομής μικρότερης διαμέτρου. Για να μπορέσει το σύστημα να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις του μέγιστου ψυκτικού φορτίου πρέπει η παραγωγή διφασικού μίγματος νερού/πάγου να είναι συνεχής. Αυτό το μίγμα οδηγείται μέσω αντλιών στις επιμέρους δεξαμενές. Ανάλογα με την ώρα της ημέρας, αν το φορτίο του κτιρίου είναι χαμηλό, το μίγμα θα συγκεντρωθεί στη δεξαμενή. Αργότερα, όταν το ψυκτικό φορτίο θα αυξηθεί, η δεξαμενή φορτίζεται από το σύστημα διανομής και ταυτόχρονα αποφορτίζεται για να ικανοποιήσει τις αυξημένες ψυκτικές ανάγκες.

Σε περιόδους όπου το ψυκτικό φορτίο είναι γενικά χαμηλό, το νερό επιστροφής ενδέχεται να βρίσκεται σε θερμοκρασία αρκετά χαμηλότερη από το σημείο σχεδίασης, αφήνοντας έτσι αχρησιμοποίητη ψυκτική ικανότητα. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας σωλήνες για ψυκτική ικανότητα λίγο μεγαλύτερη από τη μέση υπολογισμένη, ώστε οι προαναφερθείσες απώλειες να περιορίζονται κατά το δυνατόν.

Γενικά το σύστημα διανεμημένης αποθήκευσης είναι βέλτιστα οικονομικό όταν ο λόγος φορτίου αιχμής/μέσου είναι μεγαλύτερος του 2 και όταν ο λόγος λανθάνουσας/αισθητής θερμότητας μεγαλύτερος του 1. [79]

### 9.3.6.2. Συστήματα κεντρικής αποθήκευσης

Στο σύστημα κεντρικής αποθήκευσης, η ψυκτική εγκατάσταση εφοδιάζεται με μία κεντρική δεξαμενή, η οποία είναι τοποθετημένη κοντά στη μονάδα παραγωγής της ψύξης, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.14. Και σε αυτή τη διάταξη υπάρχει το πλεονέκτημα της ρύθμισης μεταξύ της μονάδας παραγωγής ψύξης και της πραγματικής ψυκτικής απαίτησης. Στο σύστημα κεντρικής αποθήκευσης το σύστημα διανομής δεν είναι αποχωρισμένο από το φορτίο του επιμέρους κτιρίου και ακολουθεί την πραγματική ψυκτική απαίτηση του κάθε κτιρίου ξεχωριστά. Ως εκ τούτου οι διάμετρος των σωλήνων διανομής θα είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τους σωλήνες του συστήματος διανεμημένης αποθήκευσης.



**ΣΧΗΜΑ 9.14:** Διάταξη συστήματος κεντρικής αποθήκευσης

Τα συστήματα κεντρικής αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν βάσει δύο στρατηγικών λειτουργίας. Το διφασικό μίγμα νερού/ πάγου μπορεί να βρίσκεται αποθηκευμένο σε συγκεκριμένο σημείο και να μην κυκλοφορεί στο σύστημα και να χρησιμοποιείται για την ψύξη του θερμού νερού επιστροφής, ώστε επιτυγχάνεται η συνεχής ανακυκλοφορία νερού στην ψυκτική εγκατάσταση σε θερμοκρασία πολύ κοντά στο σημείο στερεοποίησής του. Εναλλακτικά, το μίγμα μπορεί να αποθηκεύεται και να κυκλοφορεί στο σύστημα κατά τις ώρες ψυκτικού φορτίου αιχμής. Με οποιαδήποτε από τις δύο στρατηγικές, ο όγκος της αποθήκευσης είναι ελαττωμένος σε σχέση με ένα σύστημα κρύου νερού. Οι δε δεξαμενές αποθήκευσης για το διφασικό μίγμα μπορούν από άποψης κόστους να ελαττωθούν κατά 60% σε σύγκριση με τις δεξαμενές μιας συμβατικής ψυκτικής διάταξης.

Προκειμένου για να αντιμετωπίσει το σύστημα το μέγιστο φορτίο σχεδίασης, το σύστημα ψύξης πρέπει να λειτουργεί συνεχώς. Σε περιόδους μικρής ψυκτικής απαίτησης το παραγόμενο διφασικό μίγμα οδηγείται στη δεξαμενή αποθήκευσης, από όπου απάγεται είτε μίγμα είτε κρύο νερό κατά περίπτωση, για την αντιμετώπιση αυτών των χαμηλών απαιτήσεων. Άρα για φορτία μικρότερα από το μέσο φορτίο λειτουργίας, η δεξαμενή φορτίζεται. Αντίστοιχα σε περιόδους υψηλού ψυκτικού φορτίου, η δεξαμενή αδειάζει για να ικανοποιηθεί το φορτίο αυτό, οπότε επιτυγχάνεται και η αποφόρτισή της. [79]

### 9.3.6.3. Διφασικό μίγμα νερού-πάγου

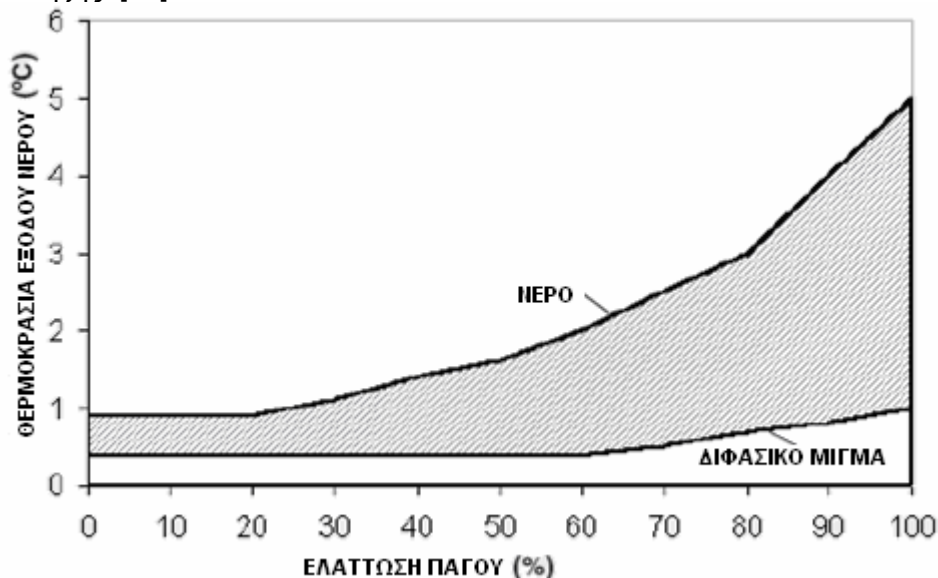
Εκτός από την παραγωγή διφασικού μίγματος πάγου-νερού, η ικανότητα τήξης πάγου απαιτεί επιμέρους σχεδιασμό. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις λειτουργίας, όταν το νερό βρίσκεται σε θερμοκρασίες λίγο πάνω από το σημείο τήξης, τα ψυκτικά φορτία ικανοποιούνται με νερό και όχι με διφασικό μίγμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο πάγος στη δεξαμενή αποθήκευσης τήκεται με τη βοήθεια του ζεστού νερού επιστροφής. Το διφασικό αυτό μίγμα έχει την τάση να συσσωρεύεται στην κορυφή της δεξαμενής αποθήκευσης, περιορίζοντας το φαινόμενο της τήξης στην περιοχή των ανώτερων στρωμάτων της δεξαμενής αποθήκευσης που βρίσκεται κοντά στην επιστροφή του νερού.

Χρησιμοποιούνται αρκετές μηχανικές μέθοδοι για την αύξηση του ποσοστού του πάγου το οποίο αλλάζει φάση. Τέτοιες μέθοδοι όπως η ανάδευση ή η χρήση αντλιών ανακυκλοφορίας, δημιουργούν μία εσωτερική κυκλοφορία του μίγματος στο μέσα στη δεξαμενή αυξάνοντας το προαναφερθέν ποσοστό, και είναι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται με επιτυχία. Επίσης η προσθήκη ακροφυσίων στην έξοδο του νερού επιστροφής ισοκατανέμουν το νερό στην επιφάνεια του ανακυκλοφορούντος μίγματος αυξάνοντας ακόμη περισσότερο το βαθμό ομοιομορφίας της τήξης.

### 9.3.6.4. Φόρτιση και αποφόρτιση

Τα κομμάτια του πάγου στο εσωτερικό μίας δεξαμενής αποθήκευσης έχουν την τάση να αυξάνονται και να συσσωρεύονται. Υπάρχει λοιπόν ανάγκη σωστής ανακυκλοφορίας αυτών των κομματιών στο εσωτερικό της δεξαμενής, ώστε η διαδικασία τήξης ή μεταφοράς διφασικού μίγματος να είναι αποδοτική.

Η θερμοκρασία του διφασικού μίγματος εξαρτάται από το ποσοστό πάγου που περιέχεται στη δεξαμενή. Συστήματα τα οποία ανακυκλοφορούν διφασικό μίγμα, έχουν θερμοκρασία εξόδου πολύ κοντά στους 0 βαθμούς. Σε συστήματα στα οποία στην έξοδό τους κυκλοφορεί νερό, η θερμοκρασία του είναι συνάρτηση του πάγου που υπάρχει στη δεξαμενή. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι παρόμοιες με τις προηγούμενες απλώς λίγο υψηλότερες. Όλες οι παραπάνω θερμοκρασίες εξόδου πάντως είναι χαμηλότερες εάν χρησιμοποιείται κάποια ουσία καταστολής του σημείου τήξης. [79]



**ΣΧΗΜΑ 9.15:** Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος



Το διφασικό μίγμα συνήθως παράγεται μέσα σε διμερές υγρό νερού και γλυκόλης. Άλλα πιθανά κατασταλτικά του σημείου τήξης εκτός από τη γλυκόλη είναι τα άλατα. Για παράδειγμα το θαλασινό νερό χρησιμοποιείται σε πολλά σκάφη ως ψυκτικό μέσο. Άλλη χρησιμοποιούμενη εφαρμογή είναι η χρήση νιτρικών και νιτρωδών αλάτων, η οποία εμφανίζει το πρόσθετο πλεονέκτημα να προστατεύει συγκεκριμένα μέταλλα από τη διάβρωση. [79]



## ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

### ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

### ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



## 10. Διαφορικές εξισώσεις φαινομένων μεταφοράς

### 10.1. Εισαγωγή

Όλες οι εφαρμογές που παρουσιάστηκαν στο πρώτο μέρος βασίζονται στο φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας. Μάλιστα, αυτή καθαυτή η θερμική συμπεριφορά των ΥΑΦ κυβερνάται από τη διάχυση της θερμότητας, πολύ περισσότερο απ' ό,τι από τους άλλους δύο τρόπους μεταφοράς θερμότητας μαζί.

Ζητούμενο σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις είναι η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας, όπως προκύπτει από τη γενική εξίσωση μεταφοράς. Η δυσκολία ή η αδυναμία επίλυσης τέτοιων διαφορικών εξισώσεων αναλυτικά άνοιξε δρόμους για την ανάπτυξη μεθόδων διακριτοποίησης της διαφορικής εξίσωσης και εν τέλει για την αριθμητική επίλυσή της.

Η στερεοποίηση ενός υγρού δείγματος λαμβάνει χώρα σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία μόνο σε ομογενές δείγμα ενός συστατικού. Στην περίπτωση μινμάτων και κραμάτων μετάλλων η στερεοποίηση ολοκληρώνεται σε εύρος θερμοκρασιών με δημιουργία ζώνης συνύπαρξης των δύο φάσεων (mushy zone). Επομένως οι περιοχές που αναγνωρίζονται κατά την εξέλιξη του φαινομένου είναι τρεις: η στερεή, η υγρή και η χυλώδης περιοχή (mushy zone) όπου στερεές μάζες υλικού κινούνται μαζί με το υλικό που βρίσκεται σε υγρή κατάσταση.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση αλλαγής φάσης είναι κυρίως δύο: κινητά όρια ή σταθερό πλέγμα. Εκτός από αυτή τη διάκριση μπορεί να γίνει διαχωρισμός των προσεγγίσεων με το αν λαμβάνεται υπ' όψων η επίδραση της κίνησης του υγρού ΥΑΦ στη μετάδοση θερμότητας ή θεωρείται ότι το φαινόμενο εξελίσσεται μόνο με αγωγή και αν η αλλαγή φάσης θεωρείται ότι πραγματοποιείται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία ή σε εύρος θερμοκρασιών.

Προβλήματα στη μοντελοποίηση του φαινομένου της τήξης παρουσιάζονται κατά κύριο λόγο από την τυχαία κίνηση του υλικού στη χυλώδη περιοχή καθώς και την επίδραση της βαρύτητας ενώ για το φαινόμενο της στερεοποίησης πρόσθετο πρόβλημα είναι η μεγάλη μεταβολή του όγκου που μπορεί να δημιουργήσει κοιλότητες αλλά και αποκόλληση μάζας υλικού από τις επιφάνειες συναλλαγής. Η μοντελοποίηση με τεχνικές κινητών ορίων, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη λόγω της αλληλεξάρτησης της κίνησης του ορίου στερεού-υγρού, με το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Η δυσκολία πρόβλεψης της θέσης που σχηματίζεται η διεπιφάνεια, ενισχύεται από την επίδραση της βαρύτητας και την ανομοιογένεια του μίγματος. Επιπλέον σε περιπτώσεις κυκλικής φόρτισης δε μπορεί να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια η θερμική υστέρηση που παρουσιάζει το υλικό.

### 10.2. Γενική εξίσωση μεταφοράς

Είναι μία γενική μορφή εξίσωσης, που περιγράφει "ταυτόχρονα" τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, μάζας και ορμής. Περιλαμβάνει στην πλήρη μορφή της όλες τις δυνατές παραμέτρους του φαινομένου μεταφοράς, δηλαδή μοριακή κίνηση (διάχυση ή αλλιώς αγωγή), κίνηση ρευστού (συναγωγή) καθώς και όλες τις υπόλοιπες σε ένα γενικό όρο.[1]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\Phi) = \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial z}\right) + S_{\Phi} \end{aligned} \quad [10.1]$$

ή διαφορετικά

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho\vec{U}\Phi) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad}\Phi) + S_{\Phi} \quad [10.2]$$

όπου  $\Phi$  είναι η εξαρτημένη μεταβλητή,  $t$  ο χρόνος,  $u$ ,  $v$  και  $w$  οι τρεις διανυσματικές συνιστώσες της ταχύτητας ρευστού  $U$  κατά τις  $x$ ,  $y$ ,  $z$  διευθύνσεις αντίστοιχα.

Οι όροι στην εξίσωση έχουν την παρακάτω φυσική σημασία:

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi)$  είναι ο χρονικός όρος (η ύπαρξη ή όχι αυτού χαρακτηρίζει το φαινόμενο μεταφοράς αντίστοιχα μεταβατικό ή μόνιμο)

$\text{div}(\rho\vec{U}\Phi)$  είναι ο όρος της συναγωγής, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό εκείνο επί του συνολικού φαινομένου μεταφοράς το οποίο συντελείται μέσω αλληλεπίδρασης δύο σωμάτων και για να ισχύει κάτι τέτοιο πρέπει να υπάρχει κίνηση ρευστού, εξ ου και η παρουσία της διανυσματικής ταχύτητας. (Η επαφή δύο στερεών σωμάτων αποτελεί δύο προβλήματα αγωγής θερμότητας με μία κοινή οριακή συνθήκη.)

$\text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad}\Phi)$  είναι ο όρος της διάχυσης (ή αγωγής), ο οποίος εκφράζει το ποσοστό εκείνο επί του συνολικού φαινομένου μεταφοράς το οποίο συντελείται μέσω μοριακής αλληλεπίδρασης σε κάθε σώμα.

$S_{\Phi}$  είναι ο όρος των πηγών, ο οποίος εκφράζει το ρυθμό παραγωγής ή καταστροφής ανά μονάδα όγκου της μεταφερόμενης ποσότητας

### 10.3. Γενική εξίσωση μεταφοράς ενέργειας

Η γενική εξίσωση μεταφοράς ενέργειας, είναι η διαφορική εξίσωση εκείνη που περιγράφει πλήρως, με όλες του τις παραμέτρους το φαινόμενο μεταφοράς ενέργειας-θερμότητας, και πηγάζει από τη γενική εξίσωση μεταφοράς για τις παρακάτω συγκεκριμένες παραμέτρους:

$$\Phi = T \quad [10.3]$$

$$\Gamma_{\Phi} = k / C_P \quad [10.4]$$

$$S_{\Phi} = S_h / C_P \quad [10.5]$$

Επομένως, γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \text{div}(\rho\vec{U}h) = \text{div}(k * \text{grad}T) + S_h \quad [10.6]$$

όπου  $h$  είναι η ειδική ενθαλπία και ο όρος  $S_h$  αποτελεί τον όρο των πηγών, καθώς και τη διάχυση της ενέργειας λόγω του επιπέδου τύρβης στην κίνηση του σώματος. Συνήθως είναι αμελητέα ποσότητα εκτός από περιπτώσεις έντονων διακυμάνσεων



ταχύτητας όπου στους υπολογισμούς λαμβάνουν μέρος και τα διάφορα μοντέλα τύρβης, ώστε να προσεγγιστεί κατά το δυνατόν καλύτερα η κινητική σπότε και ενεργειακή κατάσταση του σώματος.[1]

Για σταθερό  $C_p$  με  $h = C_p T$ , έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \text{div}(\rho \vec{U} T) = \text{div}\left(\frac{k}{C_p} * \text{grad} T\right) + \frac{S_h}{C_p} \quad [10.7]$$

## **11. Εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αριθμητικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για να αντιμετωπιστούν εκείνα τα προβλήματα στα οποία λαμβάνουν μέρος διαφορικές εξισώσεις οι οποίες είναι πολύ δύσκολο ή ακόμα και αδύνατο να επιλυθούν αναλυτικά. Μία από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών.

Μία τέτοια διαφορική εξίσωση είναι και αυτή που περιγράφει το φαινόμενο της μονοδιάστατης, μόνιμης ή όχι μεταφοράς θερμότητας. Εδώ περιγράφεται ο τρόπος εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών σε ένα τέτοιο πρόβλημα, με σκοπό την επίλυσή του. Τα παρακάτω είναι βασικά στοιχεία της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών.

### **11.1. Διακριτοποίηση διαφορικών εξισώσεων**

Η περιοχή του προβλήματος, ή διαφορετικά η περιοχή επίλυσης, χωρίζεται σε μικρότερες περιοχές, βάσει ενός πλέγματος γραμμών το οποίο μπορεί να ποικίλλει ως προς τις διαστάσεις του, συνήθως όμως είναι ομοιόμορφο. Τα σημεία τομής των γραμμών ονομάζονται κόμβοι. Επομένως η περιοχή έχει πλέον χωριστεί σε υποπεριοχές που καθορίζονται μεταξύ τεσσάρων γειτονικών κόμβων, ή όπως συνηθίζεται, ομοιόμορφα γύρω από έναν κόμβο.

Σε κάθε υποπεριοχή αντικαθίσταται η διαφορική εξίσωση, με αλγεβρική η οποία συνδέει τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής του προβλήματος στους εκατέρωθεν γειτονικούς κόμβους. Σκοπός είναι η διαμόρφωση ενός επιλύσιμου γραμμικού ή μη συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων η λύση του οποίου θα έχει καθορίσει με προκαθορισμένη ακρίβεια την τιμή της μεταβλητής του προβλήματος σε κάθε θέση της περιοχής υπολογισμού.

Όσο πυκνότερο το πλέγμα, τόσο ακριβέστερη η λύση, άρα τόσο καλύτερη η προσέγγιση της αναλυτικής λύσης του προβλήματος μέσω της αριθμητικής μεθόδου. Βέβαια και εδώ υπάρχουν περιορισμοί, καθώς ένα ιδιαίτερα πυκνό πλέγμα καταλήγει προφανώς σε τεράστιο σύστημα εξισώσεων, πράγμα που απαιτεί μεγάλη επεξεργαστική ισχύ από μόνο του, πόσω δε μάλλον, όταν η επίλυση απαιτεί και επαναληπτική διαδικασία.

Η παραπάνω μέθοδος χωρισμού της περιοχής επίλυσης σε υποπεριοχές ονομάζεται διακριτοποίηση της περιοχής επίλυσης και οι αλγεβρικές εξισώσεις που προκύπτουν, ονομάζονται ως εκ τούτου διακριτοποιημένες εξισώσεις.

Ένα σύστημα διακριτοποιημένων εξισώσεων ενδέχεται να διαφέρει στην έκφραση των εξισώσεών του, με ένα άλλο σύστημα το οποίο περιγράφει ακριβώς το ίδιο πρόβλημα. Αυτό οφείλεται στη μέθοδο διακριτοποίησης της περιοχής επίλυσης.

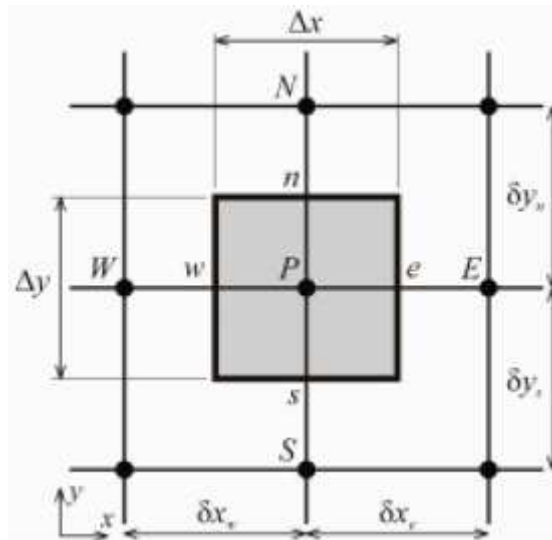
Εδώ θα ασχοληθούμε με τη μέθοδο του όγκου αναφοράς και μετά θα περιγραφεί η μέθοδος σχηματισμού του συστήματος εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών. [1,3]

#### **11.1.1. Μέθοδος όγκου αναφοράς**

Αφού η παρούσα εργασία ασχολείται με μονοδιάστατα προβλήματα, και εδώ θα εξεταστεί η διαφορική εξίσωση της μόνιμης μονοδιάστατης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial}{\partial x} \right) = 0 \quad [11.1]$$

Ακολουθεί σκαρίφημα το οποίο παριστάνει την περιοχή επίλυσης μετά την εφαρμογή του πλέγματος σε αυτήν, καθώς και τα αξιοσημείωτα μεγέθη. Το σκαρίφημα αναφέρεται σε διδιάστατο πρόβλημα. Είναι εύκολη η σύλληψη του κυψελοειδούς (κυβικού σχήματος) πλέγματος το οποίο αναφέρεται σε τριδιάστατο πρόβλημα. Στην παρούσα παράγραφο σημασία έχει μόνο η  $x$  διεύθυνση, καθώς το πρόβλημα θεωρείται μονοδιάστατο. [1,3]



**ΣΧΗΜΑ11.1:** Όγκος αναφοράς

Η εξίσωση θα ολοκληρωθεί στο γραμμοσκιασμένο όγκο, ο οποίος περιβάλλει τον κόμβο P του πλέγματος. Οι γειτονικοί κόμβοι οι οποίοι χαρακτηρίζονται με βάση τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τον υπό εξέταση κόμβο, συμβολίζονται ως W, E, N, S (West, East, North, South), όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι πλευρές του κόμβου ονομάζονται με τα αντίστοιχα γράμματα του πλησιέστερου γειτονικού κόμβου με τα αντίστοιχα μικρά γράμματα. Αυτές οι πλευρές συνήθως διχοτομούν τις αντίστοιχες αποστάσεις μεταξύ του κεντρικού κόμβου και των γειτονικών του.

Η ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης της μόνιμης μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας στον κόμβο αυτό, δίνει:

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx = 0 \quad [11.2]$$

Με την υπόθεση της γραμμικής μεταβολής της θερμοκρασίας με την απόσταση  $x$ , είναι:

$$\begin{aligned} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx &\cong k_e \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - k_w \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w = \\ &= k_e \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - k_w \frac{T_P - T_W}{(\delta x)_w} = 0 \end{aligned} \quad [11.3]$$

Κάνοντας λοιπόν τις πράξεις στο τελευταίο σκέλος, χωρίζοντας σε επιμέρους παράγοντες τις θερμοκρασίες των κόμβων που λαμβάνουν μέρος στον υπολογισμό, προκύπτει εξίσωση της μορφής:

$$A_P T_P = A_W T_W + A_E T_E \quad [11.4]$$

Όπου:

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad [11.5]$$

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad [11.6]$$

$$A_P = A_E + A_W \quad [11.7]$$

Η **εξίσωση πεπερασμένων διαφορών** που προέκυψε βάσει της παραπάνω μεθοδολογίας, εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Από αυτές τις εξισώσεις όπως γίνεται κατανοητό, πηγάζουν και οι δύο βασικές μέθοδοι (θερμοκρασίας και ενθαλπίας) οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην διεθνή βιβλιογραφία για την περιγραφή των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας μέσω πεπερασμένων διαφορών.

Η εξίσωση αυτή εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας στον κόμβο P, όπως η αντίστοιχη διαφορική εξίσωση εκφράζει τη διατήρηση της ενέργειας σε ένα απειροστό όγκο αναφοράς.

Ο ενεργειακός ισολογισμός στον όγκο αναφοράς, για τη μία διάσταση, δίνει:

$$\dot{Q}_w - \dot{Q}_e = 0 \quad [11.8]$$

Όπου ο δείκτης συμβολίζει την αντίστοιχη έδρα του όγκου αναφοράς στην οποία αναφέρεται η θερμοροή.

Εφαρμόζοντας τη σχέση του Fourier:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad [11.9]$$

ο ενεργειακός ισολογισμός με βάση την παραδοχή της γραμμικής μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης δίνει τη μορφή της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών:

Ισχύει ότι:

$$\dot{Q}_i = q_i A_i \quad [11.10]$$

Αφού λοιπόν, η επιφάνεια A είναι εξ ορισμού παντού η ίδια, είναι:

$$\begin{aligned} q_w - q_e &= 0 \Rightarrow \\ -\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right)_w - \left(-k \frac{\partial T}{\partial x}\right)_e &= 0 \Rightarrow \\ k_e \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - k_w \frac{T_P - T_W}{(\delta x)_w} &= 0 \end{aligned} \quad [11.11]$$

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η προκύπτουσα λύση ικανοποιεί την αρχή διατήρησης της θερμότητας όχι μόνο στον εκάστοτε όγκο αναφοράς αλλά και σε οποιαδήποτε ομάδα όγκων, οπότε προφανώς και σε όλη την περιοχή διακριτοποίησης- υπολογισμού. [2,4]

### **11.1.2. Υπολογιστικό πλέγμα**

Οι αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών κόμβων του υπολογιστικού πλέγματος, όπως προαναφέρθηκε δεν είναι υποχρεωτικά ίσες. Αντίθετα μάλιστα, σε περιπτώσεις όπου η μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής σε συγκεκριμένο σημείο της περιοχής επίλυσης είναι μεγάλη, ενδείκνυται πύκνωση του πλέγματος, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη παρακολούθηση του φαινομένου με μικρότερο αριθμό κόμβων και, συνακόλουθα, μικρότερες απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ.

Αυξανόμενη της λεπτότητας του ομοιόμορφου ή ανομοιόμορφου υπολογιστικού πλέγματος η αριθμητική λύση τείνει προς την αναλυτική λύση της υπό επίλυση διαφορικής εξίσωσης. Πέραν ενός βαθμού λεπτότητας πλέγματος επιτυγχάνεται κατάσταση, κατά την οποία οποιαδήποτε περαιτέρω εκλέπτυνση του υπολογιστικού πλέγματος προκαλεί αμελητέες διαφορές στην λύση, οπότε έχει ήδη επιτευχθεί λύση ανεξάρτητη της λεπτότητας του πλέγματος. [1]

### **11.2. Οριακές συνθήκες**

Από τα προηγούμενα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η εφαρμογή μεθόδου πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση της λύσης μιας διαφορικής εξίσωσης, καταλήγει σε (γραμμικό ή μη) σύστημα εξισώσεων. Το σύστημα αυτό όμως είναι από μόνο του μη επιλύσιμο.

