

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
2	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ .....	7
2.1	Ενέργεια και περιβάλλον.....	7
2.2	Σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα.....	8
2.2.1	Το φαινόμενο του θερμοκηπίου(Παγκόσμια κλιματική αλλαγή).....	9
2.2.2	Καταστροφή του όζοντος.....	12
2.2.3	Όξινη βροχή.....	12
3	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	15
3.1	Γενικά.....	15
3.2	Μέθοδοι αποθήκευσης Ενέργειας.....	17
3.2.1	Μέθοδοι Αποθήκευσης Ενέργειας – Α' κατηγορία .....	17
3.2.1.1	Μηχανική αποθήκευση της ενέργειας.....	17
3.2.1.2	Χημική αποθήκευση της ενέργειας.....	19
3.2.1.3	Βιολογική αποθήκευση ενέργειας.....	26
3.2.1.4	Μαγνητική αποθήκευση ενέργειας .....	27
3.2.1.5	Θερμική αποθήκευση ενέργειας .....	27
3.2.2	Μέθοδοι Αποθήκευσης Ενέργειας – Β' κατηγορία .....	28
3.3	Χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.....	28
4	ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	30
4.1	Γενικά.....	30
4.2	Αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας .....	31
4.2.1	Στερεά υλικά.....	33
4.2.2	Υγρά υλικά .....	34
4.2.3	Άλλα υλικά .....	35
4.2.4	Υγρή θερμική αποθήκη .....	35
4.2.5	Υγρή αποθήκη ομοιόμορφης θερμοκρασίας .....	37
4.2.6	Υγρή αποθήκη διαστρωματομένης θερμοκρασίας.....	39
4.2.7	Θερμική κλίση στερεών.....	40
4.2.7.1	Ο όγκος και το σχήμα.....	43
4.2.7.2	Το μήκος.....	43
4.2.7.3	Η διατομή.....	44
4.2.7.4	Το υλικό πλήρωσης.....	44
4.2.7.5	Πτώση Πίεσης $\Delta P$ .....	46
4.2.7.6	Ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.....	47
4.2.7.7	Επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας .....	47
4.2.7.8	Συντελεστής ενεργού θερμικής αγωγιμότητας .....	47
4.2.8	Εκτίμηση των θερμικών απωλειών.....	51
4.2.9	Οι θερμικές αποθήκες στην πράξη.....	53
4.2.10	Μέτρα απόδοσης των συστημάτων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.....	54
4.2.11	Διεποχιακή αποθήκευση.....	56
4.2.11.1	Διεποχιακή αποθήκευση με υδάτινες υπόγειες αποθήκες για Θέρμανση.....	59

4.2.11.2	Διεποχιακή αποθήκευση με υδάτινες υπόγειες αποθήκες για ψύξη.....	59
4.2.11.3	Ηλιακή λίμνη.....	59
4.3	Αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας (PCM).....	64
4.3.1	Θερμοδυναμικά κριτήρια .....	69
4.3.2	Κινητικά κριτήρια .....	69
4.3.3	Χημικά κριτήρια .....	70
4.3.4	Τεχνικά κριτήρια.....	70
4.3.5	Οικονομικά κριτήρια.....	70
4.3.6	Θερμοφυσικές ιδιότητες.....	70
4.3.7	Συστήματα αποθήκευσης με Υλικά αλλαγής φάσης .....	73
4.3.7.1	Αποθήκευση σε δεξαμενές .....	74
4.3.7.2	Τοποθέτηση σε μακροκάψουλες.....	75
4.3.7.3	Τοποθέτηση σε μικροκάψουλες.....	76
4.3.7.4	Τοποθέτηση σε τοιχοποιία.....	76
4.3.8	Δυσκολίες κατά τη χρήση των PCM.....	78
5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ .....	79
5.1	Συστήματα PCM που κυκλοφορούν στο εμπόριο .....	79
5.2	Εφαρμογές στις μεταφορές .....	81
5.3	Εφαρμογές στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό .....	83
5.4	Εφαρμογές για το ανθρώπινο σώμα.....	84
5.5	Εφαρμογές για ιατρικούς σκοπούς .....	85
5.6	Δυνητικές Εφαρμογές των PCM στα κτίρια .....	86
5.7	Χρήση υλικών αλλαγής φάσης σε ηλιακή εφαρμογή .....	86
6	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	88
6.1	Μεταφορά θερμότητας με αγωγή .....	88
6.2	Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή .....	92
6.3	Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	95
7	ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ PCM.....	97
7.1	Μονοδιάστατο ημιάπειρο επίπεδο PCM.....	97
7.2	Μονοδιάστατο ημιάπειρο επίπεδο PCM με ρευστό για την μεταφορά θερμότητας.....	100
7.3	Κυλινδρική και σφαιρική γεωμετρία .....	101
7.4	Επίπεδο με πεπερασμένο πάχος.....	104
7.5	Θερμική ανάλυση δεξαμενής που περιέχει PCM σε μικροκάψουλες .....	105
7.6	Απόδοση κλειστών συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.....	110
8	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΛΑΝΘΑΝΟΝΤΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	113
8.1	Περιορισμοί στην αποθήκευση .....	113
8.2	Βασικές σχεδιαστικές επιλογές .....	114
8.3	Συστήματα αποθήκευσης με συναλλαγή θερμότητας στην επιφάνεια του μέσου αποθήκευσης.....	116
8.4	Βελτιωμένη θερμική επαφή μεταξύ μέσου αποθήκευσης και μέσου εναπόθεσης, καθόλου μόνωση.....	118
8.5	Συναλλαγή θερμότητας με επιφάνειες μέσα στο μέσο αποθήκευσης .....	119

9	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	122
9.1	Πειραματική διάταξη .....	122
9.1.1	Κυκλοφορητής .....	123
9.1.2	Βελονοειδής βάνα 1/4'' .....	124
9.1.3	Ηλεκτρικός Θερμοσίφωνας .....	124
9.1.4	Θερμοστοιχείο Τύπου T (Θερμοζεύγος) .....	125
9.2	Δοχεία PCM .....	126
9.3	Πίνακες εύρεσης διαγραμμάτων και μετρήσεων .....	128
9.4	Αποτελέσματα μετρήσεων .....	130
9.5	Διαγράμματα Μετρήσεων .....	144
9.5.1	Δοχείο 1 <sup>ο</sup> με PCM .....	144
9.5.2	Δοχείο 1 <sup>ο</sup> με Νερό .....	153
9.5.3	Δοχείο 2 <sup>ο</sup> με PCM .....	162
9.5.4	Δοχείο 2 <sup>ο</sup> με Νερό .....	171
9.5.5	Δοχείο 3 <sup>ο</sup> με PCM .....	180
9.6	Θεωρητική ανάλυση χρήσης δοχείου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με χρήση υλικού αλλαγής φάσης σε σχέση με δοχείο αποθήκευσης θερμού νερού ..	189
9.7	Συγκριτικά διαγράμματα πειράματος .....	195
9.7.1	Πίνακες εύρεσης συγκριτικών διαγραμμάτων .....	196
9.8	Συμπεράσματα συγκριτικών διαγραμμάτων Δοχείων PCM-Δοχείων Νερού .....	215
9.8.1	Συγκριτικά Διαγράμματα «T-t» .....	215
9.8.2	Διαγράμματα «Q-ΔT» και Διαγράμματα Αναλογιών «(Q <sub>pcm</sub> /Q <sub>water</sub> )- ΔT», «(Q <sub>water</sub> /Q <sub>pcm</sub> )-ΔT» .....	216
9.9	Σχέσεις ομοιότητας μεταξύ των τριών δοχείων αποθήκευσης θερμότητας με υλικό αλλαγής φάσης .....	217
9.9.1	Ομοιότητες Δοχείων .....	217
9.9.2	Εύρεση σχέσης ομοιότητας .....	221
9.9.3	Συμπεράσματα .....	238
9.10	Προτάσεις για Μελλοντική Μελέτη .....	238
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	241

# **1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η τεχνικές της αποθήκευσης ενέργειας τα τελευταία χρόνια έχουν φτάσει στο σημείο να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην μοντέρνα τεχνολογία. Συγκεκριμένα , η αποθήκευση ενέργειας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιτυχία οποιασδήποτε εγκατάστασης παραγωγής που προσπαθεί να καλύψει την ενεργειακή ζήτηση. Για παράδειγμα η ανάγκη αποθήκευσης στις εφαρμογές ηλιακής ενέργειας είναι επιτακτική , ειδικά όταν η διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας είναι στο κατώτατο σημείο , κυρίως τον χειμώνα.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να συνεισφέρουν τα μέγιστα ώστε να ικανοποιηθεί αποτελεσματικά η ανάγκη της κοινωνίας για πιο αποδοτικά και , φιλικότερα προς το περιβάλλον συστήματα παραγωγής ή διαχείρισης ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην θέρμανση και την ψύξη κτιρίων , στην αεροναυτική και σε πρακτικές εφαρμογές. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συχνά οδηγούν σε σημαντικά οφέλη όπως:

- Μειωμένο κόστος ενέργειας
- Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας
- Εσωτερικός αέρας καλύτερης ποιότητας
- Αυξημένη ευκαμψία λειτουργίας
- Μειωμένα αρχικά έξοδα
- Μειωμένα έξοδα συντήρησης
- Μειωμένος όγκος εξοπλισμού
- Αποδοτικότερη και πιο αποτελεσματική χρήση του εξοπλισμού
- Διατήρηση των φυσικών καυσίμων (διευκολύνοντας και κάνοντας πιο αποδοτική την χρήση της ενέργειας ή την αντικατάσταση των καυσίμων)
- Μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>) καθώς και αερίων που επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον (CFCs)

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έχουν τεράστιες προοπτικές ,να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα του εξοπλισμού μετατροπής ενέργειας καθώς και να διευκολύνουν την μεγάλης κλίμακας αντικατάσταση καυσίμων στην παγκόσμια οικονομία. Η αποθήκευση ενέργειας είναι πολύπλευρη και για να γίνει σωστά ή χρήση της πρέπει να υπάρχει κατανόηση των ενεργειακών αποθεμάτων. Γενικά χρειάζεται ένας συντονισμένος αριθμός κινήσεων σε πολλαπλούς τομείς του ενεργειακού συστήματος για να κατανοηθεί πλήρως η δυναμική των οφελών της αποθήκευσης ενέργειας. Τα κριτήρια απόδοσης για την αποθήκευση ενέργειας μπορούν να καθορίσουν σε ένα καινούργιο τεχνολογικά σύστημα όταν έχει χαρακτηριστικά που το κάνουν χρήσιμο και ελκυστικό και επομένως όταν αξίζει η περαιτέρω ανάπτυξη και έρευνα πάνω σε αυτό.

Η σημερινή βιομηχανία βασίζεται πάνω σε άφθονα και αξιόπιστα αποθέματα ενέργειας. Για να γίνουν χρήσιμες οι φυσικές μορφές ενέργειας πρέπει να μεταποιηθούν, συνήθως μέσω έκλυσης θερμότητας. Για παράδειγμα , ο ατμός , που χρησιμοποιείται ευρέως για θέρμανση σε βιομηχανικές επεξεργασίες , αποκτάται συνήθως μετατρέποντας την ενέργεια

των καυσίμων σε θερμότητα και μεταφέροντας την θερμότητα αυτή σε νερό. Ο ηλεκτρισμός, μία επικρατούσα μορφή ενέργειας, δημιουργείται κυρίως από ατμό ο οποίος οδηγείται διαμέσου μίας τουρμπίνας που με την σειρά της δίνει κίνηση σε μία γεννήτρια και όλο αυτό το σύστημα τροφοδοτείται συνήθως από ορυκτά καύσιμα ή πυρηνική ενέργεια(πυρηνικά καύσιμα).

Η ζήτηση ενέργειας δεν είναι σταθερή, είτε θερμική είτε ηλεκτρική. Επιπλέον κάποιες μορφές ενέργειας όπως η ηλιακή ή η αιολική δεν έχουν σταθερή παραγωγή. Σε εφαρμογές όπου είτε η προσφορά είτε η ζήτηση μεταβάλλονται αρκετά, για την αξιόπιστη διαθεσιμότητα της ενέργειας χρειάζονται πολύ ογκώδη συστήματα μετατροπής ενέργειας ώστε να καλύπτουν τις ώρες αιχμής. Το αποτέλεσμα είναι, υψηλού κόστους και μερικώς μη αποδοτικές επενδύσεις, αφού τα συστήματα είναι τεράστια και τις περισσότερες φορές λειτουργούν στο ελάχιστο φορτίο.

Εναλλακτικά, το κόστος των επενδύσεων μπορεί να μειωθεί αν εφαρμοστούν τεχνικές διαχείρισης του φορτίου ώστε να αμβλυνθεί η ζήτηση ισχύος ή να χρησιμοποιηθούν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ώστε να μικρύνουν σε όγκο τα συστήματα παραγωγής ενέργειας.

Τα μικρά συστήματα λειτουργούν στο μέγιστο φορτίο ή κοντά στο μέγιστο φορτίο τους ανεξάρτητα από την στιγμιαία αλλαγή της ζήτησης ισχύος, αποθηκεύοντας την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγουν κατά την χαμηλή ζήτηση και αποδεσμεύοντάς την κατά τις ώρες αιχμής. Αν και κάποιο ποσό ενέργειας χάνεται κατά την αποθήκευσή της, η αποθήκευση ενέργειας επιτρέπει την διατήρηση των καυσίμων κάνοντας χρήση των άφθονων και λιγότερο εύχρηστων καυσίμων όπως ο άνθρακας και το ουράνιο ή χρήση των εναλλακτικών μορφών ενέργειας(αιολική, ηλιακή, βιομάζα κλπ.) σε εφαρμογές που τώρα κάνουν χρήση των πιο σπάνιων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Τέλος σε κάποιες εφαρμογές η χρήση αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει την εκμετάλλευση των απωλειών θερμότητας σε δευτερεύοντες σκοπούς.

Η προοπτικές της αποθήκευσης ενέργειας δεν περιορίζονται μόνο στην βιομηχανία. Η αποθήκευση από την πλευρά της ενεργειακής κατανάλωσης, σε κατοικίες και εμπορικά κτίρια έχει αρχίσει να γίνεται επιτακτική ανάγκη και αποδεικνύεται πολύ σημαντική στην μείωση των φορτίων αιχμής που επιβάλλονται από τα συμβατικά ηλεκτρικά συστήματα.

Στον τομέα των μεταφορών που τώρα κυριαρχούν τα βενζινοκίνητα οχήματα, επαρκής συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρισμού μπορεί να ενθαρρύνουν την χρήση ενός μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών αυτοκινήτων μειώνοντας έτσι την ζήτηση στο πετρέλαιο, είδη σήμερα τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα έχουν κάνει την εμφάνισή τους, είτε κινούμενα εξολοκλήρου από ηλεκτρικούς κινητήρες είτε κινούμενα υποβοηθούμενα από ηλεκτρικούς κινητήρες.

Η σκέψη της αποθήκευσης ενέργειας σε τροχούς δεν είναι καινούργια. Η ικανότητα των τροχών να μεταφέρουν ομαλά διακοπτόμενη ισχύς βρέθηκε λίγο μετά την ανακάλυψη των παλινδρομικών μηχανών τον 18<sup>ο</sup> αιώνα. Ειδικά αυτοκινούμενα οχήματα χρησιμοποιήθηκαν τροφοδοτούμενα από εξωτερικά

αποθηκευμένη ενέργεια που προσδίδεται από ατμό για πάνω από εκατό χρόνια. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι η συνέχεια αυτών των μηχανών.

Η καταγεγραμμένες αυξήσεις στις τιμές των καυσίμων τα τελευταία χρόνια , η ολοένα αυξανόμενη δυσκολία στην απόκτηση κεφαλαίου για την επέκταση των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας σε συνδυασμό με την πρόσφατη ανάπτυξη της τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας οδηγεί στην δημιουργία ενδιαφέροντος για τις προοπτικές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

Για τον πάροχο της ενέργειας , η ενέργεια είναι ένα αγαθό του οποίου η αξία προσδιορίζεται από το κόστος παραγωγής του και την ζήτηση της κοινωνίας. Για τον καταναλωτή της ενέργειας , η αξία της εξαρτάται από την συνεισφορά της στην παραγωγή προϊόντων και υπηρεσιών ή από τον βαθμό της άνεσης και ανακούφισης που προσφέρει. Αν και οι συζητήσεις περί των οφελών της παραγωγής ενέργειας με εναλλακτικά μέσα για τα διάφορα έθνη αφθονούν είναι πιθανόν ότι οι ενεργειακές αποφάσεις θα παίρνονται με κριτήριο το κόστος του εναλλακτικού τρόπου για την επίτευξη των εκάστοτε αναγκών.

Πιο συγκεκριμένα , αποφάσεις για το αν θα γίνει χρήση ή όχι συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας θα γίνονται με κριτήριο το αναμενόμενο πλεόνασμα στην παραγωγή ή την χρήση ενέργειας εκτός και αν επιβληθούν νομικά ή ρυθμιστικά μέτρα. Συμπερασματικά, ανάμεσα στα κριτήρια για την εμπορικοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μείζονος σημασίας είναι η προοπτική της οικονομικής βιωσιμότητάς τους.

## **2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ**

Η παροχή ενέργειας και η χρήση της συνδυάζεται όχι μόνο με προβλήματα όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη , αλλά και με περιβαλλοντικά προβλήματα όπως

- Η μόλυνση του αέρα
- Η καταστροφή του όζοντος
- Η αποψίλωση των δασών
- Η εκπομπές ραδιενεργών ουσιών

Τα σοβαρά αυτά περιβαλλοντικά προβλήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη αν η ανθρωπότητα θέλει να αναπτυχθεί στο μέλλον και να διατηρεί ταυτόχρονα ένα καθαρό περιβάλλον. Αν οι άνθρωποι και οι κοινωνίες συνεχίσουν να υποβαθμίζουν το περιβάλλον το μέλλον προβλέπεται δυσοίωνο.