Για παράδειγμα, σε (καταχρηστικό) υπολογιστικό ομοιόμορφο πλέγμα μίας διάστασης, έστω ότι διακρίνονται  $N$  ευθύγραμμα τμήματα. Αυτό αυτόματα σημαίνει ότι υπάρχουν  $N+1$  κόμβοι προς υπολογισμό, εκ των οποίων οι  $N-1$  είναι εσωτερικοί, δηλαδή έχουν εκατέρωθεν τους άλλους κόμβους. Ο διαχωρισμός γίνεται, γιατί η παραπάνω μέθοδος πεπερασμένων διαφορών εφαρμόζεται μόνο σε εσωτερικούς κόμβους υπολογιστικού πλέγματος.

Επομένως, μετά την εφαρμογή της μεθόδου προκύπτει σύστημα  $N+1$  αγνώστων, αφού πρέπει να υπολογιστεί η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής σε κάθε κόμβο και μόλις  $N-1$  εξισώσεων, πράγμα που από μόνο του καθιστά το σύστημα μη επιλύσιμο.

Οι δύο εξισώσεις που απαιτούνται δίνονται από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος.

Οι οριακές συνθήκες χωρίζονται σε τρία είδη, όπως περιγράφονται παρακάτω, και η παρούσα μελέτη ασχολείται μόνο με το πρώτο. Παρουσιάζονται οι οριακές συνθήκες προσαρμοσμένες στο φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας.

#### **1. Οριακή συνθήκη πρώτου είδους (Dirichlet):**

Είναι γνωστές οι τιμές της θερμοκρασίας στα δύο άκρα, εκεί δηλαδή όπου είναι αδύνατη η εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών, οπότε με γνωστές τις δύο αυτές θερμοκρασίες, το σύστημα υποβιβάζεται σε  $N-1$  επί  $N-1$ , άρα επιλύεται.

#### **2. Οριακή συνθήκη δεύτερου είδους (Neumann):**

Είναι γνωστές οι τιμές της θερμορροής στα δύο άκρα, οπότε με βάση την εξίσωση του Fourier κατασκευάζονται δύο ακόμα εξισώσεις και το σύστημα μετατρέπεται σε ένα επιλύσιμο  $N+1$  επί  $N+1$ .

3. Οριακή συνθήκη τρίτου είδους (συναγωγής):

Αν το πρόβλημα περιλαμβάνει κίνηση ρευστού στα όρια του υπό εξέταση σώματος και είναι επίσης γνωστές οι συναγωγιμότητες του ρευστού, καταστρώνονται δύο ακόμα εξισώσεις, βάση της εξίσωσης συναγωγής θερμότητας  $q=h_1(T_{\text{ρευστού},1}-T_1)$  και -όπως πριν- το σύστημα γίνεται  $N+1$  επί  $N+1$ . [2]

### 11.3. Επίλυση προκύπτοντος συστήματος

Αποδείχθηκε παραπάνω πως η εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών σε υπολογιστικό πλέγμα οδηγεί μέσω των οριακών συνθηκών στην κατάσταση επιλύσιμου συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων της μορφής:

$$A_P T_P = A_E T_E + A_W T_W \quad [11.12]$$

όπου τα  $P, E, W$  αναφέρονται στις σχετικές θέσεις των κάθε φορά διαδοχικών κόμβων.

Αλλάζοντας τους δείκτες, ώστε η εξίσωση να εκφράζει όλους του κόμβους, είναι:

$$A_i T_i = B_i T_{i+1} + C_i T_{i-1} \quad [11.13]$$

Στην περίπτωση όπου οι συντελεστές  $A_i, B_i, C_i$  είναι ανεξάρτητοι της εξαρτημένης μεταβλητής, το σύστημα είναι γραμμικό και επιλύεται με γνωστές μεθόδους. Ευρύτατα διαδεδομένη μέθοδος για αυτό το σκοπό είναι η μέθοδος του τριδιαγωνίου πίνακα (TriDiagonal Matrix Algorithm -- TDMA), η περιγραφή της οποίας ξεπερνά τους σκοπούς του παρόντος. Η διεθνής βιβλιογραφία ωστόσο βρίθει αναφορών επί του προκειμένου.

Στην περίπτωση όπου οι συντελεστές  $A_i, B_i, C_i$  δεν είναι ανεξάρτητοι της εξαρτημένης μεταβλητής, το σύστημα είναι μη-γραμμικό και οι γνωστές μέθοδοι αποδεικνύονται αναποτελεσματικές. Η λύση επιτυγχάνεται με μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης και δη, με επαναληπτική διαδικασία, της οποίας τα βήματα είναι τα κάτωθι:

3. Επιλέγονται αυθαίρετες αρχικές τιμές για την εξαρτημένη μεταβλητή, για όλους τους κόμβους εκτός από αυτούς που γνωρίζουμε μέσω των οριακών συνθηκών.
4. Βάσει των σχέσεων των συντελεστών των εξισώσεων του συστήματος, με τις αρχικές τιμές που επιλέχθηκαν υπολογίζονται οι συντελεστές του συστήματος.
5. Με βάση αυτές τις τιμές των συντελεστών, το σύστημα επιλύεται σαν να ήταν γραμμικό.
6. Με τις τιμές που προκύπτουν από την επίλυση του συστήματος, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο δεύτερο βήμα και επαναλαμβάνει έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση της μεθόδου (δηλαδή από κάποια επανάληψη και μετά να μην παρατηρείται αλλαγή στα αποτελέσματα). [1,3,6,7]



## 12. Μεταβατική μετάδοση θερμότητας

### 12.1. Εισαγωγή

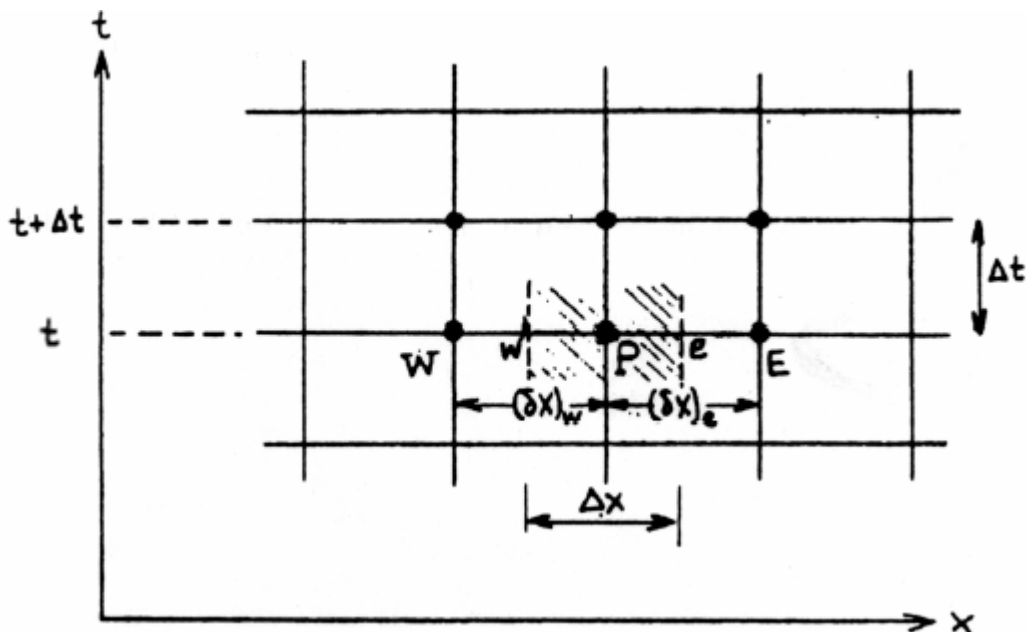
Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, στις εφαρμογές μετάδοσης θερμότητας, όπως είναι οι εφαρμογές των ΥΑΦ, το μόνιμο φαινόμενο δεν έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς δεν απαντάται σε πραγματικές εφαρμογές. Αυτό που αξίζει να μελετηθεί είναι το μεταβατικό φαινόμενο, όπου η θερμοκρασία είναι συνάρτηση του χρόνου και της απόστασης, και ζητούμενο είναι η παρακολούθηση του θερμοκρασιακού προφίλ του εκάστοτε προβλήματος στο βάθος του χρόνου.[1]

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο της μεταβατικής μεταφοράς θερμότητας είναι:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad [12.1]$$

Στόχος είναι όπως και προηγουμένως να βρεθούν οι τιμές της θερμοκρασίας σε κάθε κόμβο του πλέγματος, σε κάθε χρονική στιγμή  $t+\Delta t$ , με γνωστές τις τιμές κατά την προηγούμενη χρονική στιγμή  $t$ .

Σχηματικά:



**ΣΧΗΜΑ 12.1:** Υπολογιστικό πλέγμα μεταβατικής αγωγής θερμότητας

Έστω  $T_W^0$ ,  $T_P^0$  και  $T_E^0$  οι γνωστές τιμές της θερμοκρασίας επί των κόμβων W, P, E κατά τη χρονική στιγμή  $t$  (σχήμα) και  $T_W$ ,  $T_P$ ,  $T_E$  οι αντίστοιχες τιμές κατά την επόμενη χρονική στιγμή  $t+\Delta t$ . Για την κατάστρωση της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών ακολουθείται η μέθοδος του όγκου αναφοράς, που αναφέρθηκε πιο πάνω. Υποθέτοντας  $\rho C_p = \text{σταθερό}$ , η ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης μονοδιάστατης μεταβατικής αγωγής θερμότητας στον όγκο αναφοράς που περιβάλλει τον κόμβο P και στο χρονικό διάστημα από  $t$  έως  $t+\Delta t$  δίνει:

$$\rho C_p \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad [12.2]$$

Με την υπόθεση σταθερής θερμοκρασίας  $T_p$  σε ολόκληρο τον όγκο αναφοράς, το πρώτο μέλος της εξίσωσης γίνεται:

$$\rho C_p \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \rho C_p \Delta x (T_p - T_p^0) \quad [12.3]$$

Το χωρικό μέρος του ολοκληρώματος του δευτέρου μέλους της εξίσωσης υπολογίζεται:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt &= \int_t^{t+\Delta t} \left[ \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt \Rightarrow \\ \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt &= \int_t^{t+\Delta t} \left[ \frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right] dt \end{aligned} \quad [12.4]$$

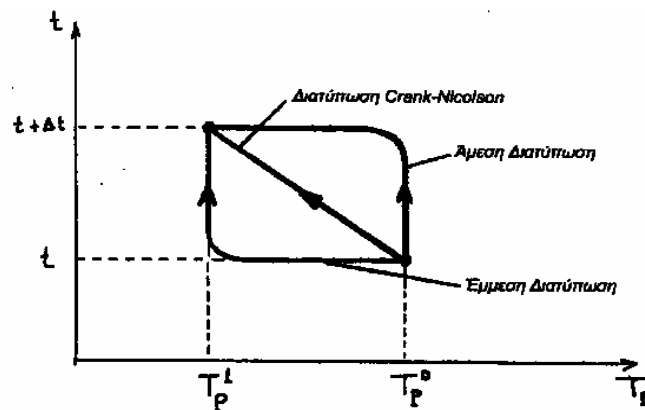
Άρα είναι:

$$\rho C_p \Delta x (T_p^1 - T_p^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right] dt \quad [12.5]$$

Για τον υπολογισμό του παραπάνω χρονικού ολοκληρώματος απαιτείται να γίνει μία υπόθεση σχετικά με τον τρόπο μεταβολής της θερμοκρασίας  $T_p$  με το χρόνο μέσα στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$ .

## 12.2. Υποθέσεις εργασίας

Γίνονται οι παρακάτω τρεις διαφορετικές υποθέσεις, οι οποίες παριστάνονται και γραφικά στο παρακάτω σχήμα: [1,3,6,7]



**ΣΧΗΜΑ12.2:** Γραφική απεικόνιση των τριών υποθέσεων της θερμοκρασίας

Οι τρεις υποθέσεις για τη μεταβολή της θερμοκρασίας  $T_p$

- $T_p$  σταθερή και ίση με  $T_p^0$  κατά την χρονική στιγμή  $t$
- $T_p$  σταθερή και ίση με  $T_p$  κατά την χρονική στιγμή  $t+\Delta t$
- $T_p$  μεταβαλλόμενη γραμμικά με τον χρόνο.

Και οι τρεις πιο πάνω υποθέσεις εκφράζονται από τη σχέση:

$$\int_t^{t+\Delta t} T_p dt = [fT_p + (1-f)T_p^0] \Delta t \quad [12.6]$$

Όπου ο παράγων στάθμισης  $f$  λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Στην πρώτη υπόθεση αντιστοιχεί η τιμή του  $f=0$ , και στη δεύτερη και τρίτη οι τιμές  $f=1$  και  $f=0,5$  αντίστοιχα. Σύμφωνα με την πιο πάνω γενική σχέση η εξίσωση γίνεται

$$\rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_p - T_p^0) = f \left[ \frac{k_e (T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[ \frac{k_e (T_E^0 - T_p^0)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_p^0 - T_w^0)}{(\delta x)_w} \right] \quad [12.7]$$

Μετά από πράξεις η παραπάνω εξίσωση παίρνει την τυπική μορφή εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών, (χάριν απλότητας παραλείπεται ο δείκτης 1).

$$A_p T_p = A_E [f T_E + (1-f) T_E^0] + A_W [f T_W + (1-f) T_W^0] + [A_p^0 - (1-f) A_E - (1-f) A_W] T_p^0 \quad [12.8]$$

Όπου:

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad [12.9]$$

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad [12.10]$$

$$A_p^0 = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t} \quad [12.11]$$

$$A_p = f A_E + f A_W + A_p^0 \quad [12.12]$$

Η τυπική μορφή εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών μπορεί να πάρει διάφορες μορφές ανάλογα με το είδος της υπόθεσης που θα γίνει όσο αφορά την μεταβολή της θερμοκρασίας  $T_p$  με τον χρόνο μέσα στο χρονικό διάστημα. Λόγω του γεγονότος αυτού υπάρχουν τρεις κυριότερες διατυπώσεις της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών που προκύπτουν από την γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών. [1,3,6,7]

Οι διατυπώσεις αυτές είναι:

- η άμεση, κατά την οποία θεωρείται ότι η θερμοκρασία διατηρεί την τιμή  $T_p^0$  κατά τη διάρκεια όλου του χρονικού βήματος  $\Delta t$  και λαμβάνει απότομα την τιμή  $T_p$  κατά τη χρονική στιγμή  $t+\Delta t$ ,

- η έμμεση στην οποία γίνεται η υπόθεση ότι κατά την χρονική στιγμή  $t$  η θερμοκρασία στον κόμβο  $P$  μεταπίπτει απότομα από την τιμή  $T_P^0$  στην τιμή  $T_P$  την οποία διατηρεί καθ' όλο το χρονικό βήμα  $\Delta t$  και
- η διατύπωση Crank-Nicolson, κατά αυτή τη διατύπωση έχει υποτεθεί γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας με τον χρόνο κατά το χρονικό βήμα  $\Delta t$ .

### 12.2.1 Άμεση διατύπωση

Η άμεση διατύπωση προκύπτει από την γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για  $f=0$ , δηλαδή

$$A_P T_P = A_E T_E^0 + A_W T_W^0 + (A_P - A_E - A_W) T_P^0 \quad [12.13]$$

Όπου:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad [12.14]$$

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad [12.15]$$

$$A_P = \frac{\rho C_P \Delta x}{\Delta t} \quad [12.16]$$

Με βάση αυτή την εξίσωση μπορεί να παρατηρηθεί ότι η άγνωστη θερμοκρασία  $T_P$  δεν συνδέεται με άλλες άγνωστες τιμές ( $T_E$ ,  $T_W$ ) και συνεπώς υπολογίζεται αμέσως συναρτήσει των γνωστών θερμοκρασιών  $T_W^0$ ,  $T_P^0$  και  $T_E^0$  της προηγούμενης χρονικής στιγμής.

Το αναμφισβήτητο πλεονέκτημα της άμεσης διατύπωσης είναι η δυνατότητα άμεσου υπολογισμού των τιμών  $T_P$  χωρίς να απαιτείται επίλυση συστήματος εξισώσεων όμως ταυτόχρονα η διατύπωση αυτή παρουσιάζει ένα μεγάλο μειονέκτημα που είναι το γεγονός ότι ο συντελεστής ( $A_P - A_E - A_W$ ) της  $T_P^0$  ενδέχεται να γίνει αρνητικός με αποτέλεσμα να προκύψει φυσικώς απαράδεκτη τιμή της θερμοκρασίας  $T_P$  για να αποκλειστεί η περίπτωση αυτή πρέπει να ισχύει ο περιορισμός  $A_P - A_E - A_W > 0$ . Για σταθερή θερμική αγωγιμότητα  $k_e = k_w = k$  και  $(\delta x)_e = (\delta x)_w = \Delta x$ , η συνθήκη αυτή παίρνει τη μορφή:

$$\Delta t < \frac{\rho C_P (\Delta x)^2}{2k} \quad [12.17]$$

Από τον περιορισμό αυτό προκύπτει ότι για να ισχύει η άμεση διατύπωση απαιτείται μικρό χρονικό βήμα  $\Delta t$  ή μεγάλο χωρικό βήμα  $\Delta x$ . Αυτή ακριβώς η συνθήκη αποτελεί το σοβαρό μειονέκτημα της μεθόδου διότι η μείωση του  $\Delta x$  με σκοπό την αύξηση της χωρικής ακρίβειας απαιτεί σημαντική μείωση του  $\Delta t$  που έχει ως αποτέλεσμα η μέθοδος να καθιστάτε υπερβολικά χρονοβόρα και αντιοικονομική. Για αυτό το λόγο η άμεση διατύπωση δεν συνιστάται για τη δημιουργία εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών.[1]

### 12.2.2. Έμμεση διατύπωση

Η έμμεση διατύπωση προκύπτει όπως και η άμεση διατύπωση, από τη γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών αλλά για  $f=1$ , δηλαδή

$$A_P T_P = A_E T_E + A_W T_W + A_P - A_P^0 T_P^0 \quad [12.18]$$

όπου:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad [12.19]$$

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad [12.20]$$

$$A_P^0 = \frac{\rho C_P \Delta x}{\Delta t} \quad [12.21]$$

$$A_P = A_E + A_W + A_P^0 \quad [12.22]$$

Με βάση αυτή την εξίσωση μπορεί να παρατηρηθεί ότι η άγνωστη θερμοκρασία  $T_P$  κατά τη χρονική στιγμή  $t+\Delta t$  εκφράζεται συναρτήσει των επίσης αγνώστων θερμοκρασιών  $T_E$  και  $T_W$  που αναφέρονται στην ίδια χρονική στιγμή. Άρα ο υπολογισμός της  $T_P$  γίνεται μόνο εμμέσως, δηλαδή δια επιλύσεως συστήματος εξισώσεων.

Η έμμεση διατύπωση κρίνεται ως αρκετά καλή μέθοδος προσέγγισης του τρόπου μεταβολής της θερμοκρασίας  $T_P$  μετά του χρόνου μέσα στο χρονικό διάστημα  $t, t+\Delta t$ , γιατί κατά την έμμεση διατύπωση δεν υφίσταται περιορισμός στην επιλογή χρονικού βήματος, εξοικονομώντας έτσι χρόνο ηλεκτρονικού υπολογιστή. Συνεπώς η διατύπωση αυτή προτιμάται, σε σχέση με την άμεση διατύπωση, και θεωρείται αρκετά καλή.[1]

### 12.2.3. Διατύπωση Crank-Nicolson

Η διατύπωση Crank-Nicolson προκύπτει όπως και οι δύο άλλες διατυπώσεις από τη γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών αλλά για  $f=0.5$ , δηλαδή

$$A_P T_P = \frac{A_E}{2} (T_E + T_E^0) + \frac{A_W}{2} (T_W + T_W^0) + \left[ A_P^0 - \frac{A_E}{2} - \frac{A_W}{2} \right] T_P^0 \quad [12.23]$$

Όπου:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad [12.24]$$

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad [12.25]$$

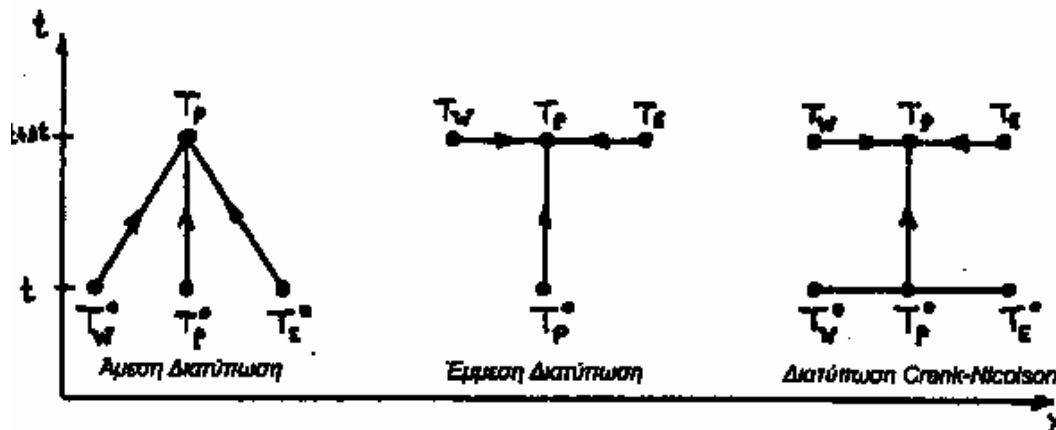
$$A_p^0 = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t} \quad [12.26]$$

$$A_p = \frac{A_E}{2} + \frac{A_W}{2} + A_p^0 \quad [12.27]$$

Όπως και κατά την έμμεση διατύπωση, η θερμοκρασία  $T_P$  εκφράζεται συναρτήσει των αγνώστων θερμοκρασιών  $T_E$  και  $T_W$  που αναφέρονται στην ίδια χρονική στιγμή Συνεπώς απαιτείται και εδώ επίλυση συστήματος.[1]

#### 12.2.4. Συγκριτικά διατυπώσεων-άλλες διατυπώσεις

Η μέθοδος Crank-Nicolson παρά το γεγονός ότι δίνει μαθηματικώς ευσταθή λύση για οσοδήποτε μεγάλη τιμή του χρονικού βήματος  $\Delta t$ , έχει αποδειχθεί ότι η λύση αυτή ενδέχεται να μην είναι φυσικώς δεκτή. Για αυτό το λόγο από τις τρεις διατυπώσεις που αναφέρθηκαν προτιμάται η έμμεση διατύπωση. Σημαντικό πλεονέκτημα όμως της διατύπωσης Crank-Nicolson είναι το γεγονός ότι παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια, δηλαδή τάξης σφάλματος αποκοπής χρονικής και χωρικής παραγώγου  $(\Delta t)^2$  και  $(\Delta x)^2$  αντίστοιχως, έναντι των  $(\Delta t)$  και  $(\Delta x)^2$  των άλλων δυο διατυπώσεων.



ΣΧΗΜΑ12.3: Σχηματική παράσταση των τριών αριθμητικών μεθόδων

Άλλες διατυπώσεις προκύπτουν από τη γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για άλλες τιμές του συντελεστή στάθμισης  $f$  από 0 έως 1, πλην των τιμών 0, 0.5 και 1 που εξετάστηκαν πιο πάνω. Προφανώς, μόνο η τιμή  $f=0$  δίδει άμεση διατύπωση, δηλαδή οδηγεί σε έκφραση της θερμοκρασίας κάθε κόμβου συναρτήσει μόνο γνωστών θερμοκρασιών του προηγούμενου χρονικού επιπέδου. Αποδεικνύεται ότι για  $0.5 \leq f \leq 1$  οι προκύπτουσες διατυπώσεις είναι μαθηματικώς ευσταθείς χωρίς περιορισμό μεγέθους του χρονικού βήματος  $\Delta t$ . [1]

### **13. Μέθοδοι τριών χρονικών βημάτων (three- time level schemes)**

#### **13.1. Εισαγωγή**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι υποθέσεις εργασίας αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο υποτίθεται ότι μεταβάλλεται η θερμοκρασία κατά την εξέλιξη του φαινομένου. Στις προηγούμενες υποθέσεις λαμβανόταν υπ' όψη στον υπολογισμό το προηγούμενο χρονικό βήμα ώστε να υπολογιστεί το τρέχον.

Μία διαφορετική άποψη προτείνει τη χρήση τριών χρονικών βημάτων για τον υπολογισμό της θερμοκρασιακής κατανομής. Αυτό γίνεται σε ενδιάμεσο βήμα του αλγορίθμου υπολογισμού (και όχι ενδιάμεσο χρονικό βήμα), μέσω μιας διόρθωσης που εφαρμόζεται στη θερμοκρασία που προέκυψε από τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για τον τρέχοντα κόμβο. Να σημειωθεί εδώ ότι ανεξαρτήτως αριθμού χρονικών βημάτων που τελικά λαμβάνονται υπ' όψη στον υπολογισμό, οι προαναφερθείσες υποθέσεις εργασίας εξακολουθούν να έχουν ισχύ και όσα συγκριτικά συμπεράσματα προέκυψαν ισχύουν και εδώ.

#### **13.2. Μέθοδοι ενθαλπίας-μέθοδοι θερμοκρασίας**

Στις μεθόδους αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων αγωγής θερμότητας με πεπερασμένες διαφορές μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι ενθαλπίας ή θερμοκρασίας. Οι πρώτες απαιτούν έμμεση διατύπωση με τα συνεπαγόμενα προβλήματα σύγκλισης της μεθόδου, ή άμεση διατύπωση η οποία με τη σειρά της απαιτεί επαναλήψεις για κάθε χρονικό βήμα. Οι τελευταίες όμως εμφανίζουν το πρόβλημα της υπερπήδησης του ποσού της λανθάνουσας θερμότητας οπότε είναι απαραίτητη η χρήση μικρού χρονικού βήματος.

Η αριθμητική επίλυση των προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας εμφανίζει αρκετές ιδιαιτερότητες. Πλήθος μεθόδων έχει προταθεί για την επεξεργασία αυτών των προβλημάτων. Πολλές από αυτές τις μεθόδους μπορούν να επεξεργαστούν την περίπτωση όπου υπάρχει ένα μικρό μέτωπο αλλαγής φάσης, οπότε δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις όπου υπάρχει η ταυτόχρονη στερεοποίηση περισσοτέρων της μίας ουσιών, όπως τρόφιμα ή μίγματα και κράματα μετάλλων. Άλλες πάλι περιορίζονται στη μελέτη του μονοδιάστατου προβλήματος.

Η εξίσωση διάχυσης θερμότητας μπορεί να εκφραστεί με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[k(T) \text{grad}(T)] \quad [13-1]$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}[k(H) \text{grad}(T(H))] \quad [13-2]$$

Η εξίσωση [13-1] είναι η βάση των μεθόδων θερμοκρασίας ενώ η [13-2] η βάση των μεθόδων ενθαλπίας

### 13.3. Διορθώσεις μεθόδων

Στις θερμοκρασιακές μεθόδους, η λανθάνουσα θερμότητα παρουσιάζεται σαν μία κορυφή πεπερασμένου πλάτους στην καμπύλη  $C_p(T)$ . Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μεγάλο χρονικό βήμα στον υπολογισμό, υπάρχει περίπτωση η θερμοκρασία ενός κόμβου να υπερπηδήσει τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης σε κάποιο βήμα, οπότε ουσιαστικά η μέθοδος αγνοεί τη θερμότητα που το υλικό απορρόφησε για την αλλαγή της φάσης (αφού η καμπύλη  $C_p(T)$  σε αυτή την περίπτωση δεν θα πάρει την ακρότατη τιμή). Αυτό είναι σοβαρό μειονέκτημα της μεθόδου αφού οδηγεί σε εντελώς λάθος αποτελέσματα και η αντιμετώπισή του απαιτεί τη χρήση μικρού χρονικού βήματος.