Η ενέργεια, το περιβάλλον και η συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας συνδέονται μεταξύ τους. Μία κοινωνία για να διατηρήσει την ανάπτυξή της πρέπει να χρησιμοποιεί ενέργεια που δεν έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον (παρ. καθόλου εκπομπές ή εκπομπές που δεν επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον ). Παρολαυτά αφού όλες οι ενεργειακές πηγές οδηγούν σε κάποιες επιπτώσεις για το περιβάλλον, είναι εύλογο να υποθέτουμε ότι κάποια από τα προβλήματα (όχι όλα) που παρουσιάζονται μπορούν να ξεπεραστούν αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσης της παραγωγής ενέργειας. Ένας ισχυρός δεσμός υπάρχει μεταξύ του βαθμού απόδοσης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αφού , για τις ίδιες υπηρεσίες ή προϊόντα , γίνεται χρήση λιγότερων ενεργειακών πόρων και επομένως έχουμε λιγότερες εκπομπές.

Η θερμική αποθήκευση ενέργειας μπορεί να συμβάλει δραματικά στην εκπλήρωση των αναγκών της κοινωνίας για πιο αποδοτική και καθαρότερη ενέργεια.

### **2.1 Ενέργεια και περιβάλλον**

Για να βρούμε λύση στα περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζουμε σήμερα χρειάζονται πράξεις και μακροχρόνιος σχεδιασμός. Η ανανεώσιμες πηγές ενέργειας φαίνεται να παρουσιάζουν μία από τις πιο πλεονεκτικές λύσεις. Για τον λόγο αυτό γίνεται εμφανής η σχέση μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διαρκούς ανάπτυξης.

Η ενέργεια είναι με πολλούς τρόπους το «καύσιμο» της οικονομίας . Χωρίς τις ενεργειακές πηγές , οι κοινωνίες μας δεν θα μπορούσαν να λειτουργήσουν και θα κατέρρεαν. Η επίδραση που έχει η διακοπή ρεύματος σε μία πόλη μόνο για ένα εικοσιτετράωρο δείχνει πόσο πολύ είμαστε εξαρτημένοι από την ενέργεια. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές οι ανελκυστήρες παύουν να λειτουργούν , τα νοσοκομεία προσφέρουν μόνο την βασική φροντίδα και τα φώτα σβήνουν.

Ο μέσος όρος αύξησης του πληθυσμού ανά τον κόσμο είναι 2% . Καθώς ο πληθυσμός αυξάνεται η ανάγκη για όλο και περισσότερη ενέργεια είναι αναπόφευκτη. Ακόμη και η άνοδος του βιοτικού επιπέδου συμβαδίζει με την ανάγκη για περισσότερη ενέργεια. Σήμερα υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά

ανάμεσα στους πληθυσμούς των χωρών όσον αφορά τον πλούτο και την χρήση ενέργειας. Οι πλούσιες βιομηχανοποιημένες χώρες που εκπροσωπούν το 25% του παγκόσμιου πληθυσμού , καταναλώνουν περίπου το 75% της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας.

Ο πληθυσμός της γης αναμένεται να διπλασιαστεί στα μέσα του 21<sup>ου</sup> αιώνα και η οικονομική ανάπτυξη σίγουρα θα συνεχίσει να μεγαλώνει. Η παγκόσμια ζήτηση για ενεργειακές υπηρεσίες αναμένεται να αυξηθεί κατά μία τάξη μεγέθους μέχρι το 2050 , ενώ η ενεργειακή ζήτηση αναμένεται να αυξηθεί 1,5-3 φορές. Ταυτόχρονα ο προβληματισμός για τις επιπτώσεις της ενέργειας στο περιβάλλον θα συνεχίσει να αυξάνεται εξαιτίας των παγκόσμιων κλιματολογικών αλλαγών.

Ο περιβαλλοντικός προβληματισμός έχει κατακλίσει την κοινωνία και τις βιομηχανίες τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Μια προτεινόμενη λύση στο πρόβλημα της έλλειψης των ενεργειακών αποθεμάτων είναι η χρήση τεχνολογιών θερμικής αποθήκευσης ενέργειας. Για να καρπωθούν τα οφέλη οι μηχανικοί πρέπει να λάβουν υπόψη την αξιοπιστία , την πρακτικότητα καθώς και το κόστος αυτών των συστημάτων ξεχωριστά για κάθε εφαρμογή.<sup>[3]</sup>

## **2.2 Σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα**

Κατά την διάρκεια των προηγούμενων δεκαετιών οι κίνδυνοι και η πραγματικότητα της περιβαλλοντικής υποβάθμισης έγιναν πιο φανεροί. Η επίδραση στο περιβάλλον εξαιτίας των ανθρώπινων δραστηριοτήτων ήταν και είναι μεγάλη. Αυτό οφείλεται στον συνδυασμό πολλών παραγόντων όπως η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού , η κατανάλωση ενέργειας , η βιομηχανική δραστηριότητα κλπ. Κατά την δεκαετία του '70 οι περισσότερες περιβαλλοντικές έρευνες και τα μετρητικά τους όργανα εστίαζαν στους συμβατικούς ρυπαντές όπως το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) , τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Σήμερα το περιβαλλοντικό ενδιαφέρον εξαπλώθηκε στον έλεγχο σε ρυπαντές όπως οι τοξικές χημικές ουσίες που είναι βλαβερές ακόμη και σε πολύ μικρές ποσότητες καθώς και στα αέρια του θερμοκηπίου όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Παρόλη την ανάπτυξη της τεχνολογίας , η εξάπλωση της βιομηχανίας και των κτιριακών εγκαταστάσεων έχουν οδηγήσει σε καινούργια περιβαλλοντικά προβλήματα.

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα αποτελούνται από ένα ολόένα και αυξανόμενο αριθμό ρυπαντών και καταστροφών . Τα σοβαρότερα από αυτά είναι:

- Όξινη βροχή
- Καταστροφή του όζοντος
- Παγκόσμια κλιματική αλλαγή (φαινόμενο του θερμοκηπίου)
- Επικίνδυνοι ρυπαντές του ατμοσφαιρικού αέρα
- Κακή ποιότητα του περιβάλλοντα αέρα
- Μόλυνση του νερού και της θαλάσσιας ζωής
- Προβλήματα στην καλλιεργήσιμη γη
- Καθιζήσεις εδάφους
- Ραδιενέργεια και ακτινοβολία



- Απαλλαγή των στερεών αποβλήτων

Τα ευρύτερα γνωστά και σημαντικότερα από τα παραπάνω είναι η παγκόσμια κλιματική αλλαγή, η όξινη βροχή και η καταστροφή του όζοντος.<sup>[3]</sup>

### 2.2.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου(Παγκόσμια κλιματική αλλαγή)

Αν και ο όρος φαινόμενο του θερμοκηπίου χρησιμοποιούταν στο παρελθόν για να αναφερθούμε στον ρόλο της ατμόσφαιρας στην διατήρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης σήμερα συνδέεται με την συμβολή του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) στην αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας.

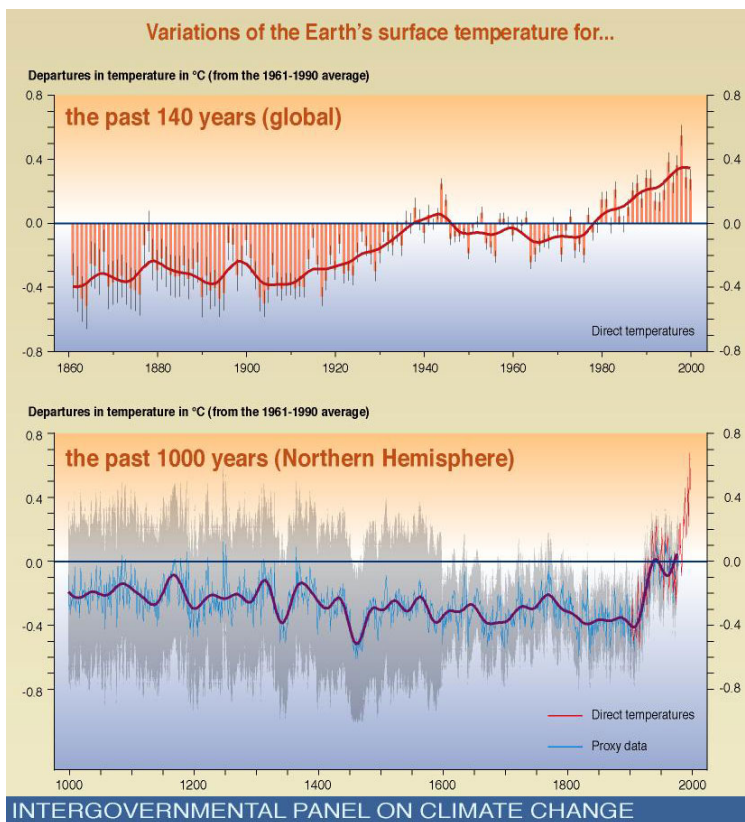
Σήμερα υπολογίζεται ότι η εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι υπεύθυνες περίπου για το 50% του ανθρωπογενούς φαινομένου του θερμοκηπίου. Άλλα αέρια που παράγονται από τις βιομηχανίες όπως το μεθάνιο, οι χλωροφθοράνθρακες, το διοξείδιο του αζώτου, το όζον, τα νιτρικά οξέα συμβάλλουν και αυτά στην έξαρση του φαινομένου του θερμοκηπίου που οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας της γης. Το διοξείδιο του άνθρακα και αυτά τα αέρια ονομάζονται αέρια του θερμοκηπίου.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι το πιο μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα που σχετίζεται με την χρήση και την παραγωγή ενέργειας. Συνδέεται με την συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, που παγιδεύουν την θερμότητα που ακτινοβολεί η επιφάνεια της γης ως εκ τούτου αυξάνεται η θερμοκρασία της επιφάνειας. Τον τελευταίο αιώνα η θερμοκρασία της γης έχει αυξηθεί κατά  $0.6\text{ }^\circ\text{C}$  με αποτέλεσμα η στάθμη της θάλασσας να έχει ανέβει 20 cm. Τέτοιου είδους αλλαγές μπορεί να έχουν τεράστιες επιπτώσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες ανά τον κόσμο.

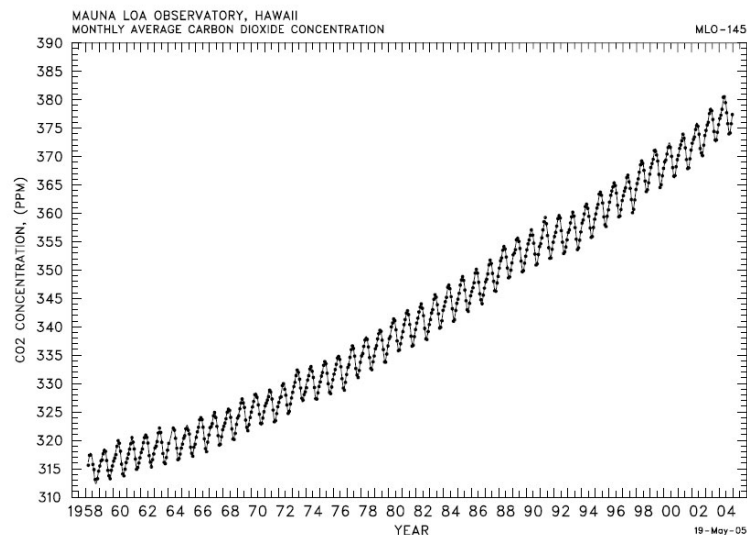
Η ανθρωπότητα με πολλούς τρόπους συμβάλει σημαντικά στην επιδείνωση του φαινομένου αυτού. Για παράδειγμα το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων, το μεθάνιο που απελευθερώνεται από την αυξημένη ανθρώπινη δραστηριότητα, οι χλωροφθοράνθρακες και η αποψίλωση των δασών, όλα συμβάλλουν στην επιδείνωση του φαινομένου. Πολλοί επιστήμονες υποστηρίζουν ότι αν συνεχίσει να αυξάνεται η συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα των αερίων του θερμοκηπίου η θερμοκρασία της γης μπορεί να αυξηθεί μέχρι και  $2\text{ }^\circ\text{C}$  μέσα στα επόμενα 50 χρόνια σύμφωνα με τις πιο αισιόδοξες έρευνες. Αν αυτό συμβεί η στάθμη της θάλασσας θα ανέβει τόσο ώστε πολλές σημερινές περιοχές όπως τα νησιά Φίτζι θα εξαφανιστούν και θα είναι πια υποθαλάσσια, πολλές γεωργικές περιοχές θα εκτοπιστούν σε μεγαλύτερα υψόμετρα και η πρόσβαση σε πόσιμο νερό θα γίνει πολύ δύσκολη για ένα μεγάλο μέρος του πληθυσμού. Τέτοιες συνέπειες μπορεί να απειλήσουν την επιβίωση ολόκληρων λαών.

Συζητήσεις γίνονται για να αποτραπεί η παγκόσμια κλιματική αλλαγή με βάση την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Από την πλευρά μίας αναπτυσσόμενης χώρας το κόστος και τα οφέλη ενός τέτοιου μέτρου οδηγούν στην ανάγκη δημιουργίας πολιτικών για γρήγορη οικονομική ανάπτυξη. Για να φθάσουμε σε μία ισορροπία μεταξύ ανάπτυξης της οικονομίας και μείωσης των εκπομπών πρέπει να εφαρμοστούν πολιτικές που στοχεύουν στην πιο αποδοτική χρήση της ενέργειας και στην διευκόλυνση της αντικατάστασης των καυσίμων , τέλος θα πρέπει να εφαρμοστούν διεθνείς τακτικές για την πιο εύκολη πρόσβαση σε νέες και ανεπτυγμένες τεχνολογίες και πόρους.

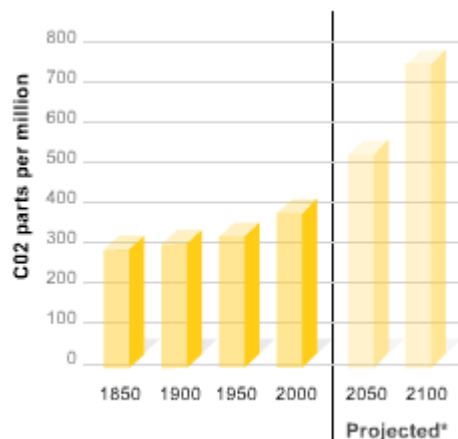
Διαφωνίες και συζητήσεις για το μέγεθος της αλλαγής που θα επιφέρει το φαινόμενο του θερμοκηπίου υπάρχουν για πολύ καιρό τώρα. Κάποιοι πιστεύουν ότι η γη είναι καταδικασμένη σε μία θερμοκρασιακή αύξηση , ενώ κάποιοι άλλοι πως μπορούμε να συνεχίσουμε να μολύνουμε την ατμόσφαιρα χωρίς συνέπειες. Παρολαυτά , οι περισσότερες χώρες συμφωνούν ότι οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου είναι βλαβερές για το περιβάλλον και προσπαθούν να εφαρμόσουν κάποια μέτρα για την εξυγίανση των ενεργειακών μονάδων τους.<sup>[3]</sup>



Σχήμα 1: Μεταβολές στην θερμοκρασία της Γης τα τελευταία 140 χρόνια και τα τελευταία 1000 χρόνια

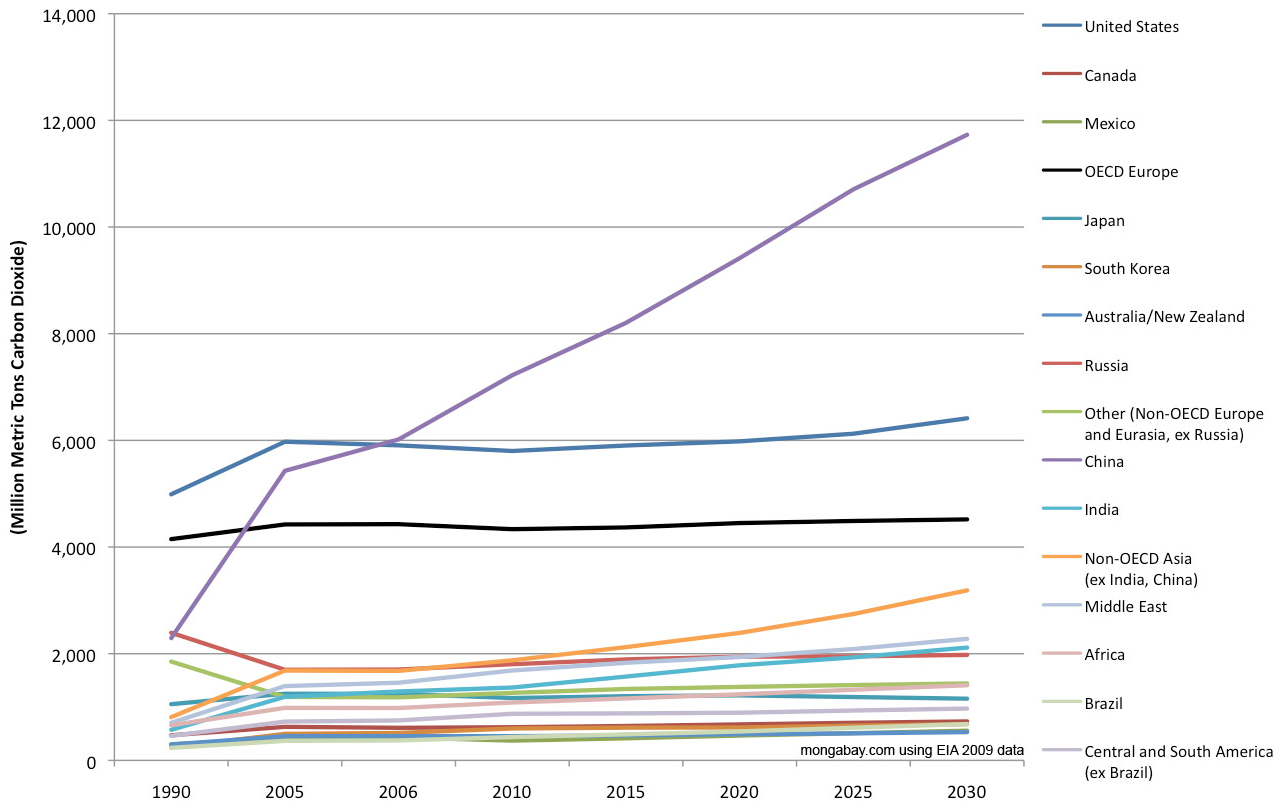


Σχήμα 2: Συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα σε ppm (parts per million) από το 1958 ως 2004