Οι μέθοδοι χρονικού βήματος τριών σημείων (Lees [11], Bonacina and Comini [16, 17]) τείνουν στην επίλυση του προβλήματος, αφού σε αυτές τις μεθόδους οι θερμοκρασίες υπολογίζονται και σε ενδιάμεσα χρονικά βήματα. Παρ' όλ' αυτά εξακολουθεί να υπάρχει και εδώ ο κίνδυνος της υπερπήδησης της λανθάνουσας θερμότητας.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος οι Comini and Lewis [12] πρότειναν ότι το  $C_p(T)$  πρέπει να υπολογίζεται σαν τη μέση ειδική θερμοχωρητικότητα μεταξύ των θερμοκρασιών δύο γειτονικών κόμβων. Η μέθοδος αυτή όμως οδηγεί σε ασάφεια στα αποτελέσματα όταν εφαρμοστεί σε περισσότερες της μίας διαστάσεις.

Ο Morgan [13] πρότεινε τον υπολογισμό της μέσης τιμής της θερμοχωρητικότητας βάσει των αλλαγών στη θερμοκρασία και την ενθαλπία στα δύο προηγούμενα χρονικά βήματα,  $j-2$  και  $j-1$ , μία ιδέα βασισμένη στη μέθοδο χρονικού βήματος τριών σημείων. Περαιτέρω διαφοροποίηση προτάθηκε από τους Wood και Lewis [15], η οποία αφορά στην έκφραση της θερμοκρασίας σε κάθε χρονικό βήμα:

$$T_i^j = (T_i^{j-2} + T_i^{j-1} + T_i^j) / 3 \quad [13.3]$$

Οι άμεσες διατυπώσεις είναι ασταθείς για  $k\Delta t/c(\Delta x)^2 > 0.5$ , πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει και πάλι να υποτεθούν μικρά χρονικά βήματα, προφανώς αυξάνοντας τον χρόνο υπολογισμού και τις αντίστοιχες ανάγκες σε υπολογιστική ισχύ.

### 13.4. Διακυμάνσεις

Διακυμάνσεις στην υπολογιζόμενη θερμοκρασία εμφανίζονται πάντα σε περιπτώσεις όπου επιλέγεται μεγάλο χρονικό βήμα (Yalamanchili and Chu [14], Wood and Lewis [15]).

Οι διακυμάνσεις αυτές συνήθως εμφανίζονται κοντά στο διαχωριστικό όριο μεταξύ των φάσεων όπου εμφανίζονται επίσης μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές στις δύο πλευρές του ορίου. Όσο όμως ελαττώνεται το χρονικό βήμα αυτές οι διακυμάνσεις τείνουν να εξαφανιστούν.

Η επέκταση της μεθόδου σε περισσότερες της μίας διαστάσεις είναι απλή και άμεσα εφαρμόσιμη και δίνει το ίδιο αξιόπιστα αποτελέσματα με τα προαναφερθέντα. [16, 17]



## 14. Υπολογιστικό μέρος

### 14.1. Παρουσίαση εξεταζόμενου προβλήματος

Το πρόβλημα που εξετάζεται εδώ είναι εξιδανικευμένο και ελέγχει τη συμπεριφορά των μεθόδων στο θεωρητικό τους μέρος, σε δοκιμή απαλλαγμένη από πραγματικούς περιορισμούς.

Σκοπός του παρόντος είναι η κατάδειξη των όποιων αδυναμιών των προαναφερθέντων μεθόδων και κυρίως εξέταση της αποτελεσματικότητας μιας μεθόδου τριών σημείων.

Σε μονοδιάστατο πρόβλημα διάχυσης θερμότητας, υποτίθεται ιδανικά θεωρημένη ράβδος καθαρού νερού μήκους 0,1m.

- Η ράβδος χωρίζεται κατά περίπτωση σε 10 και 20 τμήματα (όγκους αναφοράς), οπότε αντίστοιχα υπάρχουν 8 και 18 εσωτερικοί κόμβοι.
- Σε κάθε περίπτωση, οι δύο εξωτερικοί κόμβοι αποτελούν τις οριακές συνθήκες του προβλήματος και μάλιστα είναι οριακές πρώτου είδους. Δύο περιπτώσεις υποτίθενται εδώ, των  $-10^{\circ}\text{C}$  και των  $-5^{\circ}\text{C}$ .
- Οι αρχικές συνθήκες επιλέγονται προφανώς αυθαίρετα και εδώ είναι  $2^{\circ}\text{C}$ , δηλαδή ουσιαστικά μελετάται ένα πρόβλημα στερεοποίησης.

Το υλικό επιλέχθηκε να είναι νερό και μάλιστα θεωρούνται σταθερές στη μελέτη τόσο η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας, όσο και η τιμή της πυκνότητάς του:

- $k_e = k_w = ct = 0.590 \text{ W/mK [W/m}^{\circ}\text{C]}$
- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Η θερμοχωρητικότητα θεωρήθηκε βηματική συνάρτηση της θερμοκρασίας, με το εξής πεδίο τιμών:

- Για  $T > T_2$   $C_p = 4,189 \text{ kJ/kgK}$
- Για  $T < T_1$   $C_p = 4,189 \text{ kJ/kgK}$
- Για  $T_1 < T < T_2$   $C_p = \lambda / (T_2 - T_1)$

Όπου  $\lambda$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του νερού και ισούται με  $333 \text{ kJ/kg}$ . Θεωρήθηκαν τρία διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη αλλαγής φάσης:

- από  $-0,5^{\circ}\text{C}$  έως  $0,5^{\circ}\text{C}$
- από  $-1^{\circ}\text{C}$  έως  $1^{\circ}\text{C}$
- από  $-2^{\circ}\text{C}$  έως  $2^{\circ}\text{C}$

Το χρονικό βήμα στην άμεση μέθοδο υπόκειται σε ισχυρό περιορισμό, οπότε δεν δίνει μεγάλη ελευθερία επιλογών. Στην έμμεση όμως δεν υπάρχει πρακτικός περιορισμός, οπότε στη μέθοδο αυτή είτε με διόρθωση, είτε χωρίς έγιναν δοκιμές για πέντε χρονικά βήματα: 2", 1", 0.5", 0.05" και 0.01"

## 14.2. Κατάστρωση συστήματος εξισώσεων

Σε αυτή τη μελέτη έγιναν προσπάθειες αριθμητικής επίλυσης του προαναφερθέντος προβλήματος τόσο με την έμμεση όσο και με την άμεση μέθοδο. Στην περίπτωση δε, της έμμεσης μεθόδου εξετάστηκε και το ενδεχόμενο πιθανής διόρθωσης της θερμοκρασίας με τη μέθοδο που πρότειναν οι Wood και Lewis [15].

Γενικά η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών δίνει:

$$A_P T_P = A_E [f T_E + (1-f) T_E^0] + A_W [f T_W + (1-f) T_W^0] + T_P^0 [A_P^0 - (1-f) A_E^0 - (1-f) A_W^0]$$

Το υπολογιστικό πλέγμα υποτέθηκε 10 και 20 κόμβων σε κάθε περίπτωση και μάλιστα ισαπέχον, δηλαδή  $(\delta x)_w = (\delta x)_e = \Delta x$

Για **έμμεση μέθοδο (f=1) πλέγματος 10 κόμβων** ( $\Delta x=0,01\text{m}$ ), η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών δίνει:

$$A_P T_P = A_E T_E + A_W T_W + A_P^0 T_P^0$$

Όπου:

$$A_E = k_e / (\delta x)_e = 0.590 / 0.01 = 59$$

$$A_W = k_w / (\delta x)_w = 0.590 / 0.01 = 59$$

$$A_P^0 = \rho C_P \Delta x / \Delta t = (1000 * 0,01 * C_P) / \Delta t$$

$$A_P = A_P^0 + A_W + A_E$$

Άρα:

$$A_P T_i^1 = 59 T_{i+1}^1 + 59 T_{i-1}^1 + A_P^0 T_i^0$$

Για **έμμεση μέθοδο (f=1) πλέγματος 20 κόμβων** ( $\Delta x = 0.005 \text{ m}$ ), η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών δίνει:

$$A_P T_P = A_E T_E + A_W T_W + A_P^0 T_P^0$$

Όπου:

$$A_E = k_e / (\delta x)_e = 0.590 / 0.005 = 118$$

$$A_W = k_w / (\delta x)_w = 0.590 / 0.005 = 118$$

$$A_P^0 = \rho C_P \Delta x / \Delta t = (1000 * 0.005 * C_P) / 3$$

$$A_P = A_P^0 + A_W + A_E$$

Άρα:

$$A_P T_i^1 = 118 T_{i+1}^1 + 118 T_{i-1}^1 + A_P^0 T_i^0$$



Αναφορικά με τις περιπτώσεις με διόρθωση θερμοκρασίας, ο υπολογιστικός αλγόριθμος προσθέτει ένα βήμα επαναυπολογισμού της θερμοκρασίας:

$$T_i^j = (T_i^{j-2} + T_i^{j-1} + T_i^j)/3,$$

$T_i^j$  είναι η θερμοκρασία του κόμβου  $i$  κατά το χρονικό βήμα  $j$ .

$T_i^{j*}$  είναι η διορθωμένη θερμοκρασία

**Στο πρώτο βήμα η διόρθωση παίρνει δύο φορές την οριακή συνθήκη.**

Ο αλγόριθμος υπολογισμού της θερμοκρασίας πλέον γίνεται:

1. Από τις οριακές και τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος υπολογίζεται η μη διορθωμένη θερμοκρασία των κόμβων για το πρώτο βήμα
2. Από την τιμή αυτή βάσει της συνάρτησης της θερμοχωρητικότητας, αποδίδεται αντίστοιχη τιμή στην ειδική θερμοχωρητικότητα που αντιστοιχεί στον κάθε κόμβο
3. Εφαρμόζεται εξίσωση πεπερασμένων διαφορών σε όλους του κόμβους (Το σύστημα είναι γραμμικό αφού έχω βρει από το προηγούμενο χρονικό βήμα τη θερμοκρασία οπότε το υπολογιστικό φύλλο του excel λύνει το γραμμικό σύστημα με TDMA)
4. Μετά τη λύση του συστήματος εφαρμόζεται η εξίσωση της διόρθωσης σε όλους τους κόμβους
5. Με τις διορθωμένες πλέον τιμές της θερμοκρασίας, ο υπολογισμός προχωρεί στο επόμενο χρονικό βήμα επαναλαμβάνοντας κάθε φορά τα βήματα 2-5

Σε κάθε περίπτωση η διόρθωση έχει σκοπό την καλύτερη παρακολούθηση των αλλαγών των θερμοδυναμικών μεγεθών του συστήματος, ώστε να αποφεύγεται η υπερπήδηση της λανθάνουσας θερμότητας.

Όπως προαναφέρθηκε, πολλοί έκαναν τα το ίδιο, εφαρμόζοντας τη διόρθωση στη συνάρτηση της θερμοχωρητικότητας, πράγμα δυνατό εάν η συνάρτηση ήταν 1-1. Εδώ όμως η συνάρτηση θεωρείται βηματική, οπότε αναγκαστικά η διόρθωση επιβάλλεται στη θερμοκρασία, καθώς μία μέση τιμή των θερμοχωρητικοτήτων δεν θα είχε νόημα, αφού δεν θα ήταν εντός του πεδίου τιμών της συνάρτησης.

Για άμεση μέθοδο ( $f=0$ ) πλέγματος 20 κόμβων ( $\Delta x = 0.005$  m) η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών γίνεται:

$$A_P T_P = A_E T_E^0 + A_W T_W^0 + (A_P - A_E - A_W) T_P^0$$

Όπου:

$$A_E = k_e / (\delta x)_e = 0.590 / 0.005 = 118$$

$$A_W = k_w / (\delta x)_w = 0.590 / 0.005 = 118$$

$$A_P = \rho C_P \Delta x / \Delta t = (1000 * 0.005 * C_P) / \Delta t$$

και ο περιορισμός για το χρονικό βήμα,  $\Delta t < \frac{\rho C_P (\Delta x)^2}{2k}$ , δίνει  $\Delta t < 0.089$  sec, όπου για τη θερμοχωρητικότητα επιλέχθηκε η μικρότερη δυνατή τιμή της, δηλαδή αυτή εκτός εύρους αλλαγής φάσης. Εδώ επιλέγεται τιμή χρονικού βήματος στα 0,05 sec.

Άρα:

$$A_P T_i^1 = 118 T_{i+1}^1 + 118 T_{i-1}^1 + A_P T_i^0$$

Για άμεση μέθοδο ( $f=0$ ) πλέγματος 10 κόμβων ( $\Delta x = 0,01$  m) η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών γίνεται:

$$A_P T_P = A_E T_E^0 + A_W T_W^0 + (A_P - A_E - A_W) T_P^0$$

Όπου:

$$A_E = k_e / (\delta x)_e = 0.590 / 0.01 = 59$$

$$A_W = k_w / (\delta x)_w = 0.590 / 0.01 = 59$$

$$A_P = \rho C_P \Delta x / \Delta t = (1000 * 0,01 * C_P) / \Delta t$$

και ο περιορισμός για το χρονικό βήμα,  $\Delta t < \frac{\rho C_P (\Delta x)^2}{2k}$ , δίνει  $\Delta t < 0.355$  sec, όπου για τη θερμοχωρητικότητα επιλέχθηκε η μικρότερη δυνατή τιμή της, δηλαδή αυτή εκτός εύρους αλλαγής φάσης. Εδώ επιλέγεται τιμή χρονικού βήματος τόσο στα 0,2 sec, όσο και στα 0,05 sec όπως πριν, για ενδεχόμενη σύγκριση.

Άρα:

$$A_P T_i^1 = 59 T_{i+1}^1 + 59 T_{i-1}^1 + A_P T_i^0$$

### 14.3. Παρουσίαση Διαγραμμάτων

Όπως αναλύθηκε στις αρχές του τρέχοντος κεφαλαίου, η μελέτη του προβλήματος δίνει την ευχέρεια της μεταβολής σχεδόν όλων των παραμέτρων του. Λόγω του μεγάλου αριθμού τέτοιων παραμέτρων, επιλογή λίγων διαφορετικών περιπτώσεων για κάθε παράμετρο οδηγεί σε υπέρογκο αριθμό διαγραμμάτων.

Το σύνολο των διαγραμμάτων που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση περιέχονται στο συνοδευτικό CD της εργασίας. Κρίθηκε σκόπιμο να μην παρουσιαστούν όλα τα διαγράμματα (138 τον αριθμό) καθώς θα εκτόξευαν τον όγκο του παρόντος σε πολύ υψηλά επίπεδα, όπως επίσης και ο σχολιασμός και τα συμπεράσματα της ανάλυσης του προβλήματος θα γίνουν επί επιλεγμένων διαγραμμάτων.

Για εποπτικούς σκοπούς ακολουθεί η παρουσίαση μίας πλήρους περίπτωσης, αυθαίρετα επιλεγμένης, με οριακές συνθήκες  $-5^{\circ}\text{C}$ , και θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης από  $-1^{\circ}\text{C}$  έως  $1^{\circ}\text{C}$ .

Παρατίθενται χωρίς σχόλια τα διαγράμματα, με την κάτωθι σειρά, χωρίς επανάληψη των κοινών για όλα συνθηκών που μόλις αναφέρθηκαν

**ΣΧΗΜΑ 14.1:** Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι,  $\Delta t=2\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.2:** Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι,  $\Delta t=1\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.3:** Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι,  $\Delta t=0.5\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.4:** Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι,  $\Delta t=0.05\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.5:** Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι,  $\Delta t=0.01\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.6:** Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι,  $\Delta t=2\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.7:** Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι,  $\Delta t=1\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.8:** Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι,  $\Delta t=0.5\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.9:** Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι,  $\Delta t=0.05\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.10:** Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι,  $\Delta t=0.01\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.11:** Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι,  $\Delta t=2\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.12:** Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι,  $\Delta t=1\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.13:** Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι,  $\Delta t=0,5\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.14:** Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι,  $\Delta t=0,05\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.15:** Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι,  $\Delta t=0,01\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.16:** Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι,  $\Delta t=2\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.17:** Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι,  $\Delta t=1\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.18:** Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι,  $\Delta t=0,5\text{sec}$

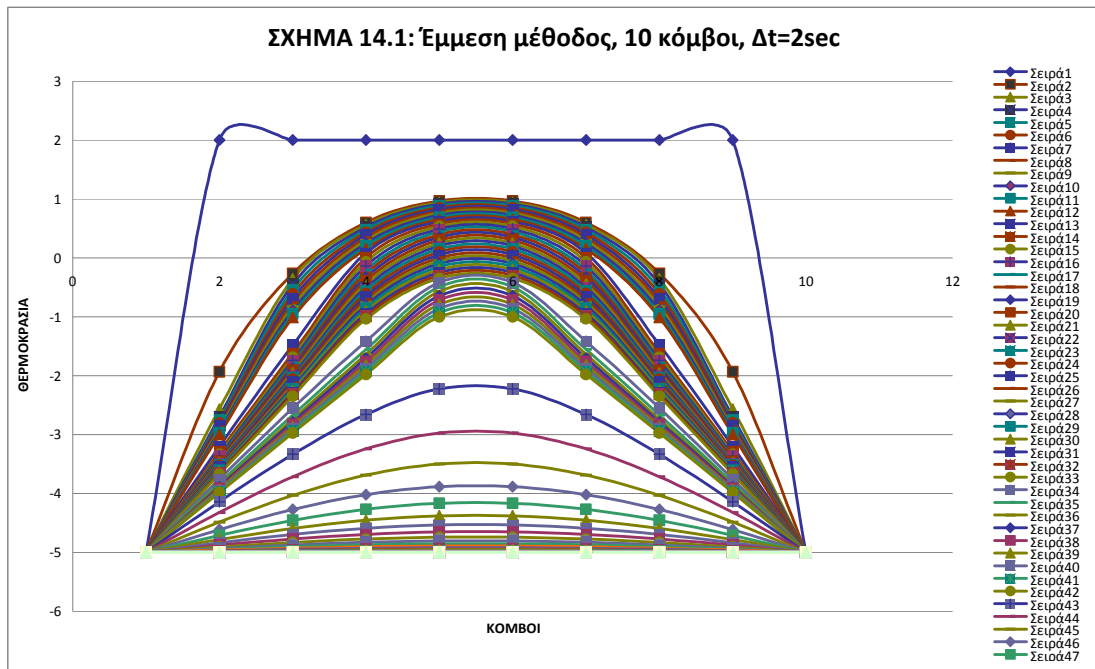
**ΣΧΗΜΑ 14.19:** Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι,  $\Delta t=0,05\text{sec}$

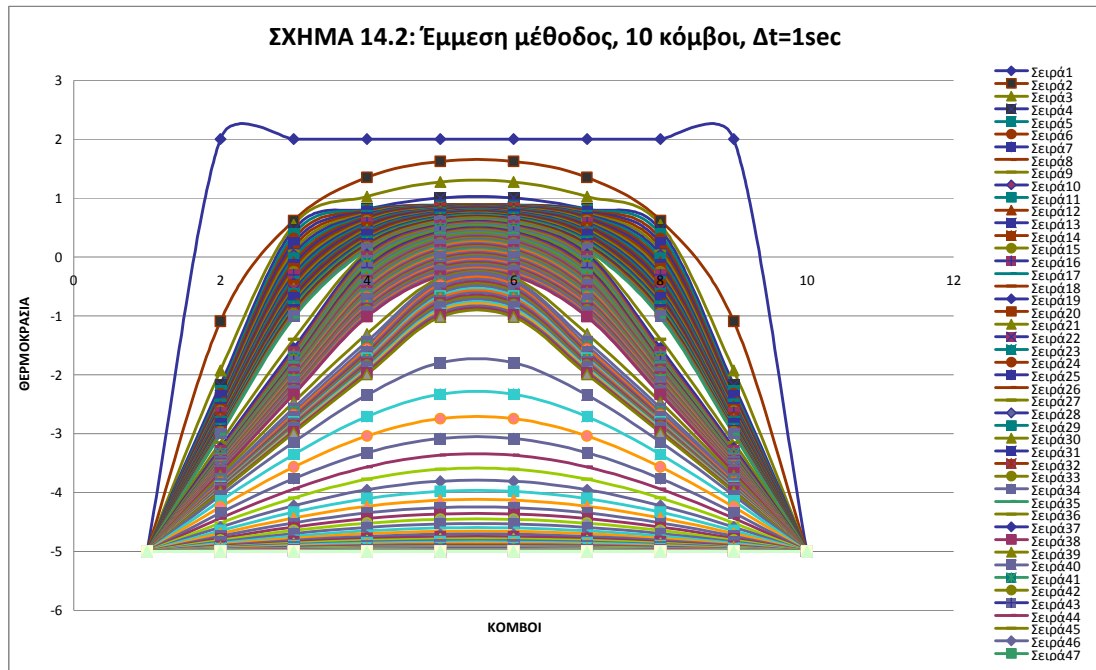
**ΣΧΗΜΑ 14.20:** Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι,  $\Delta t=0,01\text{sec}$

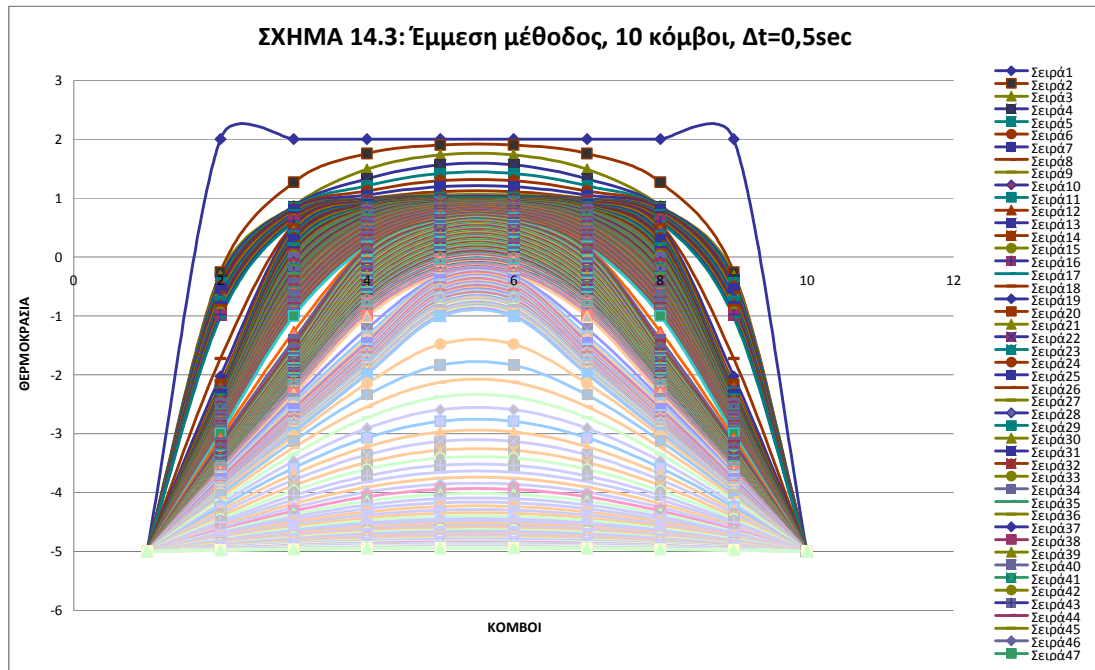
**ΣΧΗΜΑ 14.21:** Άμεση μέθοδος, 10 κόμβοι,  $\Delta t=0.2\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.22:** Άμεση μέθοδος, 10 κόμβοι,  $\Delta t=0.05\text{sec}$