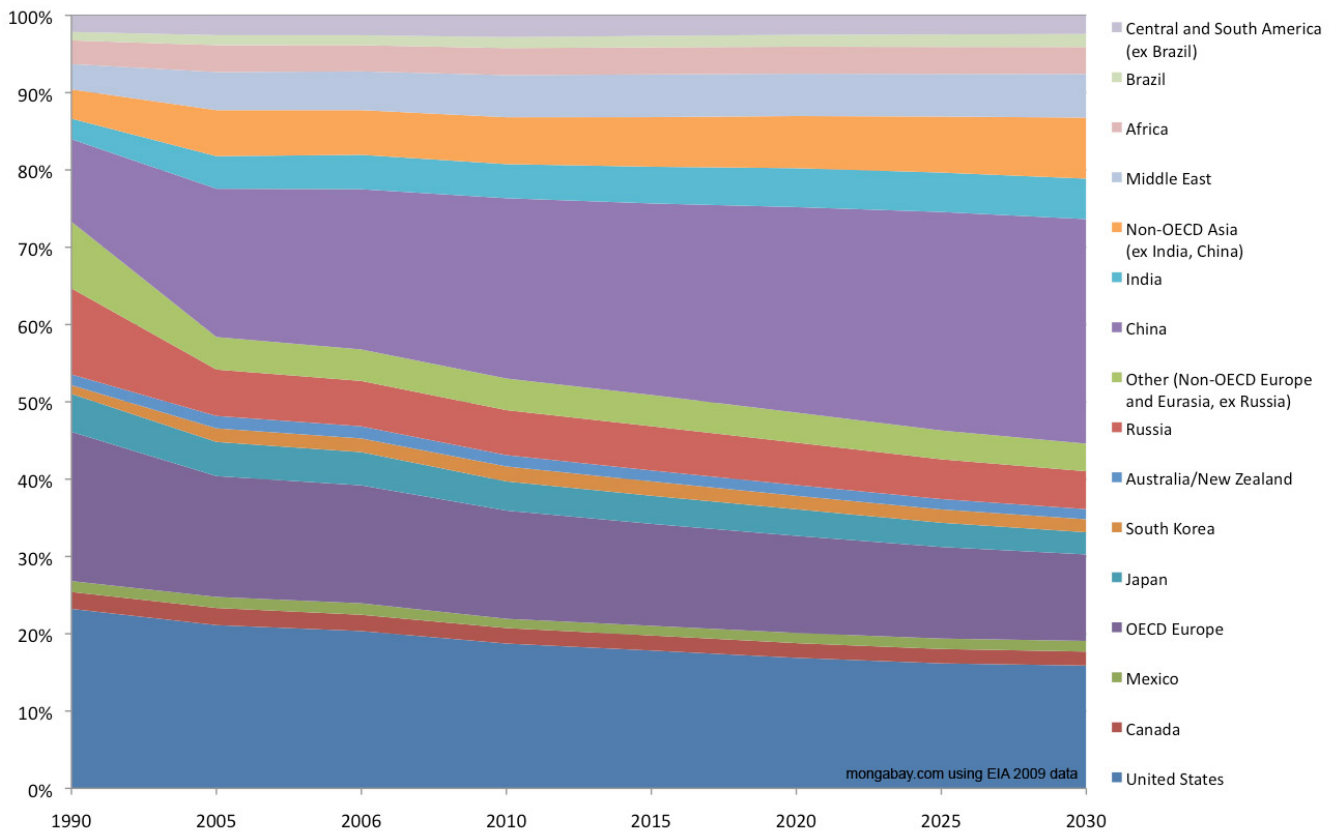
Σχήμα 3: Συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> από το 1850 ως 2000 με προβλέψεις ως το 2100

### World Carbon Dioxide Emissions by Region, Reference Case, 1990-2030



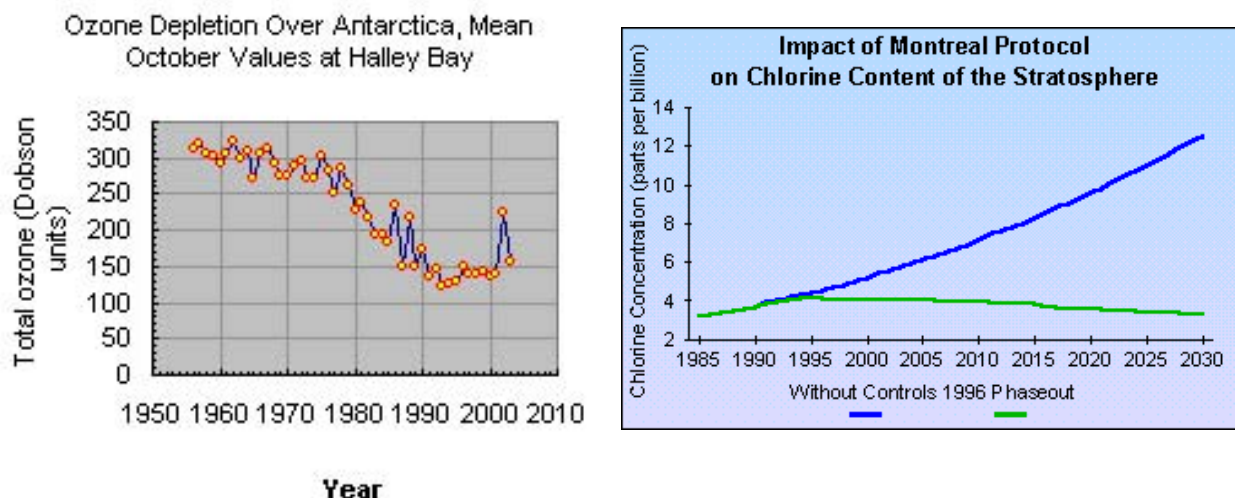
Σχήμα 4: Παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) σε εκατομμύρια μετρικούς τόνους ανά περιοχή-κράτος, με πρόβλεψη ως το 2030

### Share of World Carbon Dioxide Emissions by Region, Reference Case, 1990-2030



Σχήμα 5: Μερίδιο εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα(CO<sub>2</sub>) ανά περιοχή-κράτος με πρόβλεψη ως το 2030

## 2.2.2 Καταστροφή του όζοντος



Σχήμα 6,7: Μείωση του στρώματος του όζοντος στην Ανταρκτική σε μονάδες Dobson από το 1950 ως το 2004, Επίδραση του πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ στην συγκέντρωση χλωριούχων στοιχείων στην ατμόσφαιρα με πρόβλεψη ως το 2030

Είναι γνωστό ότι το όζον που βρίσκεται στην στρατόσφαιρα, στα ύψη μεταξύ 12 και 25 χιλιομέτρων, έχει τον ρόλο μίας «ομπρέλας» προστασίας για την γη, απορροφώντας την υπεριώδη ακτινοβολία (ultraviolet UV) μήκους κύματος 240-320 nm καθώς και την υπέρυθη ακτινοβολία. Ένα παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα είναι η τοπική ελάττωση του στρώματος του όζοντος που βρίσκεται στην στρατόσφαιρα που δημιουργείται από την εκπομπή των χλωροφθορανθράκων (CFCs) και των οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ). Η συρρίκνωση ή η καταστροφή αυτού του στρώματος επιτρέπει στην βλαβερή υπεριώδη ακτινοβολία να φτάσει στο επιφάνεια της γης, αυξάνοντας τις καρκινογόνες παθήσεις του δέρματος, προκαλώντας ζημία στην όραση μας καθώς και βλάβες στους μικρότερους ζωντανούς οργανισμούς.

Εδώ και αρκετά χρόνια γίνονται επιστημονικές συζητήσεις και υπάρχουν διαμάχες για την καταστροφή του όζοντος. Το 1987 υπογράφηκε το πρώτο διεθνές πρωτόκολλο στο Μόντρεαλ του Καναδά για την μείωση της παραγωγής των χλωροφθορανθράκων (CFCs).<sup>[3]</sup>

## 2.2.3 Οξίνη βροχή

Η όξινη βροχή είναι η συνέπεια της παραγωγής ρυπαντών από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η παραγωγή των ρυπαντών γίνεται σε σταθερές μονάδες όπως χυτήρια για μη σιδηρούχα ορυκτά καθώς και σε βιομηχανικούς καυστήρες και σε μεταφορικά οχήματα. Οι ουσίες αυτές μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις διαμέσου της ατμόσφαιρας όπου και αντιδρούν με αυτή σχηματίζοντας οξέα τα οποία καταλήγουν στο έδαφος από την βροχή (όξινη). Τα οξέα αυτά εναποθέτονται στα διάφορα οικοσυστήματα τα οποία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε υψηλές οξύτητες. Η όξινη βροχή αποδίδεται κυρίως στις εκπομπές διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και διοξειδίων του

αζώτου( $\text{NO}_x$ ). Τα αέρια αυτά αντιδρούν στην ατμόσφαιρα με τα μόρια του νερού και του οξυγόνου και δημιουργούν θειικό και νιτρικό οξύ.

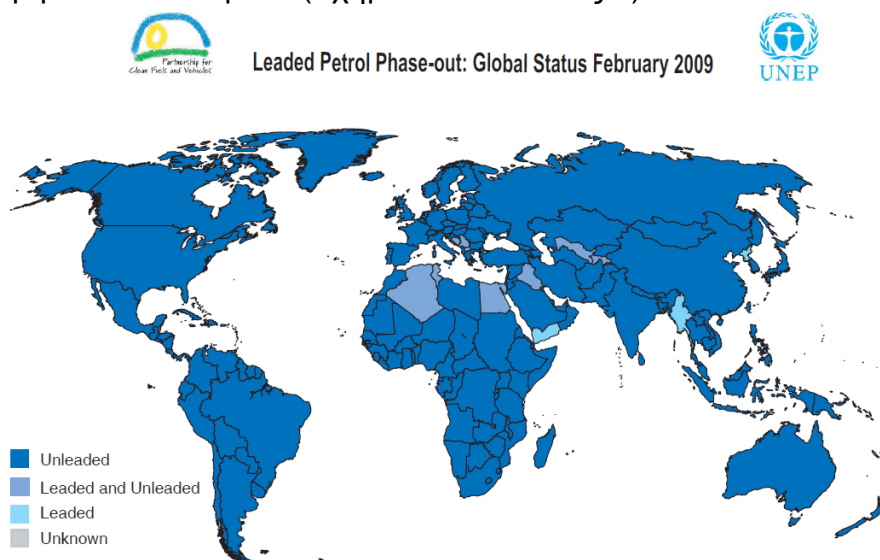
Στο παρελθόν αυτοί οι ρυπαντές δημιουργούσαν προβλήματα μόνο κατά τόπους. Σήμερα γνωρίζοντας την συμβολή τους στη δημιουργία όξινης βροχής έχουμε εστιάσει την προσοχή μας σε αυτά ελέγχοντας τις εκπομπές τους καθώς και τις εκπομπές άλλων ρυπαντών με βάση το χλώριο ή το όζον.

Τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα που μπορεί να προκαλέσει η όξινη βροχή είναι τα εξής:

- Αύξηση της οξύτητας σε λίμνες ,ποτάμια, ρυάκια και υπόγεια νερά
- Καταστροφές σε δάση , σε αγροτικές καλλιέργειες και σε φυτά λόγω της τοξικότητας από την μεγάλη συγκέντρωση οξέων.
- Καταστροφές στα ψάρια και γενικότερα στην θαλάσσια ζωή
- Διάβρωση των υλικών των κτιρίων ,των μεταλλικών κατασκευών , των αρχαιοτήτων και των μνημείων
- Μεταβολές στις φυσικές και οπτικές ιδιότητες των νεφών εξαιτίας της επίδρασης των στερεών αλάτων που δημιουργούνται από τις αντιδράσεις στα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Μερικές ενεργειακές δραστηριότητες είναι υπαίτιες για την δημιουργία όξινης βροχής όπως για παράδειγμα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.<sup>[3]</sup>

Την 1<sup>η</sup> Δεκεμβρίου του 1999 υπογράφηκε μία διεθνής συμφωνία από 27 χώρες για την μείωση της μόλυνσης του αέρα. Η συνθήκη αυτή ήταν η πρώτη διεθνής ενέργεια για την ταυτόχρονη μείωση διάφορων ρυπαντών που δημιουργούν προβλήματα όπως όξινη βροχή και νέφος. Ο στόχος ήταν η μείωση των οξειδίων του θείου και του αζώτου ( $\text{SO}_x, \text{NO}_x$ ) , των ασταθών οργανικών ενώσεων και της αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ). Η συνθήκη αυτή μαζί με τις συμφωνίες για την χρήση φιλικότερων προς το περιβάλλον καυσίμων που έχουν οδηγήσει σχεδόν όλες τις χώρες να κάνουν χρήση αμόλυβδης βενζίνης έχουν φέρει αποτελέσματα (Σχήμα 8 και Πίνακας 1).



**Σχήμα 8: Χρήση Αμόλυβδης βενζίνης ανά τον κόσμο (Περιβαλλοντικό πρόγραμμα Ηνωμένων Εθνών)**

**Πίνακας 1: Κιλοτόνοι ενώσεων υπαίτιων για την όξινη βροχή και την καταστροφή του όζοντος (Υπηρεσία περιβαλλοντικής προστασίας , Environmental Protection Agency)**

	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>
Διοξείδιο του Θείου (SO <sub>2</sub> )	182.8	137.2	129.6	99.9	77.9	72.1	70.9	59.9
Οξειδία του Αζώτου(NO <sub>x</sub> )	126.6	139.1	140.7	131.1	126.2	125.7	127.3	122.4
Αμμωνία (NH <sub>3</sub> )	109.6	121.3	115.4	113.0	111.7	110.6	110.3	109.8
Ασταθής οργανικές ενώσεις (VolatileOrganic Compounds,VOC)	108.5	81.2	78.0	71.2	67.2	63.2	61.8	60.6
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	406.9	246.7	236.6	218.2	206.5	196.8	187.2	178.4
<b>Total</b>	<b>934.5</b>	<b>725.4</b>	<b>700.3</b>	<b>633.1</b>	<b>589.5</b>	<b>568.5</b>	<b>557.4</b>	<b>531.2</b>

### 3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ<sup>[12],[13],[14]</sup>

#### 3.1 Γενικά

Σε κάθε ενεργειακό σύστημα, δηλαδή σε κάθε σύστημα που παράγει μια μορφή ενέργειας, το μεγαλύτερο πρόβλημα που καλούμαστε ως μηχανικοί να αντιμετωπίσουμε, είναι η διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας σύμφωνα με το απαιτούμενο φορτίο, ώστε να μην καθίσταται ενεργειακά ασύμφορο το σύστημά μας.

Στα διάφορα ενεργειακά συστήματα είναι δυνατόν να παρατηρηθούν τα εξής:

- Εποχιακή διακύμανση των ενεργειακών αναγκών
- Διακύμανση κατά την παραγωγή ενέργειας
- Διαφορά στην ποσότητα παραγόμενης και ζητούμενης ενέργειας

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτή η ανάγκη ύπαρξης ενός τρόπου ρύθμισης των παραπάνω ενεργειακών ασυμβατοτήτων του ενεργειακού συστήματος.

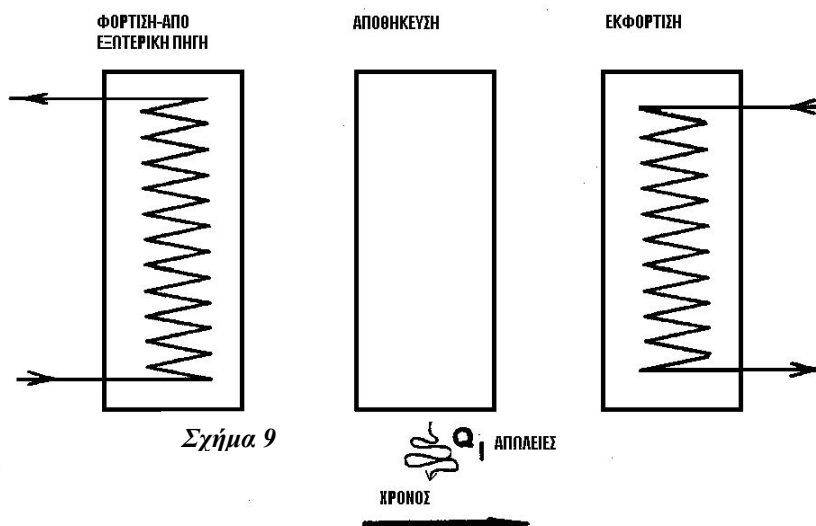
Σε αυτό το σημείο, εμφανίζεται η ενεργειακή αποθήκη που θα εξομαλύνει τις διακυμάνσεις τόσο της παραγόμενης ενέργειας όσο και του απαιτούμενου φορτίου.

Η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας σε ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας είναι οποιαδήποτε εγκατάσταση, συνήθως υποκείμενη σε ανεξάρτητο έλεγχο, η οποία δύναται να αποθηκεύσει ενέργεια, που παράγεται στο κυρίως ενεργειακό σύστημα, να τη διατηρήσει και να την αποδώσει στο σύστημα όταν αυτό είναι απαραίτητο.