**ΣΧΗΜΑ 14.23:** Άμεση μέθοδος, 20 κόμβοι,  $\Delta t=0.05\text{sec}$

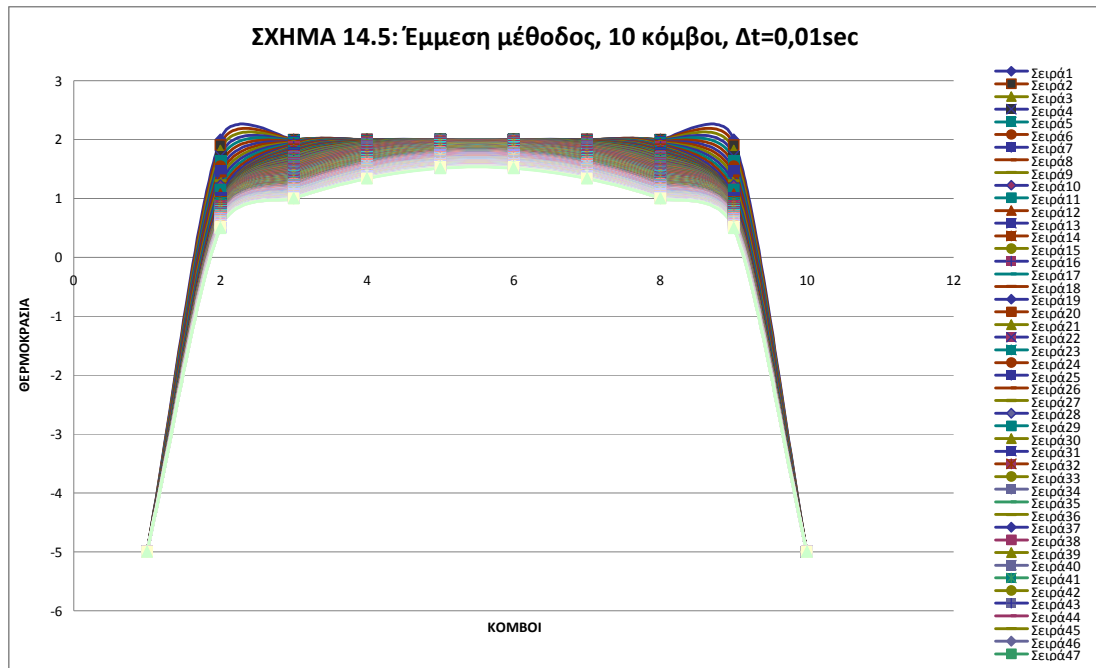


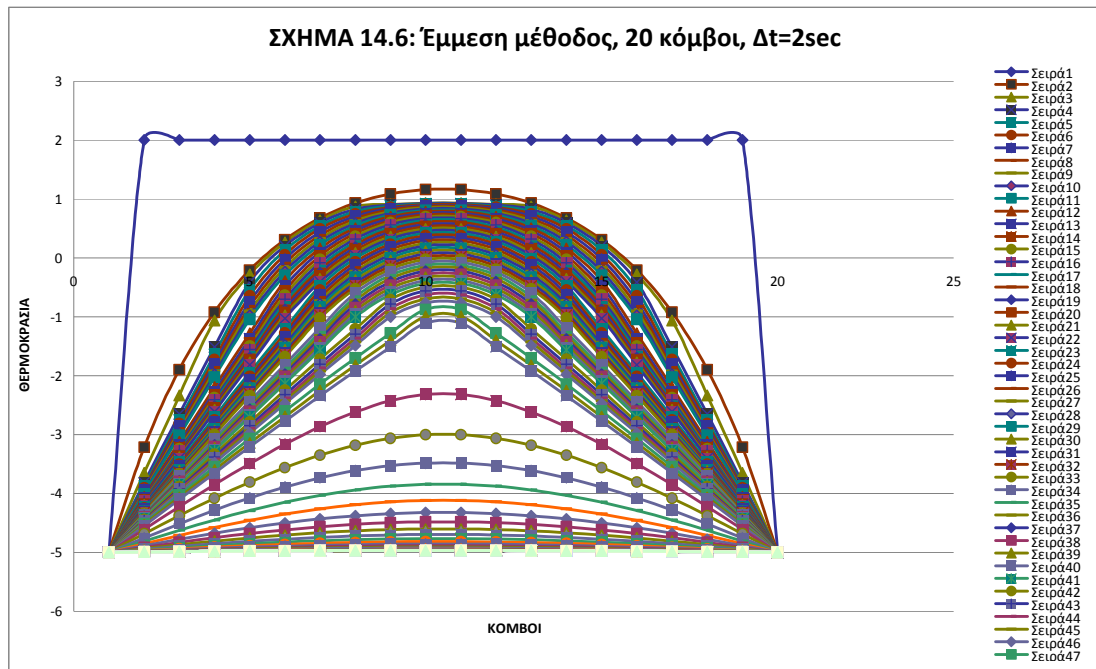


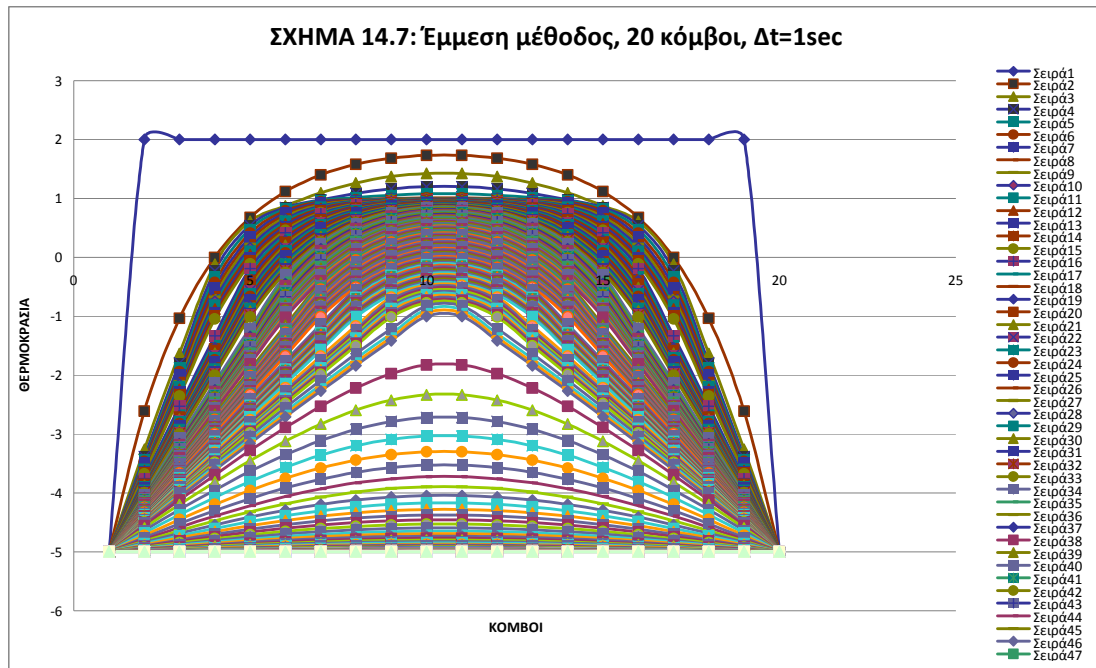


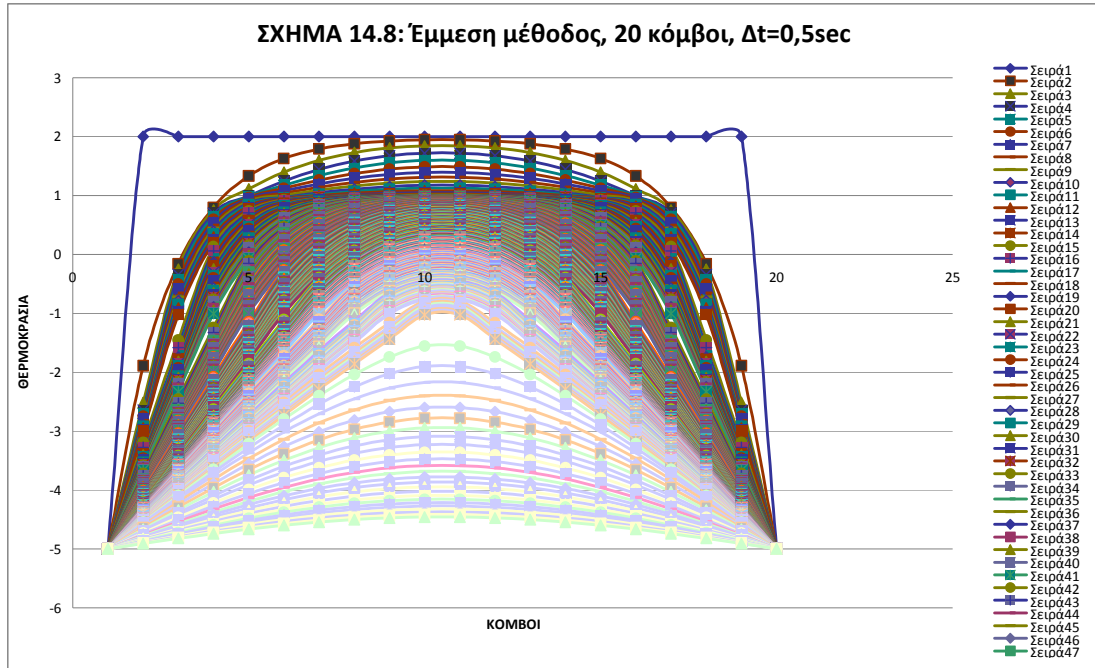


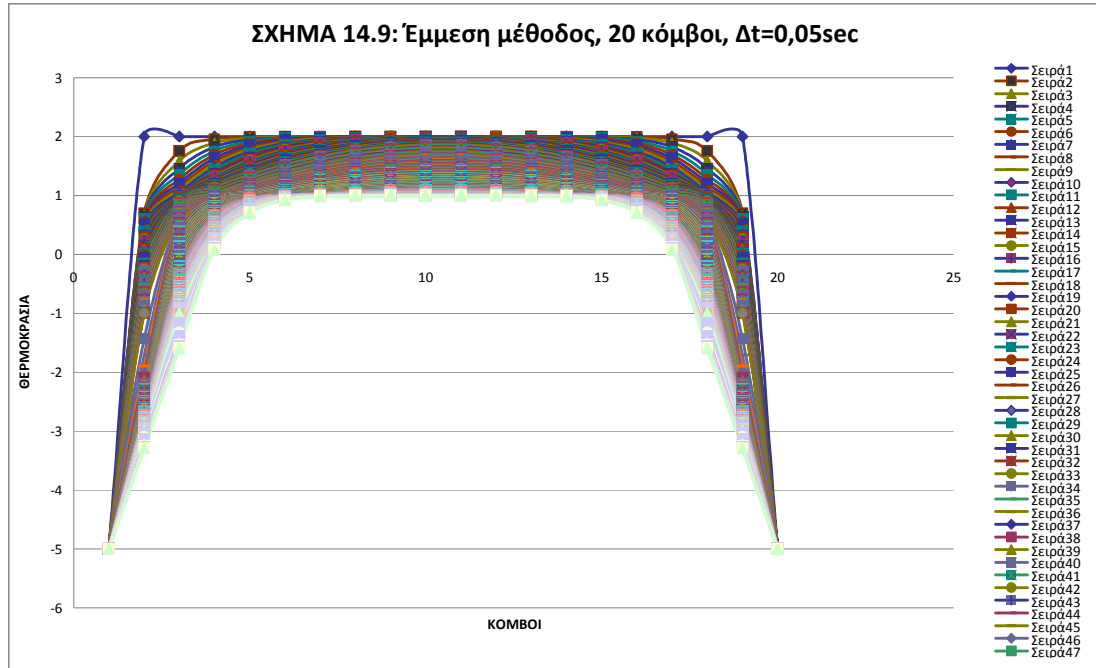


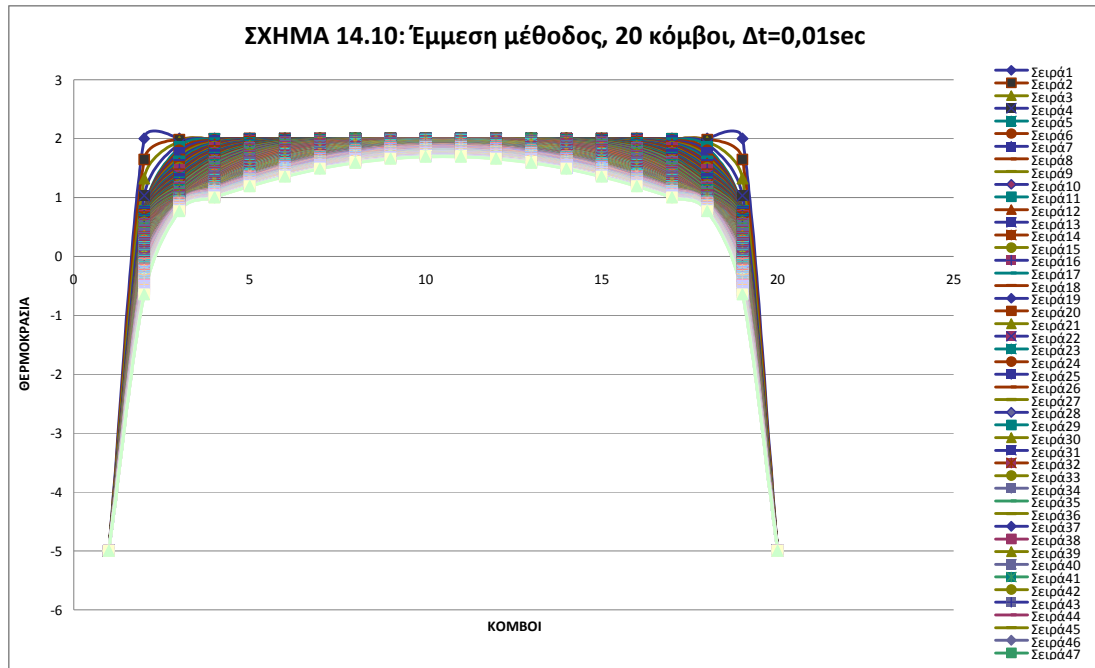


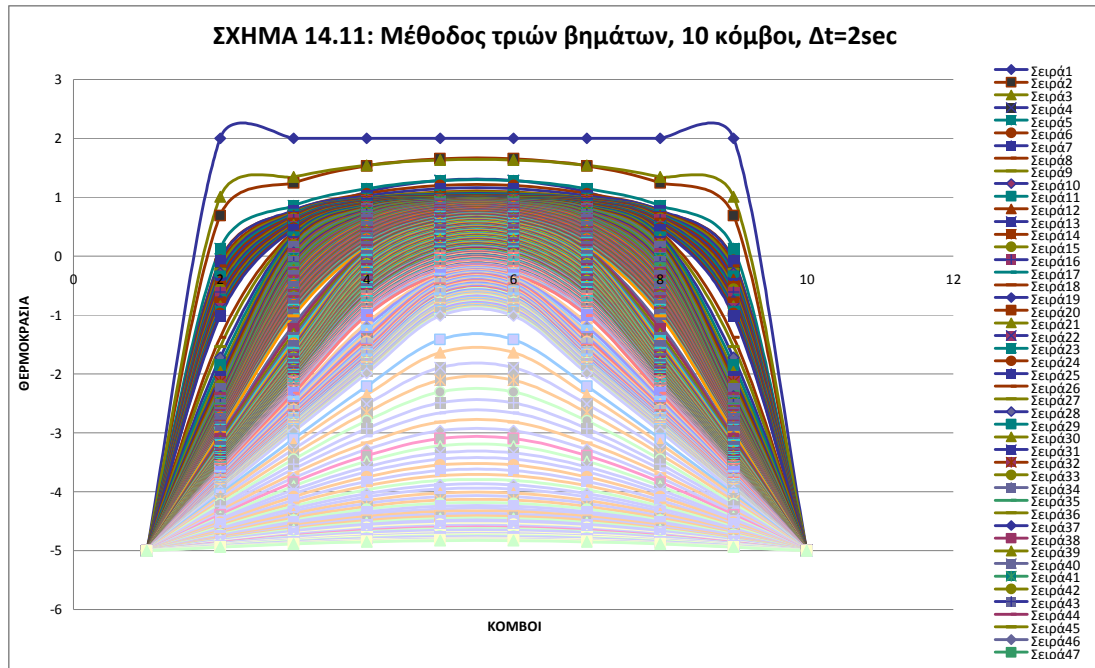




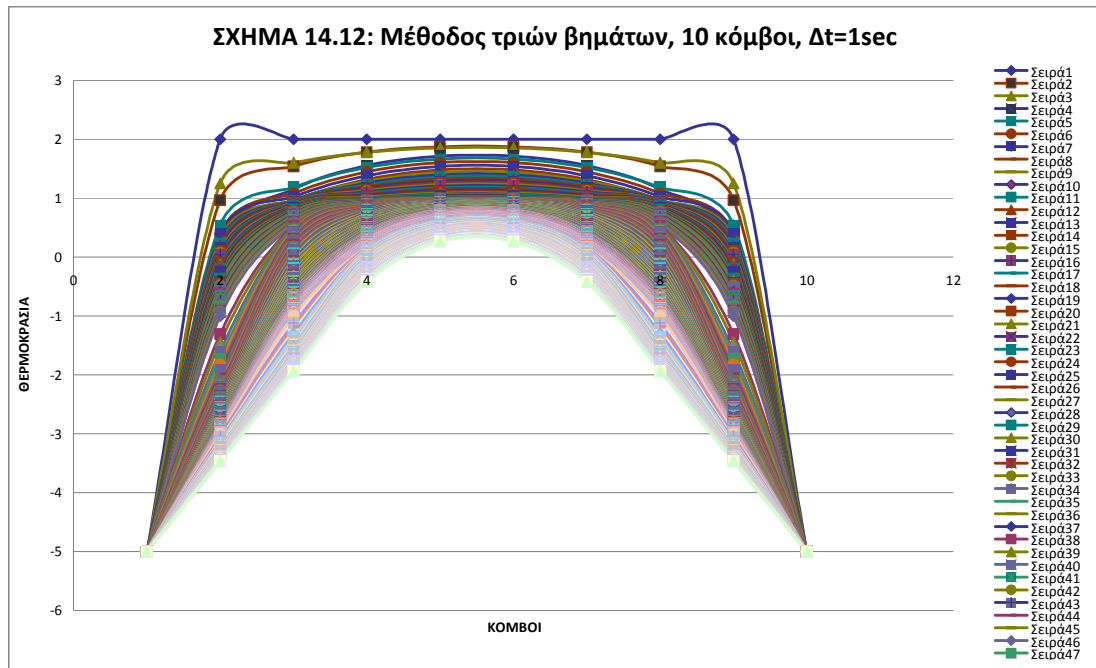


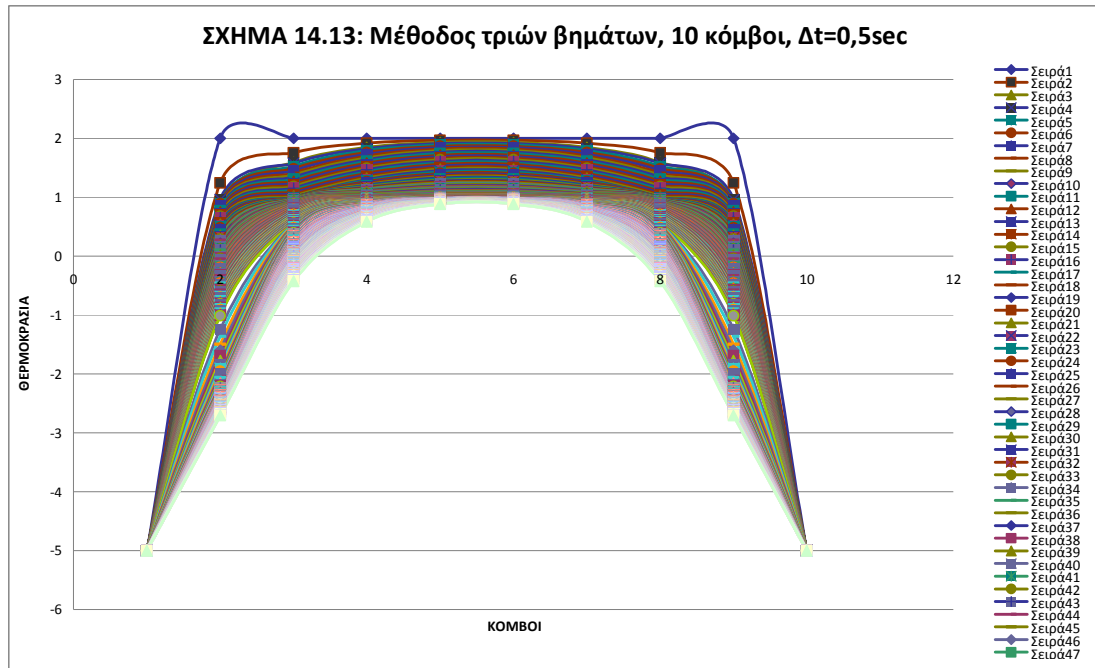


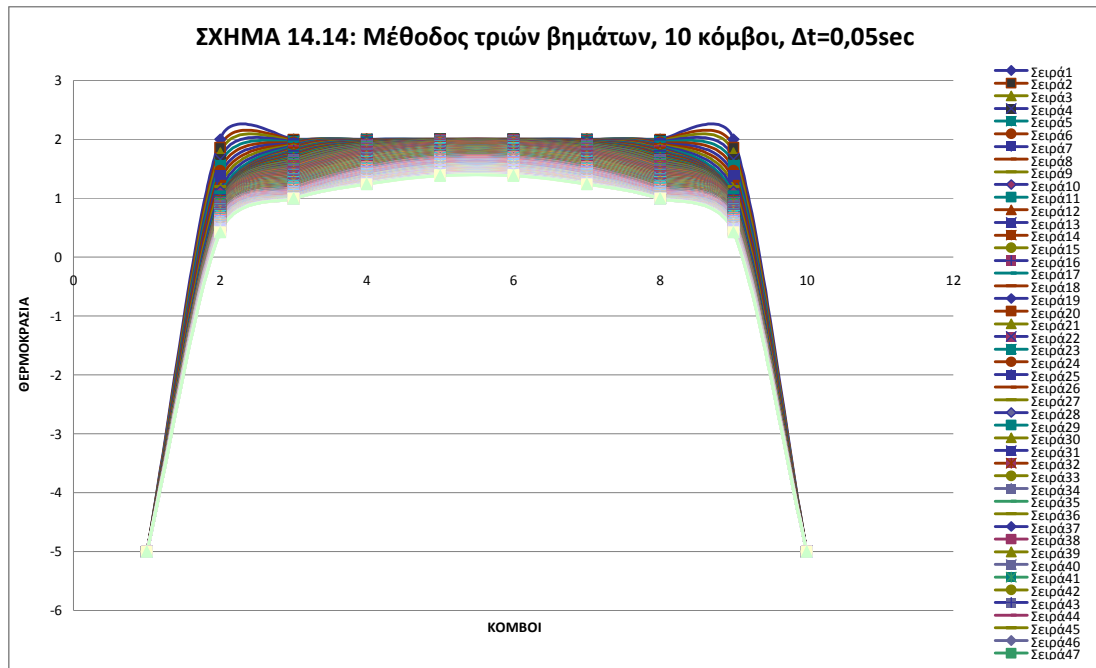


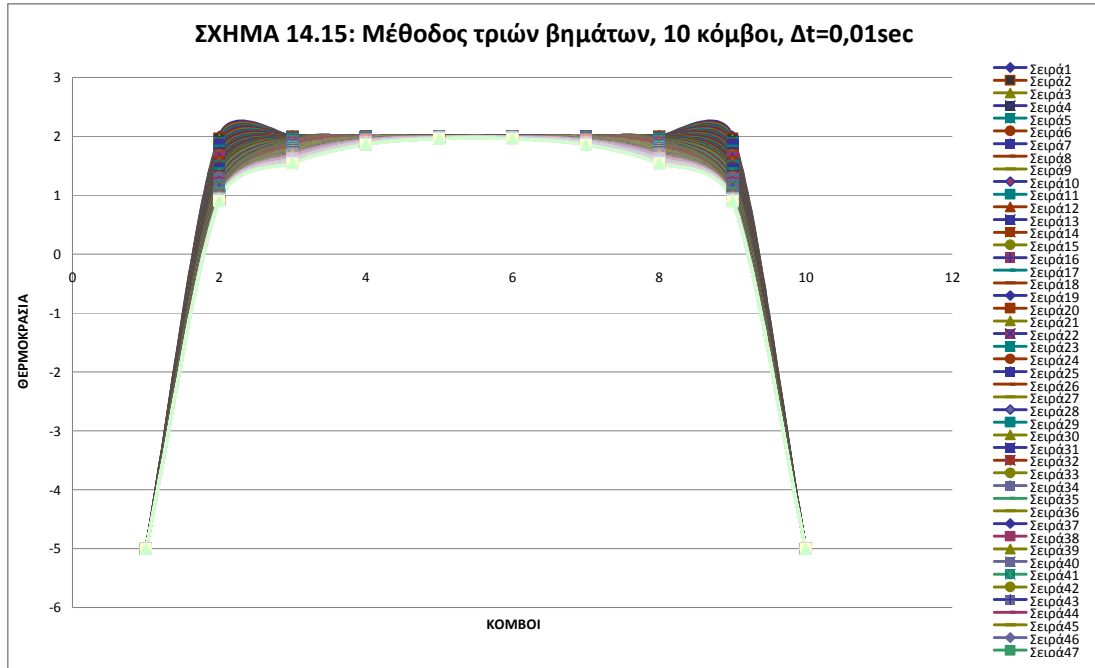


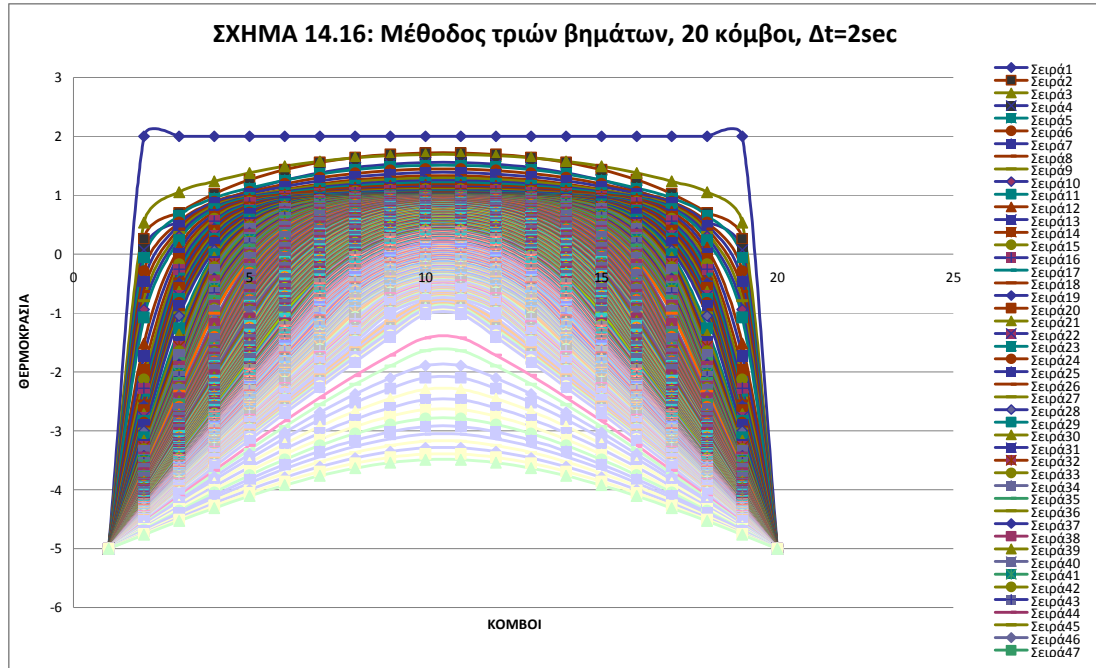


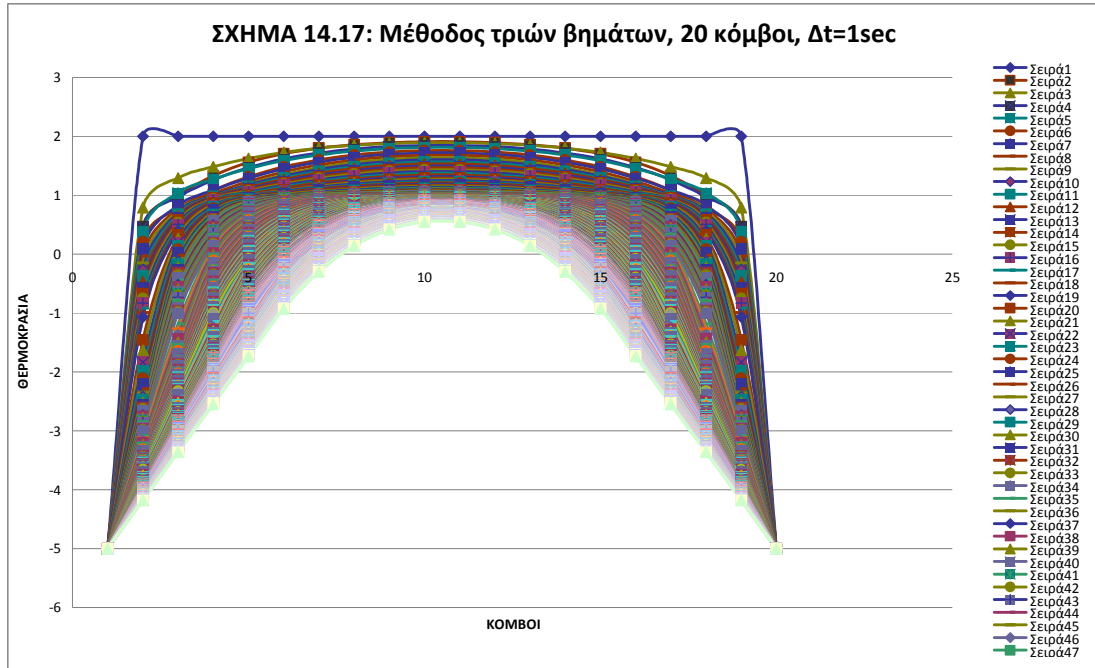


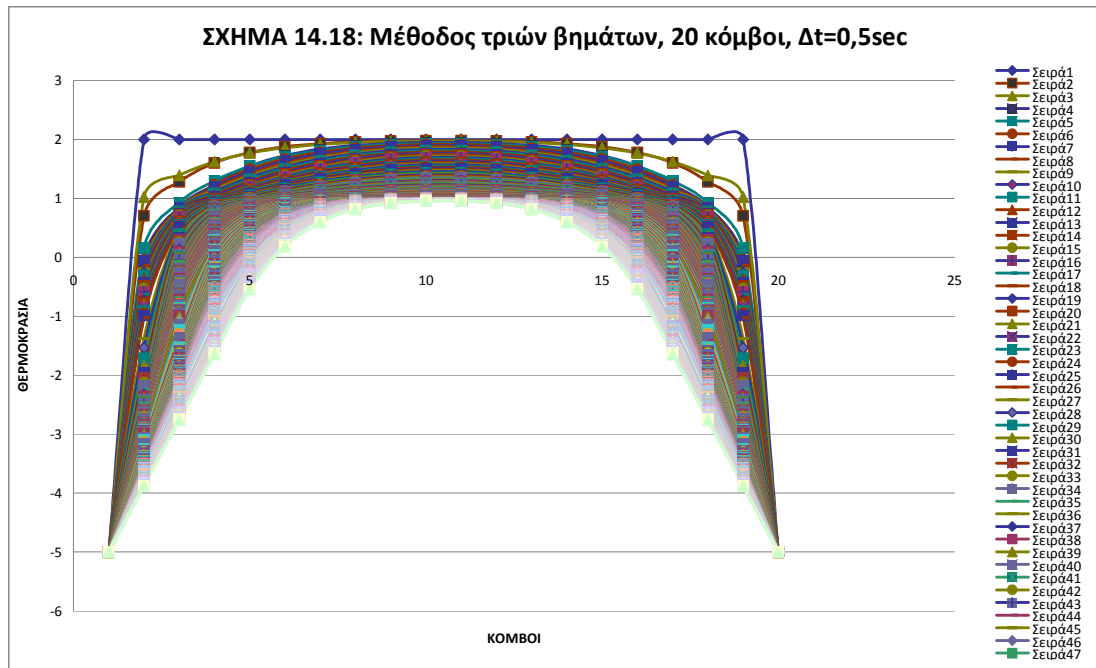


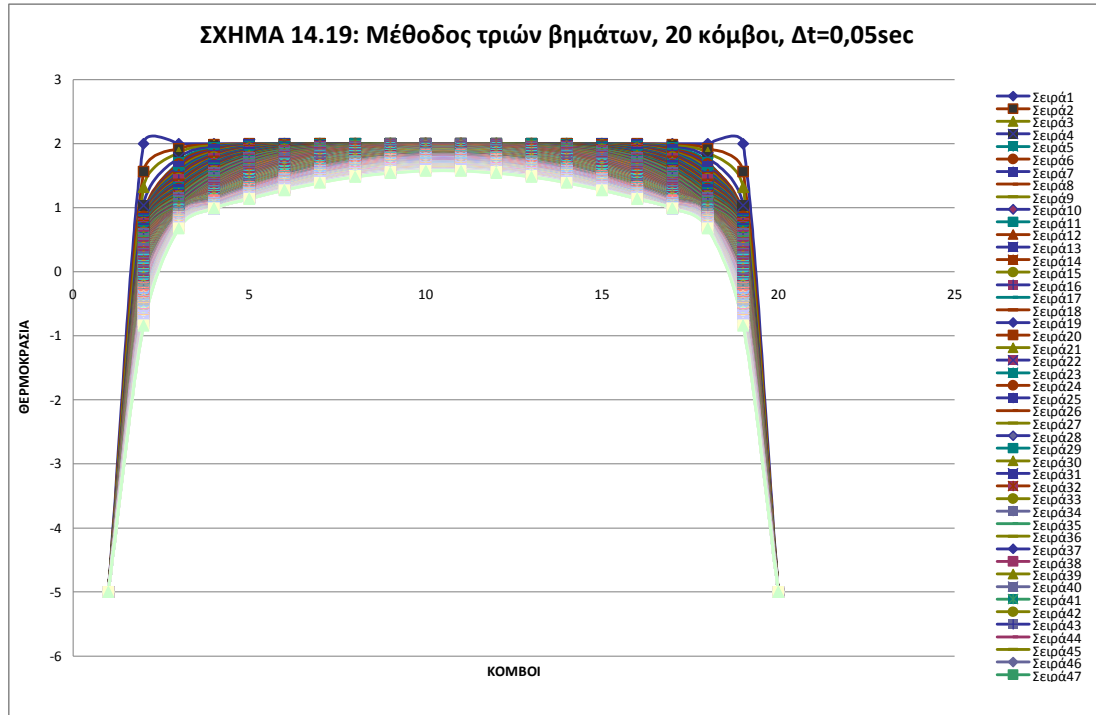




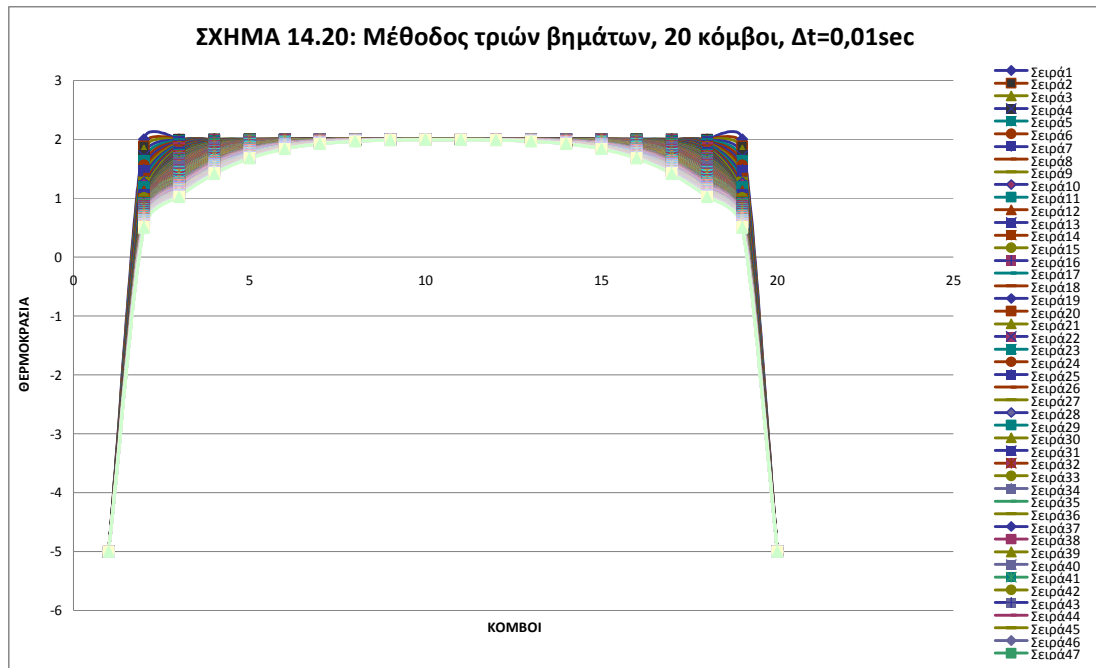


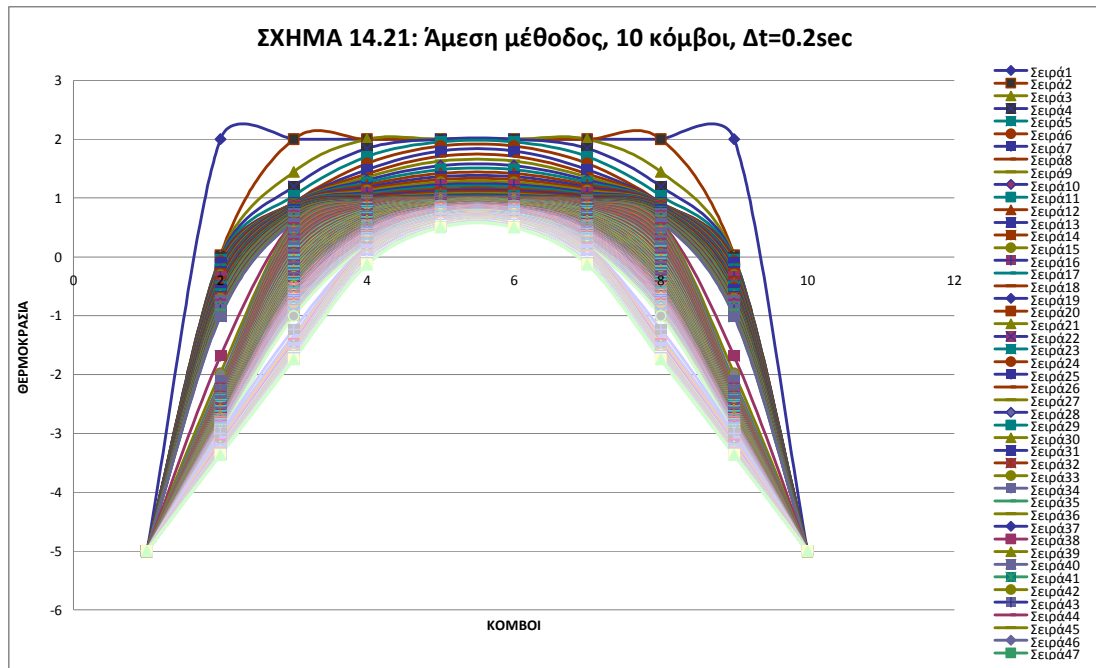


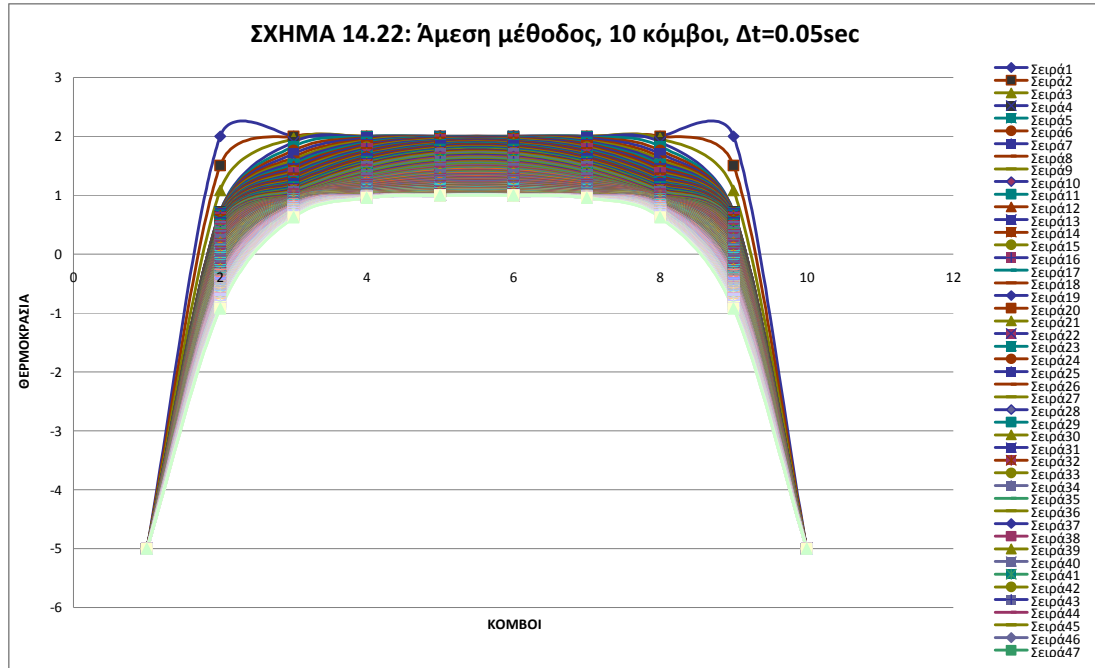


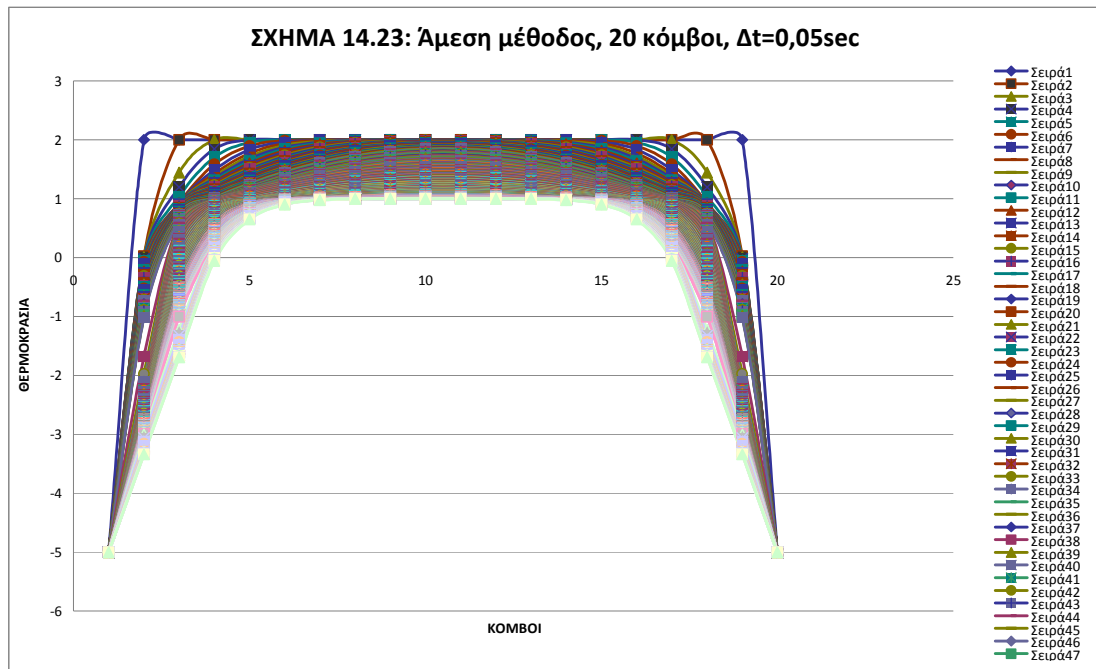












## 15. Σχολιασμός διαγραμμάτων – Συμπεράσματα

### 15.1. Μορφή καμπυλών

Για το υπολογιστικό μέρος της εργασίας έγινε χρήση λογισμικού Microsoft Excel 2003, κυρίως λόγω της ικανότητάς του να επιλύει τα προκύπτοντα από τις εξετασθείσες μεθόδους συστήματα. Να σημειωθεί εδώ ότι με τη χρήση των προηγούμενων αναλυθέντων αλγορίθμων υπολογισμού, τα συστήματα που προέκυψαν ήταν γραμμικά, αφού οι τιμές των συντελεστών  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  της εξίσωσης [11.13] υπολογίζονταν σε ενδιάμεσα βήματα του αλγορίθμου, οπότε δεν ήταν απαραίτητη κάποια επαναληπτική διαδικασία για την επίλυση του εκάστοτε συστήματος. Η ικανότητα του λογισμικού να λύνει γραμμικά συστήματα με TDMA έδωσε την ευκαιρία γρήγορης επίλυσης των συστημάτων αυτών.

Ο όρος «Σειρά» που αναφέρεται στα υπομνήματα των γραφημάτων αναλογεί σε σειρά δεδομένων του αντίστοιχου υπολογιστικού φύλλου (βάσει του οποίου έγινε το διάγραμμα). Σε όλα τα διαγράμματα κάθε σειρά αντιπροσωπεύει ένα χρονικό βήμα της κάθε μεθόδου και η Σειρά 1 είναι η αρχή των χρόνων με τις θερμοκρασίες να βρίσκονται στα επίπεδα των αρχικών συνθηκών του προβλήματος. Η Σειρά 2 εμφανίζει τις θερμοκρασίες ύστερα από το πρώτο χρονικό βήμα κ.ο.κ..

Εξαίρεση αποτελούν τα διαγράμματα της ενότητας 15.2. όπου η κάθε σειρά αναφέρεται στις διαδοχικές θερμοκρασίες συγκεκριμένου κόμβου, όπως αναλύεται παρακάτω.

Στην ενότητα 15.2. οι καμπύλες στα διαγράμματα παρουσιάζουν τη χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου. Στα υπόλοιπα διαγράμματα οι καμπύλες δεν έχουν φυσική σημασία, αλλά παρατίθενται για την καλύτερη εποπτεία του διαγράμματος και την κατά το δυνατό καλύτερη παρακολούθηση της εξέλιξης του φαινομένου. Αυτό το οποίο πραγματικά έχει σημασία είναι οι διακριτές τιμές της θερμοκρασίας κάθε κόμβου στα διαδοχικά χρονικά βήματα. Σε αυτά τα διαγράμματα παρατηρείται (κυρίως στην καμπύλη των αρχικών συνθηκών και κατά περιπτώσεις στα πρώτα χρονικά βήματα) μία ανύψωση της θερμοκρασίας πάνω από τις αρχικές συνθήκες. Αφού λοιπόν η καμπύλη δεν έχει φυσική σημασία, δεν βρίσκει φυσική ερμηνεία ούτε αυτή η ανύψωση. Προκαλείται από αυτό καθαυτό το λογισμικό και το πολυώνυμο που χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει την αντίστοιχη σειρά δεδομένων.

Το λογισμικό δύναται να γραφήσει μόνο 255 καμπύλες ανά διάγραμμα, οπότε όσο το χρονικό βήμα ελαττώνεται είναι λογικό το διάγραμμα να φαίνεται όλο και περισσότερο «κενό», αφού οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι τόσο μικρές, ώστε οι καμπύλες ουσιαστικά σε πολλά σημεία συμπίπτουν. Αυτό το φαινόμενο πάντως, δεν αποτελεί πρόβλημα για τη μελέτη, αφού τα υπάρχοντα διαγράμματα είναι αρκετά και ικανά για την εξαγωγή των συμπερασμάτων, εξ άλλου, αυτό που πραγματικά ενδιαφέρει είναι η συμπεριφορά της μεθόδου στα πρώτα κυρίως στάδια και ιδιαίτερα γύρω από την περιοχή αλλαγής φάσης του υλικού. Τα τελευταία στάδια δεν εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού η πορεία του φαινομένου είναι προδιαγεγραμμένη, θα καταλήξει δηλαδή ύστερα από κάποιο χρονικό διάστημα σε θερμική ισορροπία.

Παρόλο που οι καμπύλες στα περισσότερα διαγράμματα δεν έχουν – όπως προαναφέρθηκε – φυσική σημασία, εν τούτοις η **παραβολοειδής μορφή** τους ερμηνεύεται φυσικά:

Η θερμική αγωγιμότητα του νερού ( $k \approx 0,59 \text{ W/mK}$  ή  $\text{W/m}^\circ\text{C}$ , η βαθμονόμηση του μεγέθους είναι ίδια αφού  $K = 273 + ^\circ\text{C}$ , οπότε  $\Delta[K] = \Delta[^\circ\text{C}]$ ) όπως και των περισσότερων χρησιμοποιούμενων υλικών είναι αρκετά μικρή. Κάτι τέτοιο σημαίνει πως το φαινόμενο της διάχυσης της θερμότητας δεν εξελίσσεται ιδανικά και καταπιέζεται από τον θεμελιώδη περιορισμό που εισάγεται στο σύστημα από την τιμή της θερμικής αγωγιμότητας.

Επίσης, όπως είναι αποδεδειγμένο, κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης δημιουργείται διφασική περιοχή αποτελούμενη από τις δύο φάσεις της ουσίας, περιοχή ιδιαίτερα δύσκολη στη μελέτη, καθώς δεν υπάρχει σαφής πληροφορία για την τιμή ούτε της θερμικής αγωγιμότητας ούτε της θερμοχωρητικότητας στην περιοχή αυτή, ούτε σαφής ένδειξη για το κλάσμα υγρού ή στερεού. Προφανώς αυτή η κατάσταση προκαλεί πρόσθετη αντίσταση (ή τουλάχιστον ανομοιομορφία) στο φαινόμενο της αγωγής της θερμότητας.

Όπως προαναφέρθηκε, το φαινόμενο της διάχυσης της θερμότητας κυβερνάται ισχυρά από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των ορίων του συστήματος που εξετάζεται και μάλιστα όσο μικρότερη αυτή η διαφορά, τόσο περισσότερο καθυστερεί η εξέλιξη του φαινομένου.

Συνέπεια των παραπάνω είναι ότι σε πρόβλημα όπως το εξεταζόμενο, όσο πλησιέστερα βρίσκεται ένας κόμβος στις οριακές συνθήκες, τόσο γρηγορότερη και μεγαλύτερη μεταβολή θερμοκρασίας θα παρουσιάσει.

Σε συνδυασμό, λοιπόν, με το συμμετρικό χαρακτήρα του προβλήματος (άρτιος αριθμός κόμβων, όμοιες οριακές συνθήκες και κοινές αρχικές συνθήκες για όλους τους κόμβους) γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι καμπύλες χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας των κόμβων θα είναι παραβολικού τύπου και αφού είναι πρόβλημα στερεοποίησης (οριακές συνθήκες  $<0$ , αρχικές συνθήκες  $>0$ ), η παραβολή θα είναι με τα κοίλα προς τα κάτω.

Άλλο κοινό χαρακτηριστικό αυτών των διαγραμμάτων είναι η ιδιαίτερη **πύκνωση των καμπυλών** σε συγκεκριμένα θερμοκρασιακά πλαίσια, γεγονός το οποίο ερμηνεύεται βάσει της θεώρησης που έγινε γύρω από το φαινόμενο αλλαγής φάσης:

Θεωρητικά, το φαινόμενο αλλαγής φάσης είναι ισοθερμοκρασιακό. Το γεγονός αυτό σε ιδανικό θερμοδυναμικό σύστημα μίας καθαρής ουσίας εκφράζεται με την παροδική σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του συστήματος στα όρια του σημείου αλλαγής φάσης του καθ' όλη τη διάρκεια της μετάβασης από τη μία φάση στην άλλη.

Πρακτικά κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει είτε επειδή οι συνθήκες κάτω από τις οποίες το φαινόμενο λαμβάνει χώρα δεν είναι ιδανικές, είτε επειδή η ίδια η ουσία δεν είναι καθαρή.

Η εξεταζόμενη μέθοδος, σαν μαθηματικό προϊόν δύναται να περιγράψει ένα ιδανικό φαινόμενο. Όμως δυστυχώς δεν υπάρχει αποδεδειγμένα ισχύουσα συνάρτηση της θερμοχωρητικότητας με τη θερμοκρασία. Ως εκ τούτου για τις ανάγκες του παρόντος θεωρήθηκε βηματική η παραπάνω συνάρτηση με το συνακόλουθο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης. Το εύρος αυτό της ισοδύναμης θερμοχωρητικότητας είναι σημαντικό όχι μόνο για το διάγραμμα αλλά και για τη συμμετοχή του στην ίδια την εξίσωση πεπερασμένων διαφορών, αφού  $C_p = \Delta H / \Delta T$ , όπου για  $\Delta H$  λαμβάνεται η λανθάνουσα θερμότητα του εξεταζόμενου υλικού, μέγεθος θεμελιώδες και σταθερό, οπότε η τιμή της ισοδύναμης θερμοχωρητικότητας εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το εκάστοτε θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης.

Αυτή η θεώρηση, πάντως, του φαινομένου της αλλαγής φάσης ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, καθώς η κατάσταση που συναντάται σήμερα στις πειραματικές διατάξεις είναι ότι η μετάβαση της κατάστασης ενός θερμοδυναμικού συστήματος συντελείται εντός θερμοκρασιακών ορίων πεπερασμένου εύρους.

Γίνεται επίσης αντιληπτό ότι απείρως μικρό θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης, απαιτεί και απειροστό χρονικό βήμα, ικανό να ανιχνεύσει της απειροστές μεταβολές της θερμοκρασίας, ώστε να δύναται να περιγράψει το φαινόμενο τήξης/στερεοποίησης και να προβλέψει την έναρξη και το πέρας της μετάβασης από τη μία κατάσταση στην άλλη. Κάτι τέτοιο σε περισσότερο σύνθετα προβλήματα θα εμφάνιζε υπερβολικό κόστος από πλευράς χρόνου επεξεργασίας. Επίσης θα ήταν

ουσιαστικά μη εφαρμόσιμο, αφού όπως προαναφέρθηκε η σημερινές πειραματικές διατάξεις παρουσιάζουν εύρος αλλαγής φάσης.

Αφού λοιπόν η μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη συντελείται εντός θερμοκρασιακών ορίων και όχι σε διακριτή και συγκεκριμένη θερμοκρασιακή τιμή, ερμηνεύεται η πύκνωση των θερμοκρασιακών καμπυλών στα διαγράμματα, εντός των προαναφερθέντων ορίων και η αντίστοιχη αραίωσή τους έξω από αυτά.

Αντίστοιχα, η αραίωση των καμπυλών σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας κόμβου μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών βημάτων, επομένως το φαινόμενο πλέον αντιμετωπίζεται ως απλή διάχυση θερμότητας, γεγονός που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

## **15.2. Ταχύτητα Μεθόδου**

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επίδοση των μεθόδων από την άποψη της ταχύτητας. Έγιναν δοκιμές και με έμμεση και με άμεση μέθοδο.

Παρατίθενται διαγράμματα για κοινές οριακές συνθήκες  $-5^{\circ}\text{C}$ , με πλέγμα 20 κόμβων. Εξετάζεται η επίδοση κάθε μεθόδου στις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ανάλογα με το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας κάθε κόμβου. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα ενώ ο κάθετος στη θερμοκρασία του κόμβου. Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο κόμβο του πλέγματος. Ενώ το πλέγμα είναι 20 κόμβων παρουσιάζονται μόνο 20 καμπύλες, αφού λόγω της συμμετρικής φύσης και του ιδανικού χαρακτήρα του προβλήματος, οι θερμοκρασίες συμπίπτουν συμμετρικά ως προς το κέντρο της ράβδου, ανά δύο.

Τα συμπεράσματα συμφωνούν με τα αναμενόμενα, αφού η πλέον γρήγορη από όλες τις μεθόδους είναι η άμεση. Επίσης είναι εμφανής η αργοπορία της μεθόδου τριών χρονικών βημάτων σε σχέση με την απλή έμμεση μέθοδο. Αντίστοιχα, αυξανόμενη της ταχύτητας της μεθόδου, αυξάνεται και η απόκλιση από την αναλυτική λύση του προβλήματος.[3]

Είναι προφανές ότι για να είναι δυνατή η σύγκριση των παραπάνω μεθόδων, πρέπει το χρονικό βήμα να είναι κοινό για όλες, οπότε επιλέχθηκε χρονικό βήμα 0,05sec.