Με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μειώνεται η κατανάλωση σε ενέργεια και αυξάνεται η απόδοση του όλου συστήματος.

Ένας πλήρης κύκλος αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνει τις εξής καταστάσεις(Σχήμα 9):

- φόρτιση της «αποθήκης»
- διατήρηση ενέργειας
- αποφόρτιση



Σχήμα 9

Στο σχήμα 9 φαίνονται οι τρεις καταστάσεις ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Οι απώλειες ενέργειας έχουν τοποθετηθεί στην κατάσταση της αποθήκευσης αλλά θα μπορούσαν να υπεισέρχονται σε οποιαδήποτε από τις τρεις καταστάσεις.

Ανάλογα με το σύστημα παραγωγής ενέργειας και τη χρονική περίοδο αποθήκευσης μεταβάλλεται η μορφή αποθήκευσης της ενέργειας και η διάρκεια του κύκλου λειτουργίας της.

Όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας χαρακτηρίζονται από τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Αύξηση της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος παραγωγής ενέργειας στο οποίο υφίστανται, με την αποθήκευση ενέργειας που παράγεται σε περιόδους απαίτησης χαμηλού φορτίου και τη χρήση της σε περιόδους ενεργειακής αιχμής, οπότε το σύστημα για την κάλυψη της επιπλέον απαιτούμενης ενέργειας ενεργοποιεί μικρότερες μονάδες που φορτίζονται και αποδίδουν πλήρως.
- Ενδυναμώνουν την καλύτερη λειτουργία των συστημάτων συμπαραγωγής ενέργειας, αφού με την αποθήκευση της ενέργειας τα συστήματα δε χρειάζεται να ενεργοποιούνται σύμφωνα με τις μεταβαλλόμενες ανάγκες του φορτίου.
- Μεταφέρουν την παραγωγή ενέργειας από τις περιόδους υψηλής ζήτησης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, όπου το κόστος παραγωγής είναι πολύ μικρότερο.
- Αυξάνουν την αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής ενέργειας, αφού βοηθούν στην παραγωγή σταθερής ποσότητας ενέργειας συνολικά από το σύστημα, χωρίς επικίνδυνες διακυμάνσεις.
- Μειώνεται το κόστος της ενέργειας, αφού μειώνεται η κατανάλωσή της και το κόστος παραγωγής της
- Μειώνεται η ενεργειακή κατανάλωση καθώς βελτιώνεται η διαχείριση της ενέργειας σύμφωνα με τις ανάγκες
- Αυξάνεται η προσαρμοστικότητα του συστήματος στις εκάστοτε ανάγκες
- Μειώνεται το αρχικό κόστος και το κόστος συντήρησης του συστήματος παραγωγής της ενέργειας, αφού μειώνεται το μέγεθος του εγκατεστημένου εξοπλισμού, αφού ο απαιτούμενος εξοπλισμός δεν υπολογίζεται με βάση την κάλυψη του μέγιστου φορτίου αιχμής αλλά ενός μέσου φορτίου και τη χρήση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
- Μειώνεται η κατανάλωση των φυσικών καυσίμων, αφού μειώνονται οι ενεργειακές ανάγκες και επομένως μειώνονται οι ρυπογόνες εκπομπές



Μερικές χρήσεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι:

- Σε επιχειρήσεις κοινής ωφελείας, (π.χ. ΔΕΗ), είναι δυνατή η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους χαμηλού κοστολογίου σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με σκοπό τη χρησιμοποίησή της σε περιόδους αιχμής, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από τα φυσικά καύσιμα (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και περιορίζοντας τη χρήση επιπλέον συστημάτων παραγωγής ενέργειας για την κάλυψη των αιχμών.
- Στη βιομηχανία, τα υψηλής θερμότητας απορρίμματα από τις διάφορες βιομηχανικές διεργασίες μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν σε διαδικασίες προθέρμανσης και θέρμανσης άλλων εφαρμογών.
- Σε περιπτώσεις παραγωγής ενέργειας μέσω των ανανεώσιμων πηγών, π.χ. αιολική ενέργεια και υδροηλεκτρική ενέργεια είναι δυνατή η αποθήκευση της παραγόμενης επιπλέον ενέργειας σε περιόδους χαμηλού φορτίου και η μετέπειτα χρήση της σε περιόδους αιχμών.
- Στα ηλιακά συστήματα, η αποθήκευση της πλεονάζουσας από το φορτίο ηλιακής ενέργειας στις ηλιόλουστες μέρες για τη χρήση της στις μέρες με συννεφιά ή τη νύχτα καθιστά τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας δομικό στοιχείο για την ικανοποιητική λειτουργία των συστημάτων αυτών.

### **3.2 Μέθοδοι αποθήκευσης Ενέργειας**

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στην Α' κατηγορία το χαρακτηριστικό είναι η μορφή της ενέργειας που αποθηκεύεται, ενώ στη Β' κατηγορία η διάρκεια της αποθήκευσης.

#### **3.2.1 Μέθοδοι Αποθήκευσης Ενέργειας – Α' κατηγορία**

Οι μορφές με τις οποίες η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί είναι η μηχανική, η θερμική, η χημική, η βιολογική και η μαγνητική.

##### ***3.2.1.1 Μηχανική αποθήκευση της ενέργειας***

Η μηχανική αποθήκευση της ενέργειας περιλαμβάνει την αποθήκευση αυτής:

- σαν κινητική ενέργεια ευθύγραμμης ή περιστρεφόμενης κίνησης
- σαν δυναμική ενέργεια υπερυψωμένων σωμάτων ή ελαστικών υλικών
- σαν ενέργεια αερίων υπό πίεση

Οι βασικές μέθοδοι μηχανικής αποθήκευσης της ενέργειας είναι

1. η υδροαποθήκευση
2. το σύστημα συμπιεσμένου αέρα
3. οι περιστρεφόμενοι τροχοί (σφόνδυλοι)

### 1) Υδροαποθήκευση

Στην μέθοδο της υδροαποθήκευσης (αποθήκευση με άντληση νερού) κατά τη διάρκεια της νύχτας, που η ενεργειακή ζήτηση είναι χαμηλή οι αντλίες αντλούν νερό από ένα ποτάμι (το ποτάμι βρίσκεται σε χαμηλότερο υψόμετρο από τις αντλίες). Το αντλούμενο νερό διοχετεύεται σε μία δεξαμενή. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν η ενεργειακή ζήτηση είναι αυξημένη, από τη δεξαμενή απελευθερώνεται το νερό, το οποίο κατευθύνεται προς το ποτάμι, στο οποίο υπάρχει ένας στρόβιλος, που εξαιτίας της ορμής του νερού (δυναμική ενέργεια που μετατρέπεται σε κινητική) αρχίζει να περιστρέφεται και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

Το σύστημα αυτό μπορεί να λειτουργήσει και διαφορετικά όταν χρησιμοποιηθεί η ηλιακή ή ακόμη και η αιολική ενέργεια. Οι αντλίες κατά τη διάρκεια της ημέρας τροφοδοτούνται από τον ηλεκτρισμό που παράγεται από την ηλιακή ή την αιολική ενέργεια και δεν καταναλώνεται στο φορτίο για να αντλήσουν το νερό από το ποτάμι και το αντλούμενο νερό απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας που δεν υπάρχει ηλιακή ενέργεια ή όταν δε φυσάει αντίστοιχα, οπότε και παράγεται ο απαιτούμενος ηλεκτρισμός για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Ο βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος είναι περίπου 50%, καθώς όταν αντλείται το νερό υπάρχουν 30% απώλειες ενέργειας, ενώ όταν απελευθερώνεται το νερό υπάρχουν 20% ενεργειακές απώλειες. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να λειτουργήσει για περισσότερο από 20 χρόνια, ενώ χρειάζεται μόλις 30 sec για να φτάσει στο μέγιστο της ισχύος του.

### 2) Σύστημα συμπιεσμένου αέρα

Σε ένα σύστημα συμπιεσμένου αέρα, ο αέρας συμπιέζεται κατά τη διάρκεια των ωρών με χαμηλή ενεργειακή ζήτηση και αποθηκεύεται σε μεγάλες υπόγειες δεξαμενές, είτε φυσικές είτε τεχνητές. Κατά τη διάρκεια των ωρών με υψηλή ενεργειακή ζήτηση ο αέρας απελευθερώνεται και κινεί ένα στρόβιλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης του αέρα η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί μετέπειτα για την προθέρμανση του αέρα που αποσυμπιέζεται και την αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Με ένα τέτοιο σύστημα είναι δυνατό να αποθηκεύσουμε μεγάλες ποσότητες ενέργειας, αν βέβαια υπάρχουν και οι μεγάλοι αποθηκευτικοί χώροι. Στην αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα η πίεση μπορεί να διατηρείται σταθερή ή να μεταβάλλεται ανάμεσα σε κάποια όρια ανάλογα με το φορτίο.