Ακολουθούν τα γραφήματα της παρούσας ενότητας με την κάτωθι σειρά:

**ΣΧΗΜΑ 15.1:** Άμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  $1^{\circ}\text{C}$

**ΣΧΗΜΑ 15.2:** Έμμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  $1^{\circ}\text{C}$

**ΣΧΗΜΑ 15.3:** Μέθοδος τριών βημάτων, εύρος αλλαγής φάσης  $1^{\circ}\text{C}$

**ΣΧΗΜΑ 15.4:** Άμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  $2^{\circ}\text{C}$

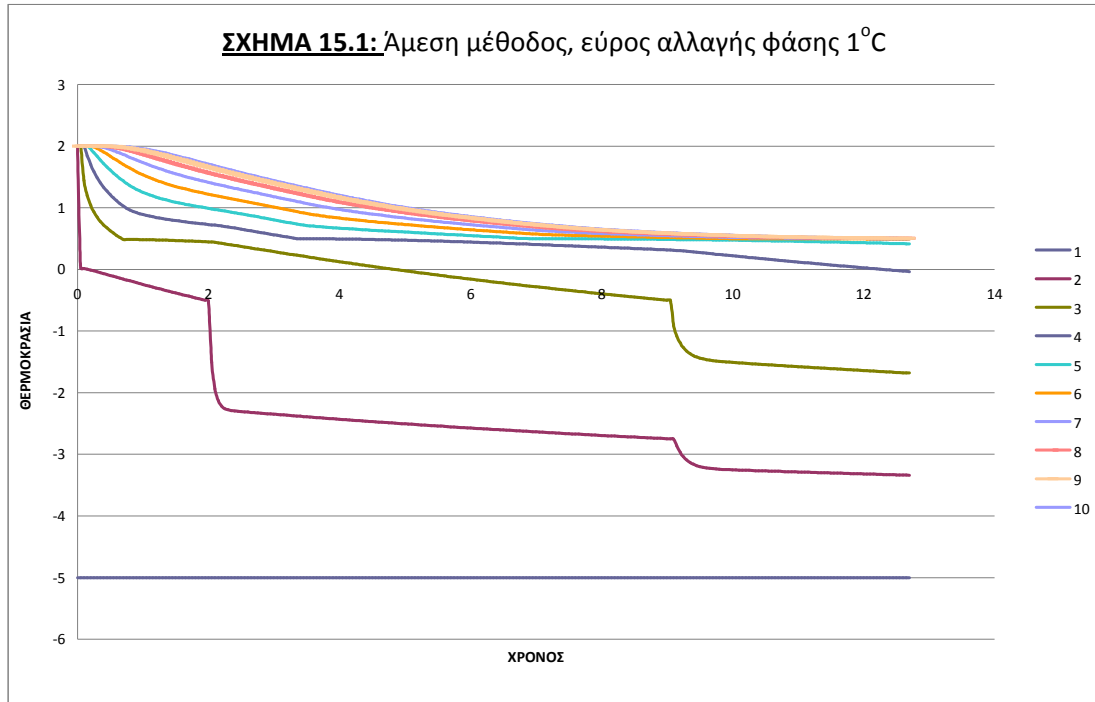
**ΣΧΗΜΑ 15.5:** Έμμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  $2^{\circ}\text{C}$

**ΣΧΗΜΑ 15.6:** Μέθοδος τριών βημάτων, εύρος αλλαγής φάσης  $2^{\circ}\text{C}$

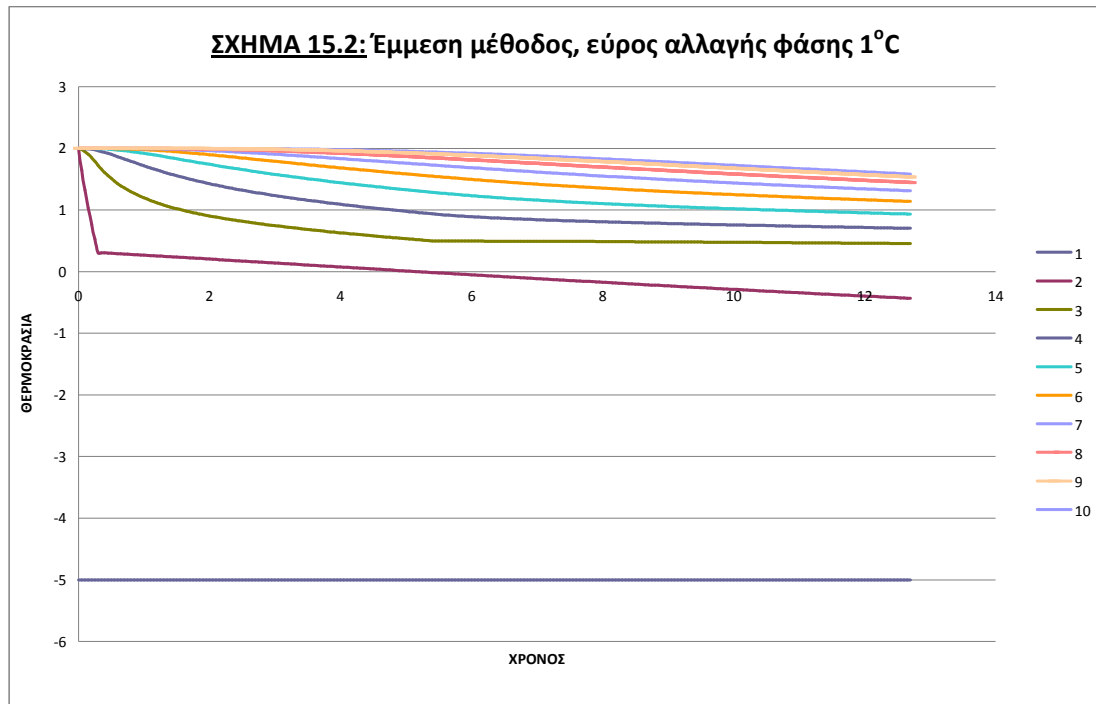
**ΣΧΗΜΑ 15.7:** Άμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  $4^{\circ}\text{C}$

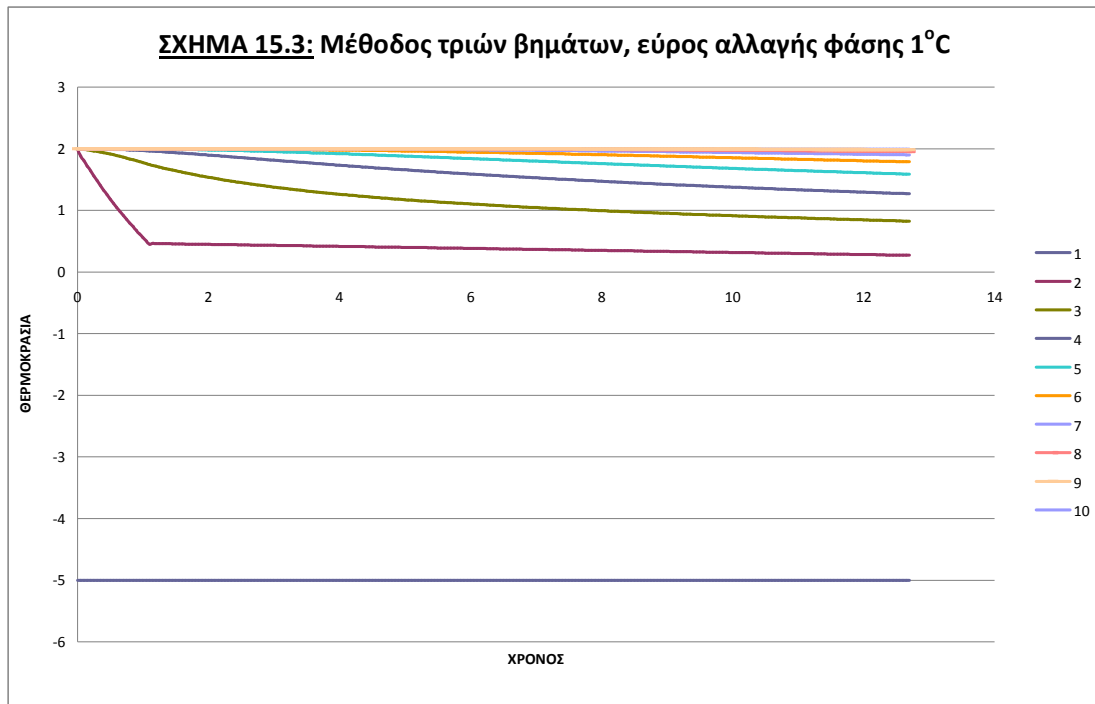
**ΣΧΗΜΑ 15.8:** Έμμεση μέθοδος, εύρος αλλαγής φάσης  $4^{\circ}\text{C}$

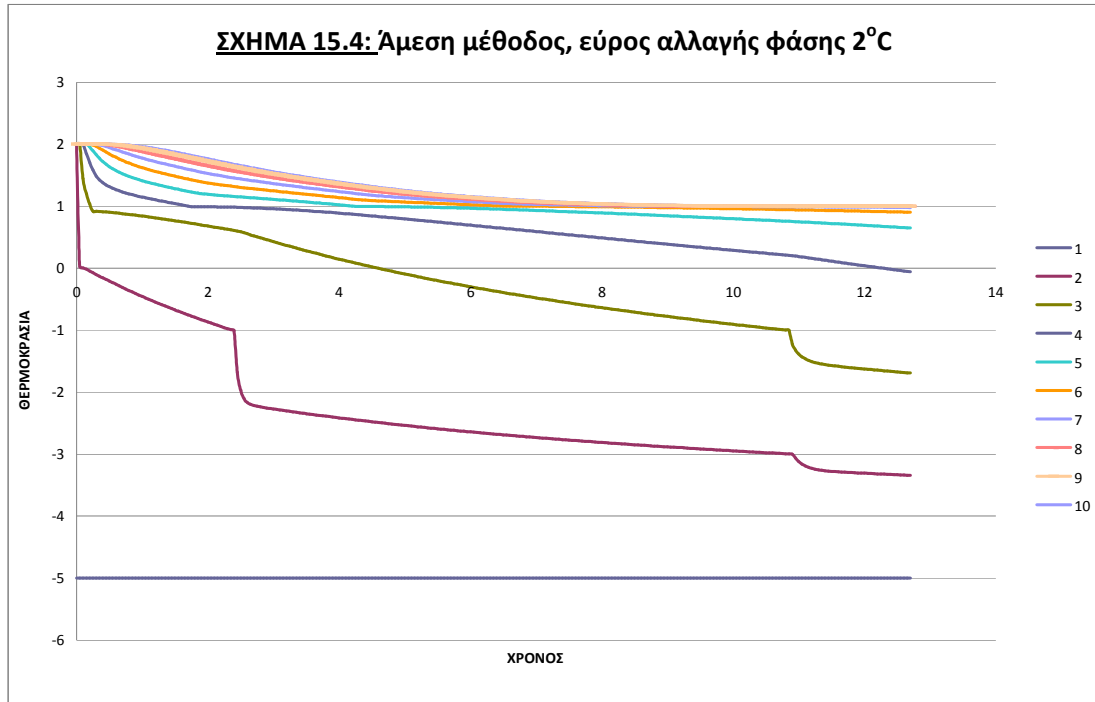
**ΣΧΗΜΑ 15.9:** Μέθοδος τριών βημάτων, εύρος αλλαγής φάσης  $4^{\circ}\text{C}$

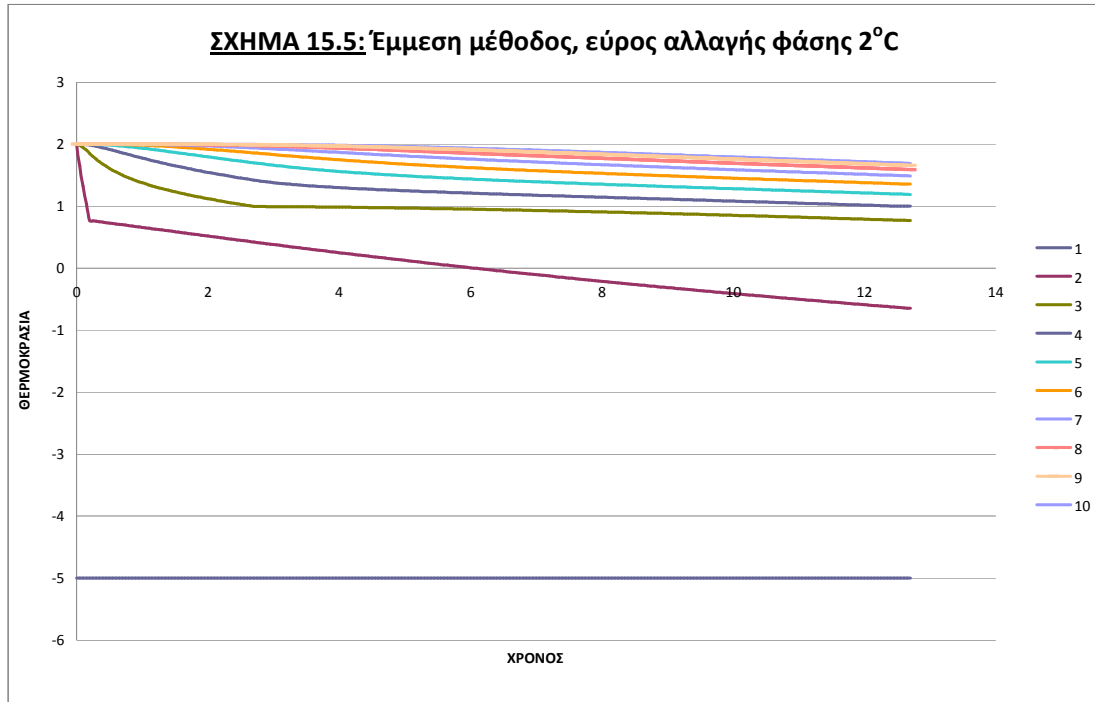


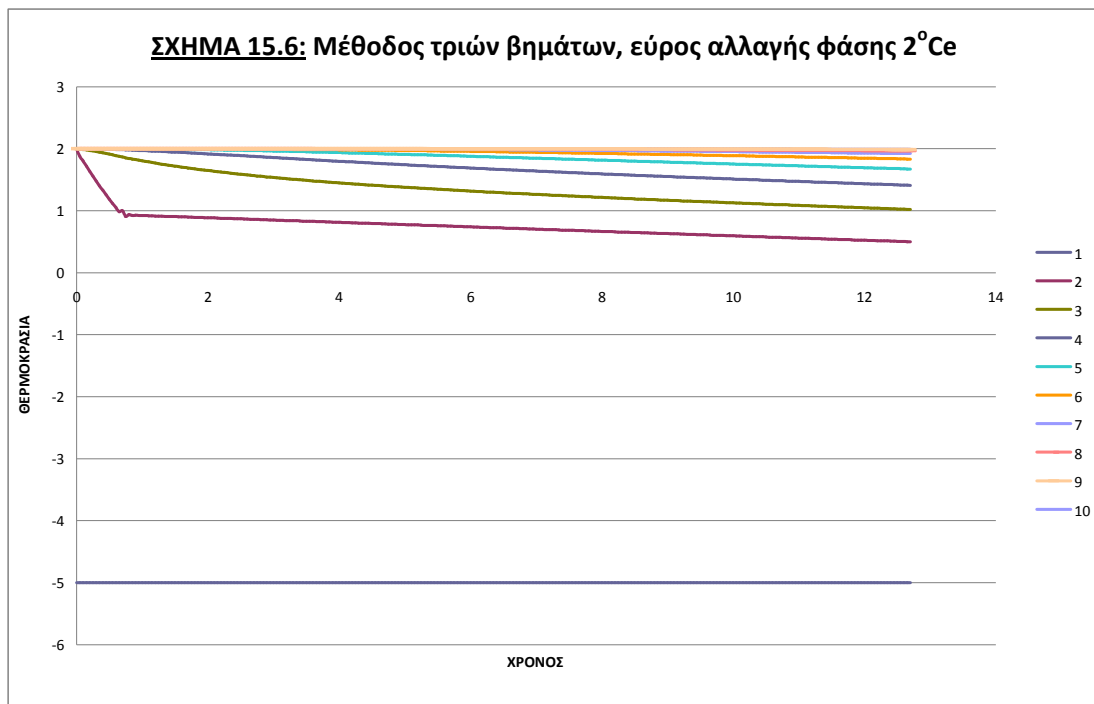


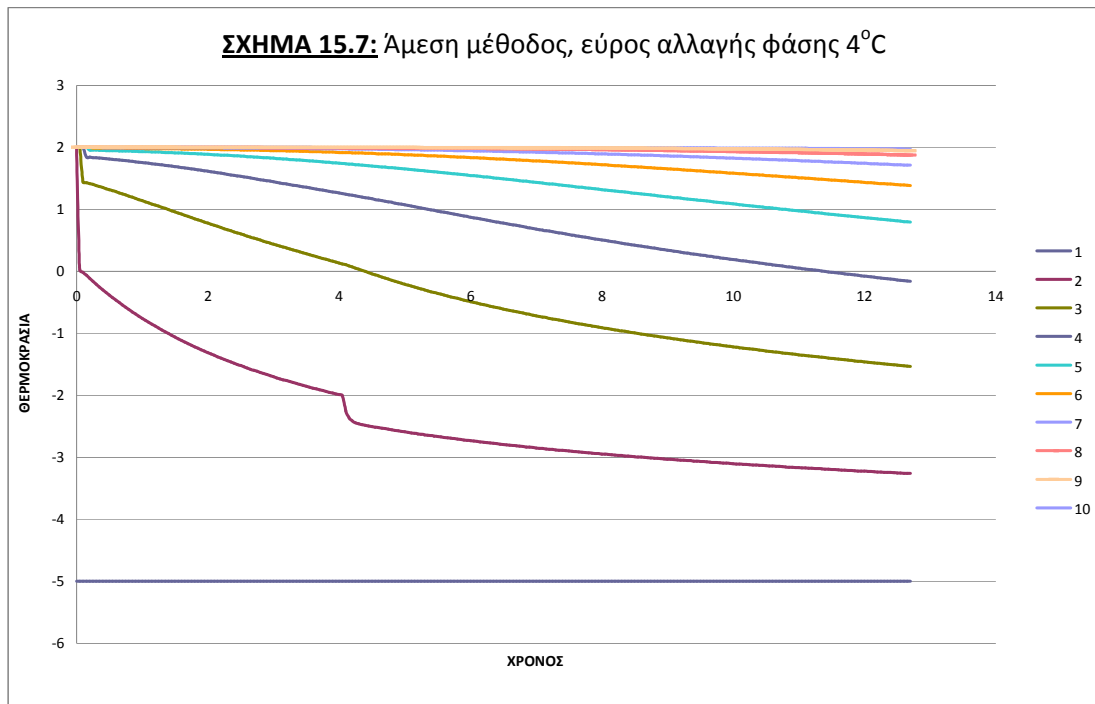


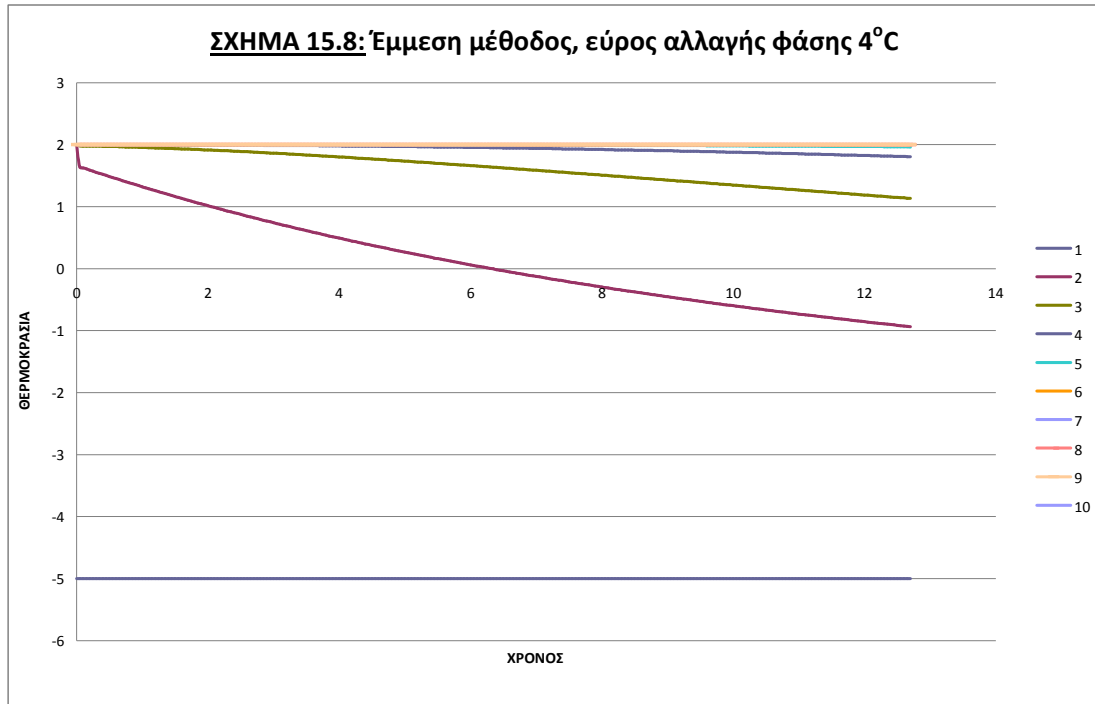


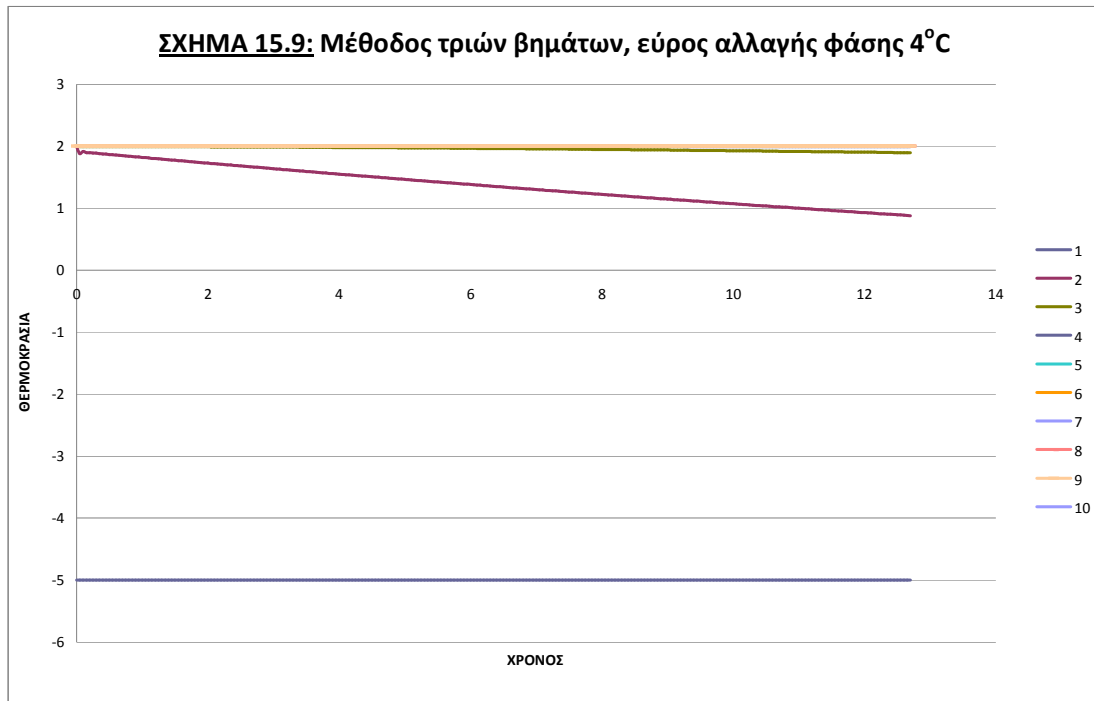














### **15.3. Ανεξαρτητοποίηση υπολογιστικού πλέγματος**

Εξετάζοντας το θερμοκρασιακό προφίλ των μεθόδων για τον ίδιο χρόνο, παίρνουμε μία καμπύλη θερμοκρασίας κόμβων. Παρατηρείται διαφορά μεταξύ των καμπυλών, παρ' ότι θεωρητικά θα έπρεπε να ταυτίζονται, αφού είναι αποτελέσματα της ίδιας μεθόδου εφαρμοσμένης στο ίδιο πρόβλημα με τις ίδιες συνθήκες, εκτός από το χρονικό βήμα επεξεργασίας, και αναφέρονται σε συγκεκριμένο και κοινό χρονικό σημείο (2", 4", 6").

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μέθοδος εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το χρονικό βήμα, και μάλιστα φαίνεται ότι το βήμα όσο μικρότερο είναι, τόσο καλύτερα αποτελέσματα αποδίδει.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν ο όρος σειρά αναφέρεται σε κάθε περίπτωση σε διαφορετικό χρονικό βήμα επεξεργασίας από πλευράς μεθόδου, ενώ η Σειρά 1 είναι η θερμοκρασιακή κατάσταση στην αρχή του χρόνου (αρχικές συνθήκες). Η αντιστοιχία είναι η εξής:

- Σειρά 1 : αρχή
- Σειρά 2 : χρονικό βήμα 2sec
- Σειρά 3 : χρονικό βήμα 1sec
- Σειρά 4 : χρονικό βήμα 0,5sec
- Σειρά 5 : χρονικό βήμα 0,05sec
- Σειρά 6 : χρονικό βήμα 0,01sec

Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τα προαναφερθέντα σε πλέγμα 20 κόμβων, τόσο για την απλή έμμεση μέθοδο, όσο και για τη μέθοδο τριών βημάτων. Οι οριακές συνθήκες είναι  $-5^{\circ}\text{C}$  και το εύρος αλλαγής φάσης  $2^{\circ}\text{C}$ :

**ΣΧΗΜΑ 15.10.:** Έμμεση μέθοδος, χρονικό διάστημα 2sec

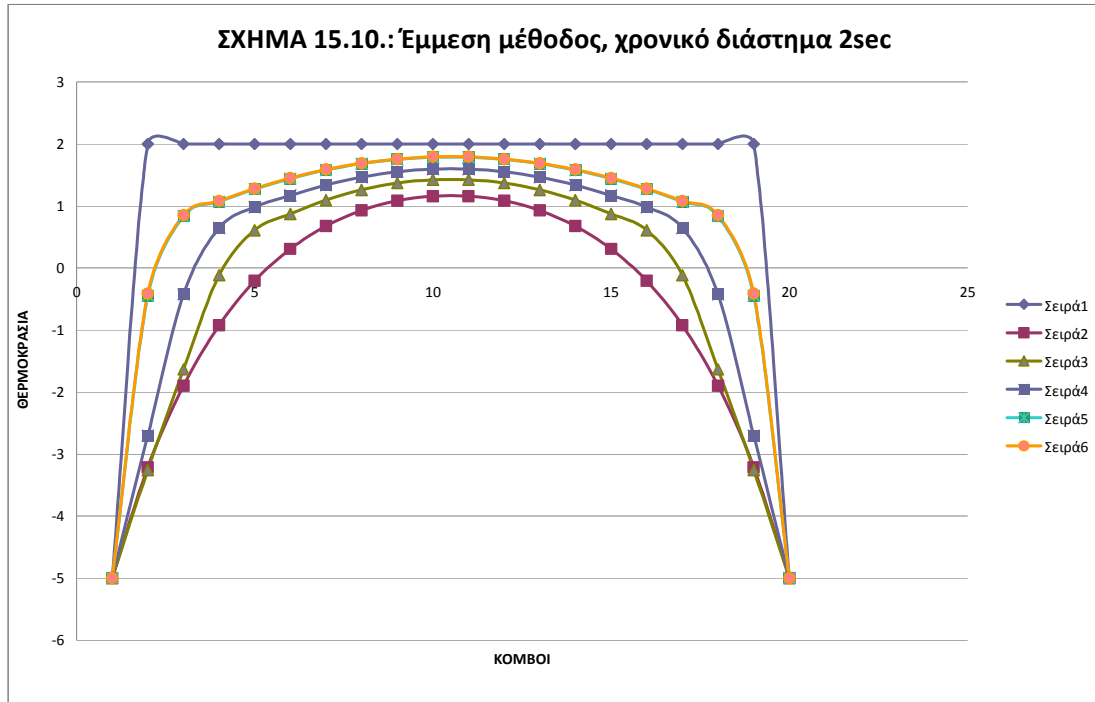
**ΣΧΗΜΑ 15.11.:** Έμμεση μέθοδος, χρονικό διάστημα 4sec

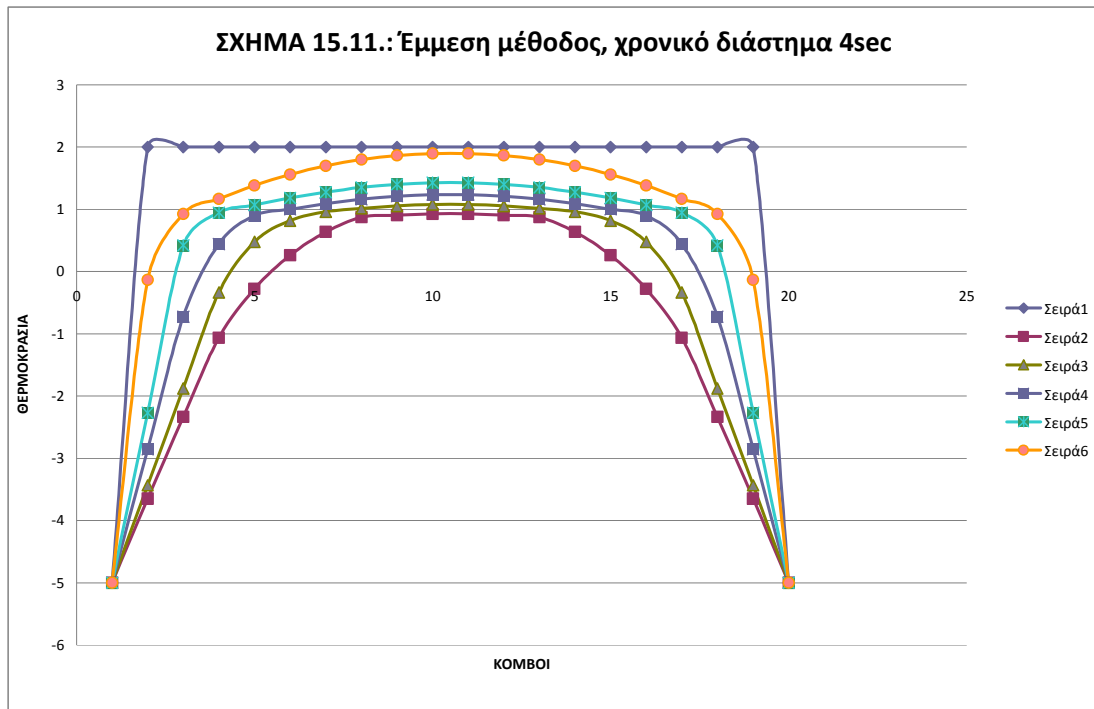
**ΣΧΗΜΑ 15.12.:** Έμμεση μέθοδος, χρονικό διάστημα 6sec

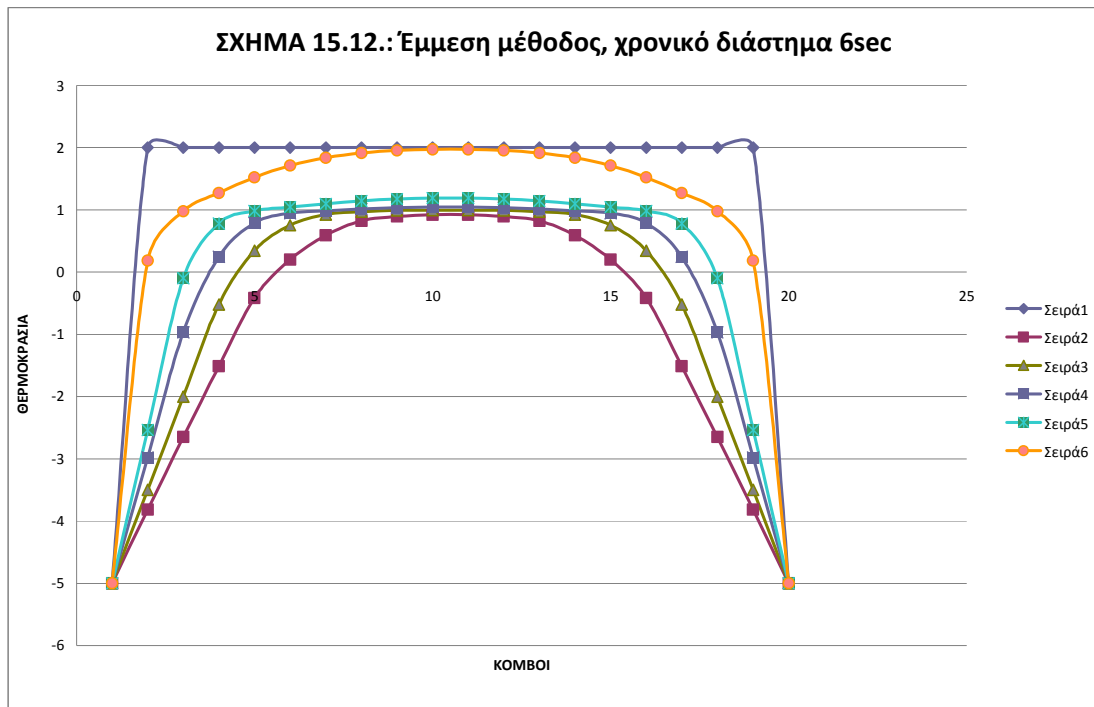
**ΣΧΗΜΑ 15.13.:** Μέθοδος τριών βημάτων, χρονικό διάστημα 2sec

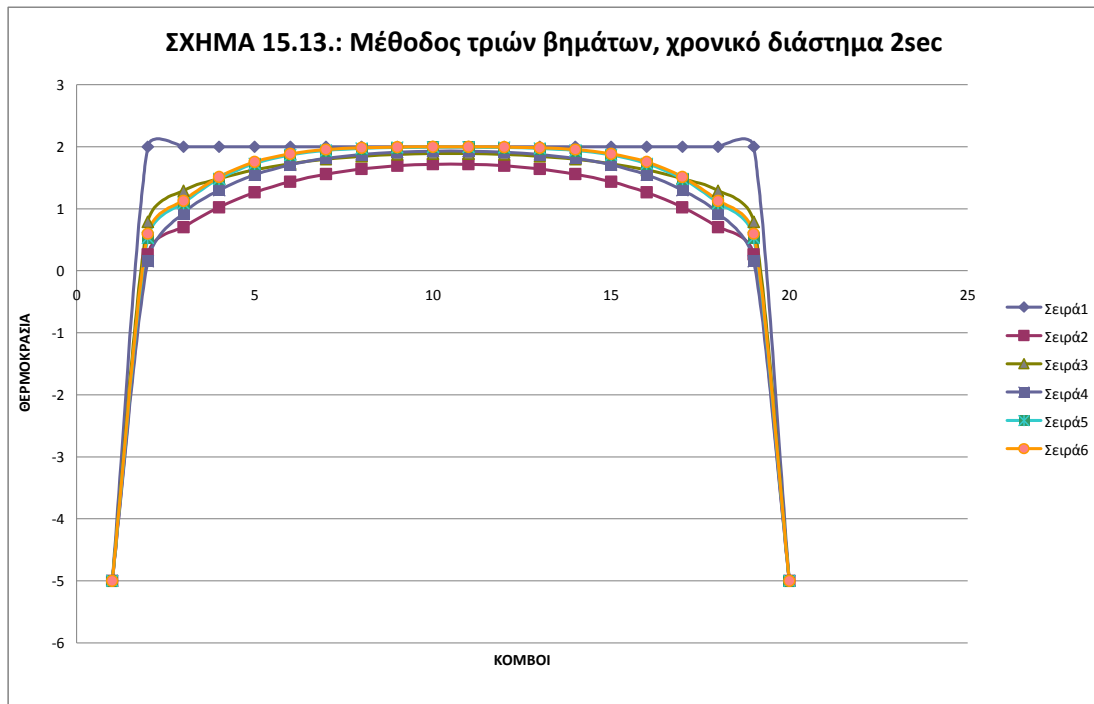
**ΣΧΗΜΑ 15.14.:** Μέθοδος τριών βημάτων, χρονικό διάστημα 4sec

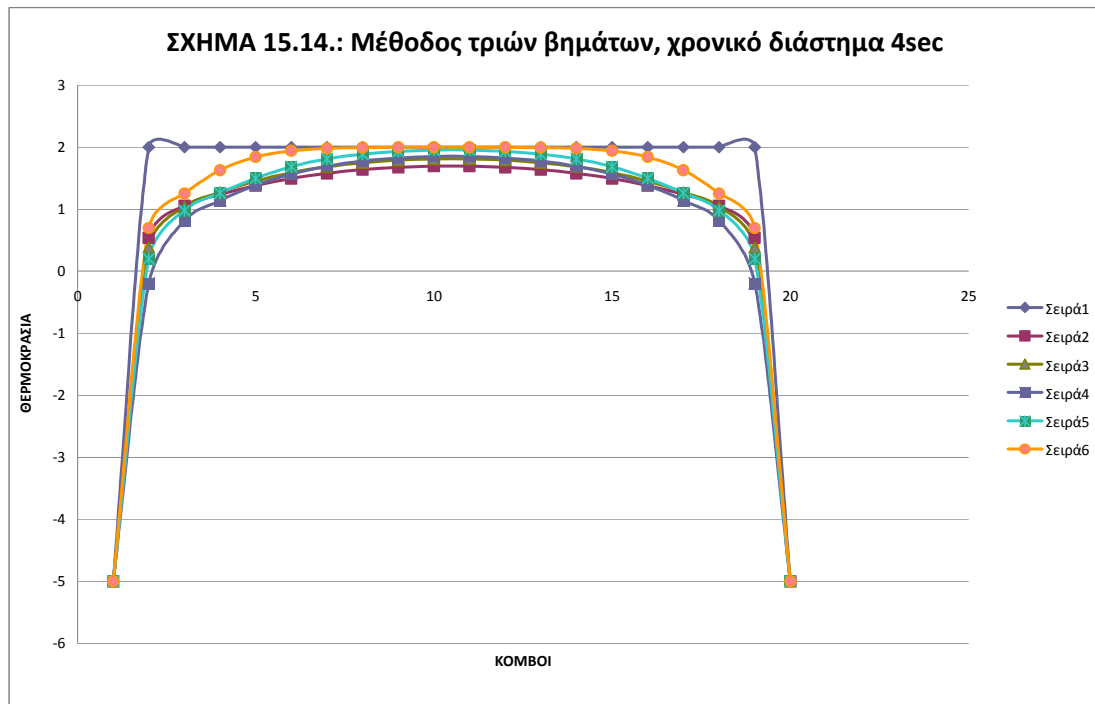
**ΣΧΗΜΑ 15.15.:** Μέθοδος τριών βημάτων, χρονικό διάστημα 6sec

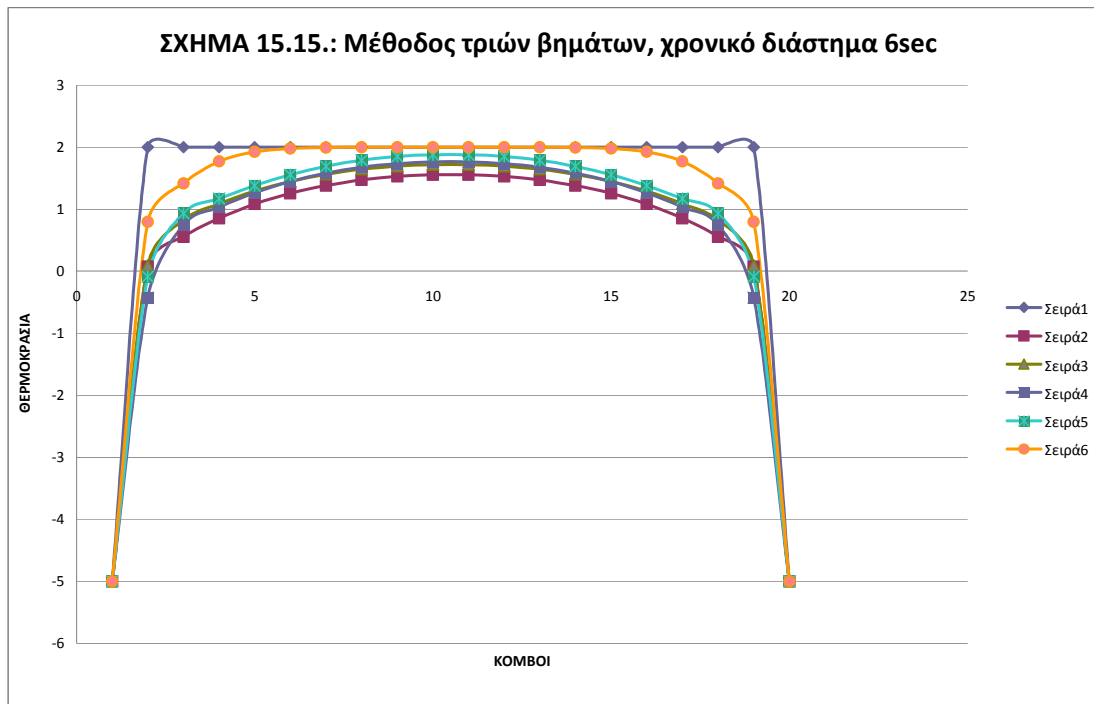












#### 15.4. Υπερπήδηση Λανθάνουσας Θερμότητας

Το εύρος αλλαγής φάσης στη συνάρτηση της θερμοχωρητικότητας φαίνεται να παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία της μεθόδου. Θεωρητικά τα γραφήματα που δίνει η μέθοδος κινούνται σε σωστούς άξονες, καθώς εμφανίζουν γενικά τη συμπεριφορά που ορίζει το φυσικό φαινόμενο: οι εξωτερικότεροι κόμβοι θα ψυχθούν γρηγορότερα και αυτή η συμμετοχή τους στη μετάδοση της θερμότητας προκαλεί καθυστέρηση στην εξέλιξη του φαινομένου στους περισσότερους εσωτερικούς κόμβους. Κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης του υλικού οι θερμοκρασίες των κόμβων «καθυστερούν» εντός του θερμοκρασιακού εύρους της αλλαγής αυτής, μέχρι το πέρας της μεταβατικής διαδικασίας.

Σε γενικές γραμμές αυτό παρατηρείται, όμως οι εξωτερικότεροι κόμβοι ακόμη και αν έχουν μία ισχυρή οριακή συνθήκη ( $-10^{\circ}\text{C}$ ), θα έπρεπε να συμπεριφέρονται σαν τους υπόλοιπους κόμβους, εμφανίζοντας καθυστέρηση στην περιοχή αλλαγής φάσης, πράγμα που εν γένει δεν παρατηρείται και μάλιστα ψύχονται πολύ γρήγορα.

Το τελευταίο γεννά ερωτηματικά γύρω από την απόδοση της μεθόδου, γύρω δηλαδή από το πώς είναι δυνατόν να ψύχεται τόσο γρήγορα ο εξωτερικός κόμβος και ο επόμενος να κυμαίνεται σε φυσιολογικά περίπου επίπεδα.

Ανεξάρτητα μεθόδου, χρονικού βήματος, οριακών συνθηκών, εύρους  $C_p$ , ή οτιδήποτε άλλο, οι πρώτοι εξωτερικοί κόμβοι φαίνονται πάντα να μην συνάδουν με το υπόλοιπο φαινόμενο και να ψύχονται πολύ πιο γρήγορα από τους υπόλοιπους.

Με τον όρο «**υπερπήδηση αλλαγής φάσης**» καταδεικνύεται η αδυναμία (τοπική ή ολική) της μεθόδου να προβλέψει τη θερμοκρασία ενός κόμβου εντός θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης. Σε περιπτώσεις υπερπήδησης η μέθοδος αποδίδει λανθασμένη θερμοκρασιακή τιμή στον εν λόγω κόμβο και δεν λαμβάνει υπ' όψη το σύνολο των θερμικών φορτίων που συναλλάχθησαν στο φαινόμενο, οπότε αγνοούνται τα σημαντικά ποσά λανθάνουσας θερμότητας που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς της αποθηκευτικής ικανότητας ενός υλικού, γεγονός σημαντικότερο όταν το υλικό προορίζεται για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (ΥΑΦ).

Συνήθως η υπερπήδηση της λανθάνουσας θερμότητας παρατηρείται στους κόμβους εκείνους του υπολογιστικού πλέγματος που βρίσκονται πλησιέστερα στις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Μεταξύ των πλέον εξωτερικών κόμβων του υπολογιστικού πλέγματος και των οριακών συνθηκών του προβλήματος η θερμοκρασιακή διαφορά είναι μεγαλύτερη, οπότε και το ρεύμα θερμότητας είναι μεγαλύτερο, οπότε είναι μεγαλύτερος και ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του κόμβου αυτού.

Κάτι τέτοιο δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει περίπτωση να εμφανιστεί υπερπήδηση λανθάνουσας θερμότητας σε κάποιον από τους υπόλοιπους κόμβους. Η πιθανότητα εμφάνισης της υπερπήδησης αυτής εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

1. Οριακές συνθήκες
2. Χρονικό βήμα
3. Εύρος αλλαγής φάσης

Σε γενικές γραμμές:

1. Όσο μεγαλύτερη η οριακή συνθήκη και μάλιστα όσο μεγαλύτερη διαφορά εμφανίζει από τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα εμφάνισης υπερπήδησης.



2. Όσο μεγαλύτερο το χρονικό βήμα, τόσο τραχύτερη η προσέγγιση του φαινομένου, άρα τόσο πιθανότερο το ενδεχόμενο η μέθοδος να αγνοήσει την αλλαγή της φάσης του υλικού
3. Όσο μικρότερο το θερμοκρασιακό εύρος μέσα στο οποίο το υλικό υποτίθεται ότι υφίσταται τη μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη, τόσο δυσκολότερο το έργο της μεθόδου να παρακολουθήσει τις θερμοκρασιακές μεταβολές οπότε τόσο πιθανότερη η περίπτωση να παραβλεφθεί αυτή η αλλαγή φάσης.

Ειδικότερα, ο συνδυασμός δύο εκ των παραπάνω παραγόντων δημιουργεί σοβαρές προϋποθέσεις υπερπήδησης της λανθάνουσας θερμότητας.

- Σε περιπτώσεις μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ οριακών και αρχικών συνθηκών του μοντέλου, εμφανίζεται αυξημένη θερμορροή την οποία πιθανό μεγάλο χρονικό βήμα αδυνατεί να παρακολουθήσει και να προβλέψει σωστά την αλλαγή φάσης. Έτσι η μέθοδος δίνει γρήγορα τιμή στη θερμοκρασία του κόμβου υπερπηδώντας όλο το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης, αγνοώντας πλήρως τη λανθάνουσα θερμότητα που συναλλάχθηκε στην εξέλιξη του φαινομένου.
- Συνδυασμός μικρού εύρους αλλαγής φάσης και αντίστοιχα μεγάλου χρονικού βήματος οδηγεί τη μέθοδο να υπερκεράσει σε ένα χρονικό βήμα το εύρος αλλαγής φάσης με τις ανάλογες συνέπειες στα αποτελέσματά της.

Σε κάθε περίπτωση η υπερπήδηση της αλλαγής φάσης οδηγεί τη μέθοδο σε εντελώς λανθασμένα συμπεράσματα αφού αφ' ενός μεν παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου πιο γρήγορη απ' ό,τι πραγματικά είναι, αφ' ετέρου δε επειδή δεν υπολογίζει τα ποσά λανθάνουσας θερμότητας.

Όπως αναλύθηκε επανειλημμένως στα προηγούμενα κεφάλαια, τα λανθάνοντα ποσά θερμότητας που προσφέρονται ή απάγονται από το θερμοδυναμικό σύστημα είναι σημαντικά και η παράβλεψή τους οδηγεί σε αντιστοίχως σημαντικά σφάλματα.

Επομένως, συγκρίνοντας τα φαινόμενα μονοδιάστατης διάχυσης θερμότητας σε δύο καθ' όλα όμοια, με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες, θερμοδυναμικά συστήματα, παρατηρείται ότι το σύστημα το οποίο αλλάζει φάση μέσα στα θερμοκρασιακά όρια του φαινομένου, αφ' ενός μεν θα έρθει σε θερμική ισορροπία αρκετά αργότερα, αφ' ετέρου δε θα έχει συναλλάξει πολύ μεγαλύτερα ποσά θερμότητας σε σχέση με το άλλο θερμοδυναμικό σύστημα το οποίο απλά ψύχεται ή θερμαίνεται χωρίς αλλαγή στη φάση του.

Γίνεται εμφανές λοιπόν ότι πιθανή αδυναμία της μεθόδου να προβλέπει την τήξη ή τη στερεοποίηση του υλικού, την καθιστά μη χρησιμοποιήσιμη στην έρευνα των ΥΑΦ αφού δεν αποδίδει σωστά τη συμπεριφορά των τελευταίων και αμελεί σημαντικά θερμικά φορτία.

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των διαφορετικών περιπτώσεων που εξετάστηκαν στη μελέτη αυτή. Περιλαμβάνει όλα τα διαγράμματα του κεφαλαίου 14, και σκοπός του είναι να καταδείξει αυτά στα οποία η μέθοδος η οποία κάθε φορά εφαρμόζεται, αδυνατεί να παρακολουθήσει σωστά το φαινόμενο και εμφανίζει υπερπήδηση λανθάνουσας θερμότητας, κάτι το οποίο στον πίνακα συμβολίζεται με το χαρακτήρα [×]. Ο χαρακτήρας υποδηλώνει σωστή συμπεριφορά της μεθόδου [✓].

Έμμεση μέθοδος χωρίς διόρθωση

10 ΚΟΜΒΟΙ			dt				
ΟΡΙΑΚΕΣ (°C)	ΕΥΡΟΣ (°C)	C <sub>p</sub>	2	1	0.5	0.05	0.01
-5	1		×	×	✓	✓	✓
-5	2		×	×	✓	✓	✓
-5	4		✓	✓	✓	✓	✓
-10	1		×	×	×	✓	✓
-10	2		×	×	×	✓	✓
-10	4		×	×	✓	✓	✓

Έμμεση μέθοδος χωρίς διόρθωση

20 ΚΟΜΒΟΙ			dt				
ΟΡΙΑΚΕΣ (°C)	ΕΥΡΟΣ (°C)	C <sub>p</sub>	2	1	0.5	0.05	0.01
-5	1		×	×	×	✓	✓
-5	2		×	×	×	✓	✓
-5	4		×	×	×	×	×
-10	1		×	×	×	✓	✓
-10	2		×	×	×	✓	✓
-10	4		×	×	×	×	×

Έμμεση μέθοδος με διόρθωση

10 ΚΟΜΒΟΙ			dt				
ΟΡΙΑΚΕΣ(° C)	ΕΥΡΟΣ C <sub>p</sub> (°C)		2	1	0.5	0.05	0.01
-5	1		✓	✓	✓	✓	✓
-5	2		✓	✓	✓	✓	✓
-5	4		✓	✓	✓	✓	✓
-10	1		✓	✓	✓	✓	✓
-10	2		✓	✓	✓	✓	✓
-10	4		✓	✓	✓	✓	✓

Έμμεση μέθοδος με διόρθωση

20 ΚΟΜΒΟΙ			dt				
ΟΡΙΑΚΕΣ (°C)	ΕΥΡΟΣ C <sub>p</sub> (°C)		2	1	0.5	0.05	0.01
-5	1		✓	✓	✓	✓	✓
-5	2		✓	✓	✓	✓	✓
-5	4		✓	✓	✓	✓	✓
-10	1		✓	✓	✓	✓	✓
-10	2		✓	✓	✓	✓	✓
-10	4		✓	✓	✓	✓	✓

Άμεση μέθοδος

10 ΚΟΜΒΟΙ dt = 0.2''			
ΟΡΙΑΚΕΣ (°C)	Εύρος C <sub>p</sub> (°C)		
	1	2	4
-5	✓	✓	✓
-10	✓	✗	✗
10 ΚΟΜΒΟΙ dt = 0.05''			
ΟΡΙΑΚΕΣ (°C)	Εύρος C <sub>p</sub> (°C)		
	1	2	4
-5	✓	✓	✓
-10	✓	✓	✓
20 ΚΟΜΒΟΙ dt = 0.05''			
ΟΡΙΑΚΕΣ (°C)	Εύρος C <sub>p</sub> (°C)		
	1	2	4
-5	✓	✓	✓
-10	✗	✗	✓

**Γενικές παρατηρήσεις:**

- Γενικά φαίνεται η μέθοδος να χρειάζεται διαφορετικό χρονικό βήμα για κάθε διαφορετικό κόμβο, αφού χρονικό βήμα που θεωρητικά περιγράφει σωστά τους εσωτερικούς κόμβους, αδυνατεί να κάνει το ίδιο και για τους εξωτερικούς. Η επιλογή διαφορετικών χρονικών βημάτων προφανώς δεν είναι δυνατή, οπότε το χρονικό βήμα καθορίζεται από τους εξωτερικούς κόμβους, αυτούς, δηλαδή από τους κόμβους οι οποίοι είναι οι πλέον επιρρεπείς σε εμφάνιση υπερπήδησης.
- Σε γενικές γραμμές παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη οριακή συνθήκη τείνει να οδηγήσει σε υπερπήδηση ακόμα και την κατά τα άλλα αξιόπιστη μέθοδο τριών χρονικών βημάτων.
- Η ισχυρή διόρθωση που επιβάλλεται στην έμμεση μέθοδο, την καθυστερεί εμφανώς, αφού δίνει σε μετέπειτα χρονικό βήμα θερμοκρασιακή τιμή μικρότερη από προηγούμενο βήμα. Συνήθως εμφανίζεται σε περιπτώσεις μεγάλου χρονικού βήματος και στους εξωτερικούς κόμβους.
- Παρ' όλ' αυτά η διόρθωση της θερμοκρασίας οδηγεί τη μέθοδο στο να αποφεύγει την υπερπήδηση της λανθάνουσας θερμότητας



Παρατίθενται αντιπροσωπευτικά τρία παραδείγματα όπου η μέθοδος τριών βημάτων είναι αποτελεσματική και αποφεύγει την εμφάνιση υπερπήδησης της λανθάνουσας θερμότητας, σε σύγκριση πάντα με περίπτωση όπου η έμμεση μέθοδος παρουσιάζει πρόβλημα. Τα παραδείγματα παρουσιάζονται με την κάτωθι σειρά:

**ΣΧΗΜΑ 15.16:** Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι, οριακές  $-5^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $1^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 2sec

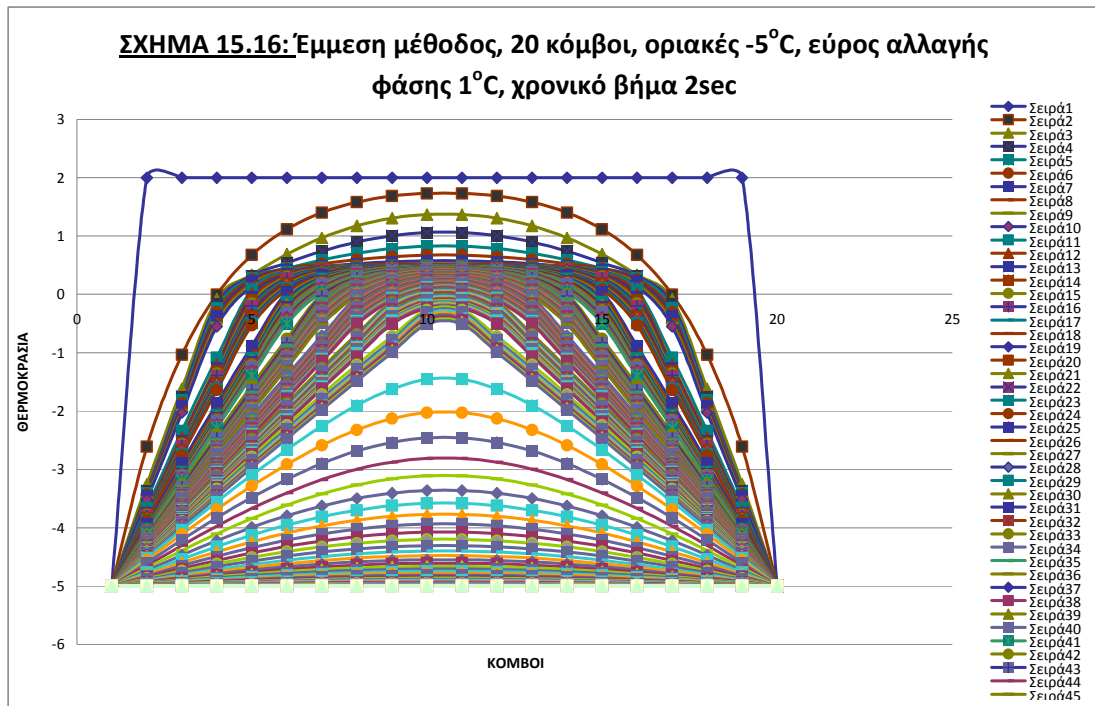
**ΣΧΗΜΑ 15.17:** Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι, οριακές  $-5^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $1^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 2sec

**ΣΧΗΜΑ 15.18:** Έμμεση μέθοδος, 10 κόμβοι, οριακές  $-5^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $2^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 1sec

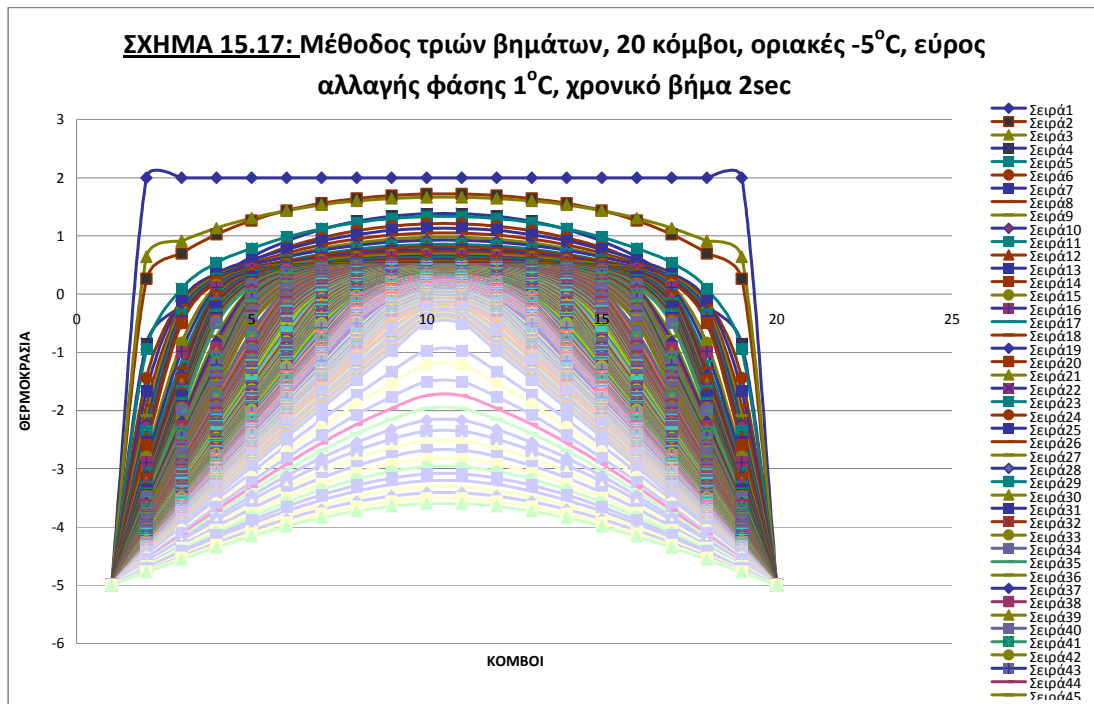
**ΣΧΗΜΑ 15.19:** Μέθοδος τριών βημάτων, 10 κόμβοι, οριακές  $-5^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $2^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 1sec

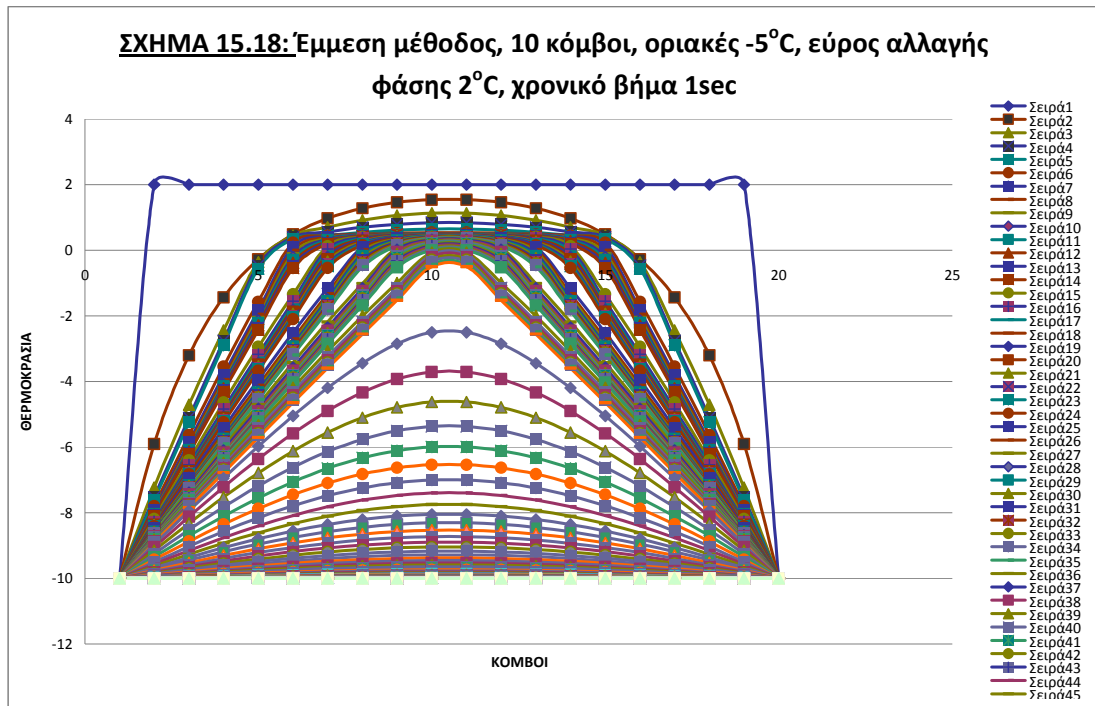
**ΣΧΗΜΑ 15.20:** Έμμεση μέθοδος, 20 κόμβοι, οριακές  $-10^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $1^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 0,5sec

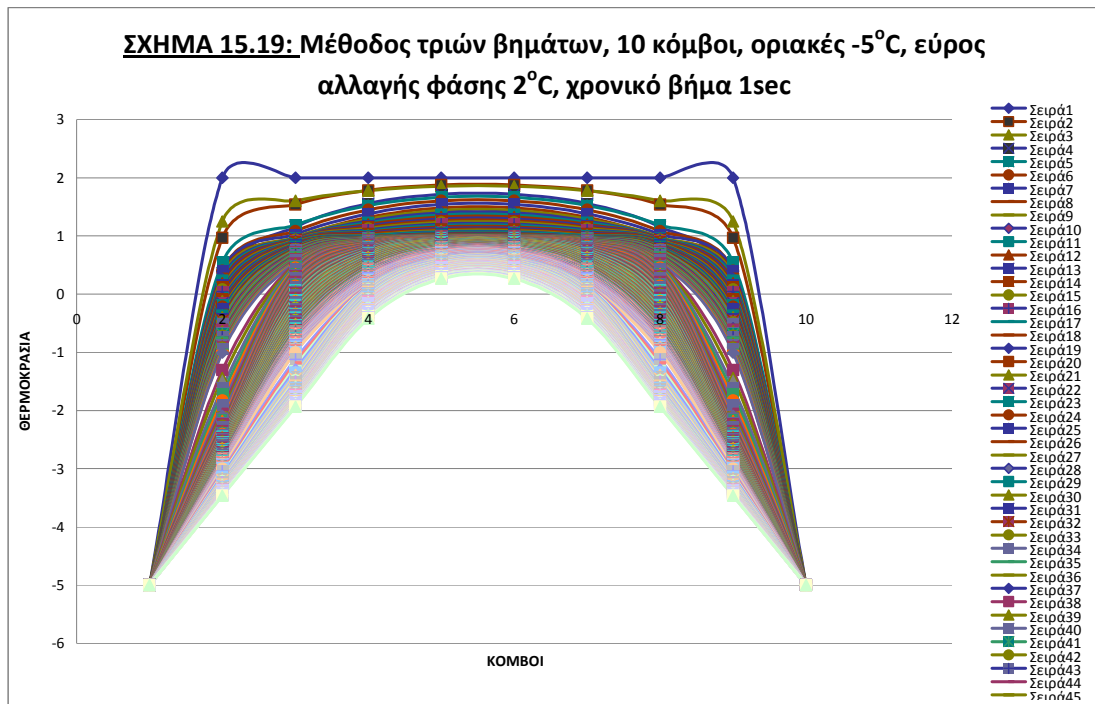
**ΣΧΗΜΑ 15.21:** Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι, οριακές  $-10^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $1^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 0,5sec



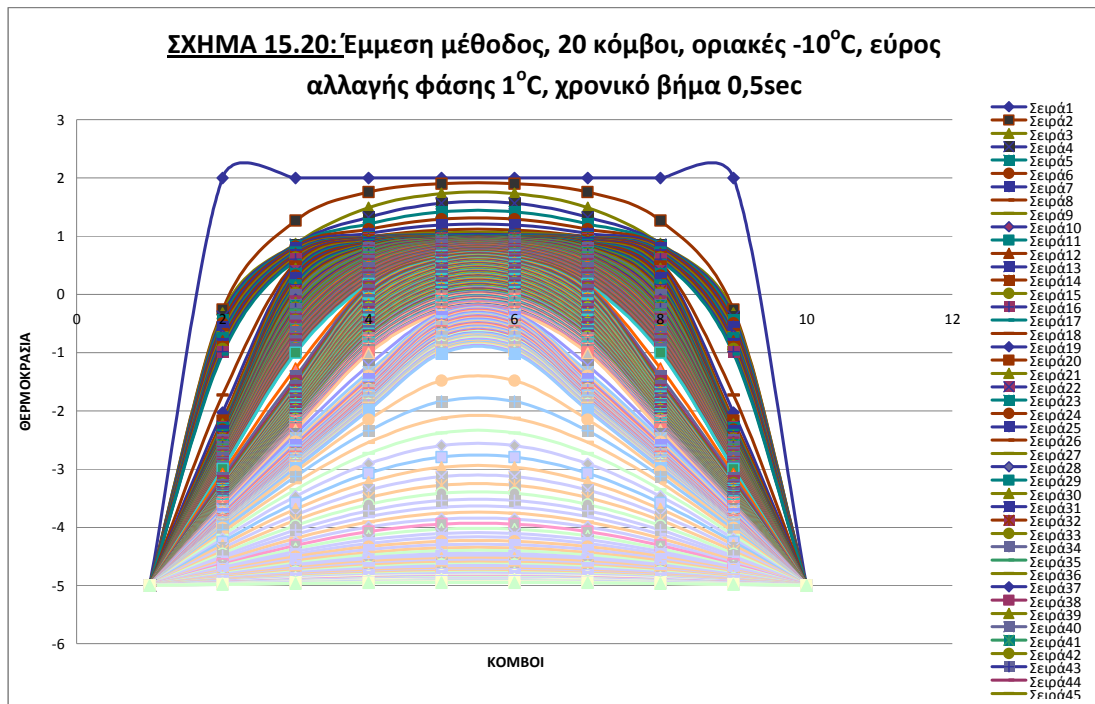
**ΣΧΗΜΑ 15.17:** Μέθοδος τριών βημάτων, 20 κόμβοι, οριακές  $-5^{\circ}\text{C}$ , εύρος αλλαγής φάσης  $1^{\circ}\text{C}$ , χρονικό βήμα 2sec

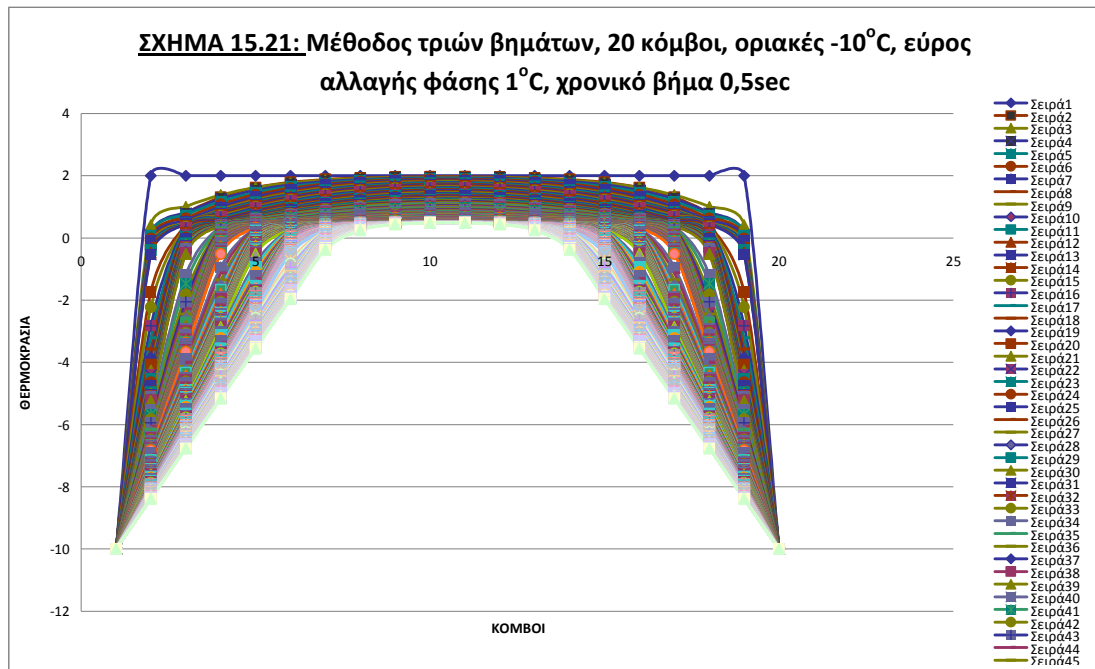














## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

1. Goulding. J.R, Energy Conscious Design, Commission of the European Communities, Architectural Press, 1992.
2. [http://www.cres.gr/kape/index\\_gr.htm](http://www.cres.gr/kape/index_gr.htm)
3. Weider, S., An Introduction To Solar Energy For Scientists and Engineers. 1982, New York: John Wiley & Sons.
4. <http://freespace.virgin.net/m.eckert/index.htm>
5. Incropera F.P., DeWitt D.P., Introduction to Heat Transfer, John Wiley and Sons Publishing Co., New York, 1990
6. [http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_of\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_of_fusion)
7. <http://www.fskab.com/annex10/workshops/html>
8. <http://www.fskab.com/annex17/workshops/html>
9. Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I. 1983, Florida: CRC Press, Inc.
10. Tomlinson.J, New Materials for Thermal Storage, Oak Ridge National Laboratory, No.4, Tennessee, USA, 1989
11. Lane G.A., Solar Heat Storage, Latent Heat Materials, Vol. II, CRC Press, USA, 1983
12. Ghoneim.A.A. & Klein.S.A, Phase Change Materials Analysis, Solar Energy, Vol.47, No.3., 1991
13. <http://en.wikipedia.org/wiki/Paraffin>
14. <http://en.wikipedia.org/wiki/Alkane>
15. [http://en.wikipedia.org/wiki/Fatty\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Fatty_acid)
16. [http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium\\_sulfate](http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_sulfate)
17. Lane.G.A, Phase Change Materials for Energy Storage Nucleation to Prevent Supercooling, Solar Energy Materials and Solar Cells, 27, 1991
18. Zhang X.X., Fan Y.F., Tao X.M., Yick K.L., Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes, Journal of colloid and interface Science, 281, 2005
19. Liu Z., Chung D.D.L., Calorimetric evaluation of phase change materials for use as thermal interface materials, Thermochimica Acta, 366, 2001
20. [http://en.wikipedia.org/wiki/differential\\_scanning\\_calorimetry](http://en.wikipedia.org/wiki/differential_scanning_calorimetry)



21. Zhang Y., Jiang Y., A simple method, the t-history method of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase change materials, Measurement and Science Technology, 10, 1999
22. Hong H. Park C.H., Choi J.H. Peck J.H., Improvement of the t-history method to measure heat of fusion for phase change material, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 11, 2003
23. [www.climator.com](http://www.climator.com)
24. <http://www.pcmenergy.com/products/enapsulations.htm>
25. [http://en.wikipedia.org/wiki/Phase\\_change\\_material#Technology](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_change_material#Technology)
26. [http://en.wikipedia.org/wiki/Phase\\_change\\_material#Micro-Encapsulated\\_Phase\\_Change\\_Materials](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_change_material#Micro-Encapsulated_Phase_Change_Materials)
27. Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I, RC Press Inc., Florida, USA, 1983
28. <http://freespace.virgin.net/m.eckert/index.htm>
29. <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/1997/TM-107506.pdf>
30. <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/1997/TM-107487.pdf>
31. Farid M.M., Khudhair M.A., Razack S.A.K., Al-Hallaj S., A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy Conversion and Management 45, 2004
32. <http://www.pcm-solutions.com/consulting.html>
33. M. Huang, P. Eames, Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaic, Int. J. Solar Energy
34. [http://www.epia.org/documents/NL\\_0604\\_018.pdf](http://www.epia.org/documents/NL_0604_018.pdf)
35. B. Zalba. J. Martin, Free-cooling of buildings with phase change materials, International journal of refrigeration, Vol 27
36. L. Shiley, Z. Neng, Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, Energy and Buildings, Vol 38
37. Y. Rabin, B.Niv, Integrated Solar Collector storage system based on PCM, Solar Energy, Vol 55
38. S. Canbazoglu, A. Sahinaslan, Enhancement of solar thermal using pcm of solar water system
39. <http://www.eren.doe.gov/solarbuildings/techdescr.html>
40. F. Tan, C. Tso, Cooling of mobile electronic devices using pcm, Applied thermal engineering, Vol 24



41. <http://www.mjm-engineering.com/telecomconsulting.html>
42. <http://www.heatmanagement.com/kunze/00english/products/frameset.html>
43. <http://www.climator.com>
44. <http://www.pcmenergy.com/products/telecom.htm>
45. [http://en.wikipedia.org/wiki/Base\\_Station\\_Subsystem](http://en.wikipedia.org/wiki/Base_Station_Subsystem)
46. L. Vasiliev, V. Burak, latent storage modules for preheating internal combustion petrol engines, Applied Engineering, Vol 20
47. <http://www.teappcm.com/applications.htm>
48. <http://www.bmw.com>
49. <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/techbr.pdf>
50. P. Espeau, D. Mondieig, 'Active Package' for thermal protection of food products, Packing Technology and Science, Vol 10.
51. <http://www.polyfoam.com/content.cfm/utek>
52. [http://www.polyfoam.com/content.cfm/cheststylecontains\\_food](http://www.polyfoam.com/content.cfm/cheststylecontains_food)
53. [http://www.polyfoam.com/content.cfm/polar\\_pack\\_rigid\\_bottles](http://www.polyfoam.com/content.cfm/polar_pack_rigid_bottles)
54. <http://www.outlast.com/index.php?id=184&L=0>
55. <http://www.outlast.com/index.php?id=118&L=0>
56. <http://www.outlast.com/index.php?id=119&L=0>
57. D. Mondieig, F. Rajabalee, Protection of temperature sensitive biomedical products using pcm, Transfusion and Aphaeresis science, Vol 28
58. <http://www.rubitherm.com/english/index.htm>
59. V. Tyagi, D. Buddhi, Thermal storage in Buildings, Energy and Buildings, Vol 42
60. V. Metivaud, L. Ventola, Thermal Insulation of Buildings using Phase Change Materials, Energy and Buildings, Vol 36
61. Balcomb, J.D. (editor), Passive Solar Buildings, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992
62. [http://www.zae.physik.tu-muenchen.de/zae/a1/englisch/arbeit/pcm/e\\_infoLatent.html](http://www.zae.physik.tu-muenchen.de/zae/a1/englisch/arbeit/pcm/e_infoLatent.html)
63. Ghonein, A.A, Building Walls Using Phase Change Materials, Solar Energy, Vol 47 No.3, 1991



64. Hawes, D.W., Feldman, D., Banu, D., "Latent Heat Storage in Building Materials," Energy and Building, Vol. 20, 1993
65. Hawes, D.W., Banu, D., Feldman, D., "Latent Heat Storage in Concrete," Solar Energy Materials, Vol. 19, 1989
66. Hawes, D.W., Banu, D., Feldman, D., "The stability of Phase Change Materials in Concrete," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 27, 1989
67. Feldman, D., Banu, D., Hawes, D.W., "Development and Application of Organic Phase Change Mixtures in Thermal Storage Gypsum Wallboard," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 36, 1995
68. Kedl, R.J, Stovall, T.K, Activities to support of the Wax- Impregnated Wallboard Concept, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA, 1989
69. Neeper, D.A., "Thermal Dynamics of Wallboard with Latent Heat Storage," Solar Energy, Vol. 68, No. 5, 2000.
70. K. Darkwa, P. Callaghan, Simulation of phase change drywalls in a passive solar building, Applied Thermal Engineering, Vol 26
71. Stetiu,C, Feustel, H.E, Simplified Numerical Description of Latent Storage Characteristics for Phase Change Wallboard, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 1995
72. Dr.J.J.Tomlinson , What are the benefits of including latent storage in common wallboard, Conf.920801/7, Oak Ridge National Laboratory, Florida, U.S.A, 1992
73. K. Lin, Y. Zhang, Experimental study of under-floor electric heating system, with shape- stabilized PCM plates, Energy and Buildings, Vol 37
74. K. Nagano, S. Tadeka, study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building thermal storage, Energy and Buildings, Vol 38
75. <http://content.honeywell.com/uk/homes/underfloor.htm>
76. A.Abhat, University of Suttgart, Low temperature latent heat thermal energy storage ,Solar Energy Journal, Vol.30, No.4 ,1983
77. [http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_energy\\_storage](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_energy_storage)
78. <http://en.wikipedia.org/wiki/ice>
79. Optimization of Cool Thermal Storage and Distribution,Netherlands Agency for Energy and the Enviroment, Sittard – The Netherlands, 2002
80. Lane G.A, Low Temperature Heat Storage With Phase Change Materials, International Journal of Ambient Energy, Vol. 1, 1980



## ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

1. Αντωνόπουλος Κ.Α., Υπολογιστικές Μέθοδοι Φαινομένων Μεταφοράς, Μέρος Πρώτο, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005
2. Κακάτσιος Ξ.Κ., Μετάδοση Θερμότητας, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2002
3. Μπεργελές Γ., Υπολογιστική ρευστομηχανική, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1999
4. Pitts D.R., Sissom L.E., Heat Transfer, McGraw-Hill Publishing Co., Schaum's Outline Series in Engineering, 1977
5. Gebhart B., Heat Transfer, McGraw-Hill Publishing Co., 1971
6. Carnahan B., Luther H.A., Wilkes J.O., Applied Numerical Methods, Krieger Publishing Co., 1990
7. Hoffmann J.D., Numerical Methods for Engineers and Scientists, McGraw-Hill Publishing Co., 1993
8. Voller V.R., Cross M., Numerical methods in thermal problems, Pinebridge Press, Swansea, U.K., 1983
9. T.Mo. Shih, Numerical Heat Transfer, Hemisphere Publishing Co., 1984
10. Prapainop R., Meneeratana K., Simulation of ice formation by the finite volume method, Songlanakarin J. Sci.Technolo., 2004, Vol.26 No.1
11. Lees M., A linear three-level difference scheme for quasilinear parabolic equation, J.Math.Comput., 20, 1976
12. Comini G., Lewis R.W., A numerical solution of two dimensional problems involving heat and mass transfer, Int. J. Heat Mass Transfer, 19, 1976
13. Morgan K., Lewis R.W., Zienkiewicz O.C., An improved algorithm for heat conduction problems with phase change, Int. J. Num. Method. Engng, 12, 1978
14. Yalamanchili R.V.S., Chu S.C., Stability and oscillation characteristics of finite element, finite difference and weighted residuals for transient heat conduction, J. Heat Transfer, 85, 1973
15. Wood W.L., Lewis R.W., A comparison of time marching schemes for the transient heat conduction equation, Int. J. Num. Method. Engng, 9, 1975
16. Bonacina C., Comini G., On the solution of the nonlinear heat conduction equations by numerical methods, Int. J. Heat Mass Transfer, 16, 1973
17. Bonacina C., Comini G., Fasano A., Primicerio M., Numerical solution of phase change problems, Int. J. Heat Mass Transfer, 16, 1973
18. Pham Q.T., A fast, unconditionally stable finite difference scheme for heat conduction with phase change, Int. J. Heat Mass Transfer, 28, 1985



### ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΑΓΓΛΙΚΩΝ ΟΡΩΝ

Αγγλικός Όρος	Απόδοση στα Ελληνικά
abrupt	απότομος, ασυνεχής
abscissa	τετμημένη
abundant	άφθονος
accumulate	συσσωρεύομαι, αυξάνω
acetic acid	οξικό οξύ
adhere	συγκρατώ, προσκολλάμαι
adjacent	δίπλανός
adobe	πλίνθινος, πλιθιά
agglomerate	συσσωρεύομαι
ambient	περιβάλλον
ambiguity	ασάφεια
amplitude	εύρος, πλάτος
annular	δακτυλιοειδής
anticipate	προβλέπω
apparent	αισθητός (προφανής)
arbitrary	αυθαίρετος
bead	σταγόνα
bore	τρύπα, διατομή
brass	μπρούτζος
bronze	χαλκός
buffer	ρύθμιση, ρυθμιστικό διάλυμα
building envelope	κτιριακός φάκελος
bulk	μάζα, όγκος ακαθόριστου σχήματος, πλειονότητα
capillary	τριχοειδής
chelating	χηλώδης
clotting	σβόλιασμα, θρόμβωση(για αίμα)
clump	όγκος, σωρός, συστάδα
coarse	τραχύς ακατέργαστος, κατώτερης ποιότητας
coil	πηνίο, σερπαντίνα
condensation	συμπύκνωση
conduction	αγωγή
conform	εξομοιώνω
conformation	δομή, συμμόρφωση
congruent	αρμονικός, συκλίνων
conservative	διατηρητικός
constitute	συνιστώ, απαρτίζω, καθορίζω
contour	περίγραμμα
convection	συναγωγή
converge	συγκλίνω
conversion	μετατροπή
copper	χαλκός, μπρούτζος
correlate	συσχετίζω
cross section	διατομή, αλληλοεπικάλυψη
defect	ελάττωμα, ατέλεια
deplete	αδειάζω, αποσυμωρώ, κενώνω
detrimental	ζημιογόνος
deviation	απόκλιση, σφάλμα απόκλισης
diminish	ελαττώνω

discrepancy	ασυμφωνία, διαφορά
dissociate	διαχωρίζω
distribution	διανομή, κατανομή, ταξινόμηση
district	τμήμα, περιφέρεια
diurnal	ημερήσιος
divergent	αποκλίνων
domain	πεδίο, περιοχή
downstream	κατάντι
dry wall	σοβατεπί
employ	χρησιμοποιώ
epoxide	εποξειδίο
evaluate	αξιολογώ
explicit	άμεση μέθοδος, σαφής, ρητός
exploit	εκμεταλλεύομαι
feasible	δυνατός, πιθανός
fluctuation	διακύμανση
formic acid	μυρμηγκικό οξύ
fusion	τήξη
glacier	παγετώνας
gradient	κλίση, κύρτωση, παράγωγος
harvester	θεριστής
hydrate	υδροξειδίο, ένυδρη ουσία
immerse	βυθίζω, εμβαπτίζω
implicit	έμμεση μέθοδος, συγκεχυμένος
inbuilt	ενσωματώνω στην κατασκευή
incorporated	ενσωματωμένος
induction	επαγωγή
influx	εισροή
integration	ολοκλήρωση
internal	διάκενο, διάστημα, εσωτερικός
interpolation	παρεμβολή, διακοπή
iteration	επανάληψη
joist	ξυλοδοκός, δοκάρι οροφής ή πατώματος, πάτερο
lattice	πλέγμα, δίκτυο
magnitude	μέγεθος, σπουδαιότητα
masonry	τοιχοποιία (τούβλο)
marginal	περιφερειακός, περιθωριακός, παράπλευρος
mesh	πλέγμα, δίκτυο
miscible	ικανός προς ανάμιξη
moderate	μετριάζω, εξομαλύνω
modularity	συναρμολογισιμότητα
momentum	ορμή
negligible	ασήμαντος, αμελητέος
nomenclature	ονοματολογία, ονοματοθεσία
obsolete	παρωχημένος
obtain	επικρατώ, αποκτώ, ισχύω
oscillation	ταλάντωση
perishable	φθαρτός, ευαίσθητος
phenol	φαινόλη, φαινικό οξύ, καρβολικό οξύ
plaster	σοβάς
pliable	εύπλαστος, μαλακός



precipitation	πτώση, καθίζηση
probe	καθετήρας
quantify	προσδιορίζω ποσοτικά
quasi	ημί, σχεδόν
radiator	ψυγείο αυτοκινήτο
rancidity	αποφορά, δυσοσμία
reciprocal	αμφίδρομος
reconcile	εναρμονίζω, προσαρμόζω
recurrent	επαναλαμβανόμενος
reefer	φορηγό ή πλοίο ψυγείο
regime	καθεστώς
repose	εναποθέτω
residual stress	παραμένουσα τάση
rigidity	ακαμψία
rime	πάχνη
robust	ισχυρός
saturated	κορεσμένος
scrutinise	εξετάζω ενδελεχώς
segregate	διαχωρίζω
shelter	κουβούκλιο
significant	σημαντικός
sinter	συμπυκνώνω
slurry	λάσπη, διφασικό μίγμα πηχτό
smoothing	εξομάλυνση
sodium hydroxide	καυστικό νάτριο
sodium sulphate	θειικό νάτριο
specify	καθορίζω, προσδιορίζω
stratify	στρωματοποιώ, διαχωρίζω σε στρώσεις
subscript	υπογραμμισμένος, δείκτης
substantial	ουσιώδης
sulphate	θείο
tentatively	πειραματικά, δοκιμαστικά, αβέβαια
thaw	λιώνω
titrate	πραγματοποιώ ποσοτική ανάλυση
trancedental	υπερβατικός, ασαφής
transition	μετάβαση
translucent	ημι-διάφανος
transparent	διάφανος
trunkate	αποκόπτω
undergo	υφίσταμαι
uniform	ομοιόμορφος
upsteram	ανάντι
urea	ουρία (ουριο-φορμαλδεΐδη)
utility	εγκατάσταση
vernacular	καθομιλουμένη (γλώσσα)
vicinity	γειτνίαση, εγγύτητα
viscosity	ιξώδες
viscous	παχύρρευστος
volatile	ασταθής
wallboard	γυψοσανίδα
yield	παράγω