### 3) Περιστρεφόμενοι τροχοί

Ένας περιστρεφόμενος τροχός, είναι ένας τροχός με μεγάλη μάζα που αποθηκεύει περιστρεφόμενη κινητική ενέργεια. Μπορεί να συνδεθεί σε θερμικές μηχανές ή ανεμογεννήτριες και να ρυθμίσει το ακανόνιστο φορτίο. Ακόμη, οι τροχοί αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν πότε σαν κινητήρες (αποθήκευση πλεονάζουσας ενέργειας) και πότε σαν γεννήτριες (απόδοσης της αποθηκευμένης ενέργειας), σε μικρούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής

ενέργειας με αεροστρόβιλους που θα λειτουργούν στο μέγιστο του φορτίου τους ανεξαρτήτως της ζήτησης. Στις μεταφορές, επίσης η χρήση των τροχών αυτών επιδρά στην εξοικονόμηση ενέργειας. Σε οχήματα που κάνουν συχνές εκκινήσεις-στάσεις, π.χ. λεωφορεία, η κινητική ενέργεια που θα μετατρεπόταν σε θερμότητα κατά το φρενάρισμα θα διοχετεύεται σε έναν τροχό που θα αρχίζει, έτσι, να περιστρέφεται. Έπειτα, η ενέργεια που θα απαιτείται για την επιτάχυνση του οχήματος θα παρέχεται από τον περιστρεφόμενο τροχό.

Οι περιστρεφόμενοι τροχοί, έχουν τα πλεονεκτήματα της υψηλής πυκνότητας ισχύος αποθήκευσης ανά μονάδα μάζας και της μεγάλης διάρκειας ζωής. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ότι η εκλυόμενη από αυτούς ενέργεια δεν είναι εύκολο να ελεγχθεί.

Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε έναν τροχό είναι:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (1)$$

Όπου:

$I$  : πολική ροπή αδρανείας και

$\omega$  : γωνιακή ταχύτητα.

Η ισχύς (P) ενός συστήματος με περιστρεφόμενους τροχούς καθορίζεται από το μέγεθος της ηλεκτρικής μηχανής. Ο χρόνος που απαιτείται για να φορτιστεί (αποφορτιστεί) ένας τροχός ισούται με το πηλίκο

$$t = \frac{P}{E} \quad (2)$$

Η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του τροχού είναι μια συνάρτηση

$$\frac{E}{m} = f\left(k_s \cdot \frac{\sigma}{\rho}\right) \quad (3)$$

Όπου:

$k_s$  : Παράγοντας μορφής του τροχού

$\sigma$ : Η αντοχή του υλικού

$\rho$ = Η πυκνότητά του υλικού

Για την επιλογή ενός περιστρεφόμενου τροχού η ενεργειακή πυκνότητά του είναι το πιο σημαντικό κριτήριο. Επιλέγονται υλικά όπως το ασάλι, το τιτάνιο κλπ.

### 3.2.1.2 Χημική αποθήκευση της ενέργειας

Η χημική αποθήκευση της ενέργειας περιλαμβάνει την αποθήκευση ενέργειας σε μία ή περισσότερες χημικές ενώσεις που εκλύουν ή απορροφούν ενέργεια όταν αντιδρούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν νέες χημικές ενώσεις.

#### Ηλεκτροχημική αποθήκευση

Η πιο γνωστή συσκευή χημικής αποθήκευσης είναι η μπαταρία. Στη συσκευή αυτή η ενέργεια με τη μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας, κατά την

αποθήκευσή της προκαλεί χημικές αντιδράσεις, οι οποίες κατά την αντίστροφη πορεία τους αποδίδουν την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια. Η μέθοδος αυτή καλείται ηλεκτροχημική αποθήκευση.

Οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά για τη διαχείριση του ηλεκτρικού φορτίου (π.χ. σε μικρές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στα οχήματα, στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας). Εμφανίζουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης, 70-80%, από τα μηχανικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, 50-70%.

Η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε μια μπαταρία καλείται χωρητικότητα και μετριέται σε αμπερώρες (Ah). Μία μπαταρία 100 Ah θα αποδώσει 1 amp συνεχούς ρεύματος για 100 ώρες ή 4 amp συνεχούς ρεύματος για 25 ώρες κλπ. (Οι μπαταρίες διαχειρίζονται μόνο συνεχές ρεύμα.)

Σε μια μπαταρία που είναι ευρέως γνωστή, την μπαταρία Lead-Acid, (Μολύβδου-Θεικού οξέως), συμβαίνουν τα εξής:

Μέσα σε ένα δοχείο που υπάρχει υγρό θειικό οξύ είναι βυθισμένα δύο ηλεκτρόδια. Το στοιχείο του διοξειδίου του μολύβδου, PbO<sub>2</sub>, στο ένα ηλεκτρόδιο αλληλεπιδρά με το διάλυμα του θειικού οξέως, που δρα σαν ηλεκτρολύτης. Ηλεκτρόνια απελευθερώνονται και ρέουν διαμέσου του κυκλώματος, με το οποίο είναι συνδεδεμένα τα ηλεκτρόδια, προς το άλλο ηλεκτρόδιο (που είναι φτιαγμένο από καθαρό Μόλυβδο) εφοδιάζοντας με ηλεκτρική ισχύ το κύκλωμα. Κατά τη διαδικασία, το διοξείδιο του μολύβδου και ο καθαρός μολύβδος αντιδρούν με το θειικό οξύ και παράγεται θειικός μολύβδος, που επικάθεται στα ηλεκτρόδια και νερό, που διαχέεται στο διάλυμα του θειικού οξέως.



Με τον τρόπο αυτό αποφορτίζεται η μπαταρία.

Μετά την αποφόρτιση η μπαταρία μπορεί να φορτιστεί ξανά με την επιβολή ηλεκτρικού ρεύματος στα δύο ηλεκτρόδια, οπότε αναστρέφεται η παραπάνω διαδικασία. Η μετατροπή της ενέργειας από ηλεκτρική σε χημική γίνεται με μια απόδοση της τάξης του 80%.

Η ειδική χωρητικότητα αποθήκευσης μιας τυπικής μπαταρίας Lead-Acid, είναι 126kJ/kg, υποθέτοντας μια απόδοση μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική της τάξης του 100%. Η ειδική χωρητικότητα αποθήκευσης του πετρελαίου, θεωρούμενο σαν αποθηκευτικό μέσο, αφού και εδώ η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική, είναι περίπου 35000 kJ/kg.

Αν σκεφτούμε ότι μόνο το 18% της χημικής ενέργειας του πετρελαίου μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια, τότε η καθαρή ειδική χωρητικότητα αποθήκευσης είναι 6300kJ/kg δηλαδή 50 φορές περισσότερη από αυτήν της παραπάνω μπαταρίας.

Τα χαρακτηριστικά των μπαταριών είναι :

1. Η ειδική ενέργεια αποθήκευσης (Wh/kg), που εκφράζει την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα μάζας ή βάρους της μπαταρίας.
2. Η ενεργειακή πυκνότητα (Wh/m<sup>3</sup>), ορίζεται ως η συνολική ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει μια μπαταρία ανά μονάδα όγκου αυτής για ένα συγκεκριμένο ρυθμό φόρτισης και αποφόρτισης. Οι μπαταρίες με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα έχουν μικρότερο μέγεθος.
3. Η πυκνότητα ισχύος (W/kg), μπορεί να οριστεί σαν ο ρυθμός της ισχύος που αποδίδεται ανά μονάδα μάζας ή βάρους της συσκευής.
4. Ο κύκλος ζωής, δηλ. πόσες φορές μπορεί η μπαταρία να φορτιστεί και να εκφορτιστεί πλήρως.
5. Το κόστος μπαταρίας (€/KW)
6. Το μέγεθος της μπαταρίας

Μολονότι οι μπαταρίες είναι πολύ διαδεδομένες για την αποθήκευση της ενέργειας εμφανίζουν κάποια μειονεκτήματα, σε σχέση με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας:

- Έχουν μικρή ειδική ενέργεια αποθήκευσης
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος
- Έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής
- Το κόστος για την παραγωγή μπαταριών για την αποθήκευσή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας είναι απαγορευτικό.

#### Θερμοχημική αποθήκευση

Μερικά συστήματα χημικής αποθήκευσης ενέργειας φορτίζονται και αποφορτίζονται θερμικά. Πολλές χημικές αντιδράσεις, αμφίδρομες,  $A + B \leftrightarrow C + D$ , είναι ενδόθερμες, όταν πραγματοποιούνται προς τη μια κατεύθυνση, οπότε απορροφούν θερμότητα και την αποθηκεύουν –αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος- και εξώθερμες, όταν πραγματοποιούνται κατά την αντίστροφη κατεύθυνση –όταν πέσει η θερμοκρασία του συστήματος- οπότε και απελευθερώνουν την αποθηκευμένη θερμότητα. Η μέθοδος αυτή καλείται θερμοχημική αποθήκευση.

Στα συστήματα αυτά η ενέργεια αποθηκεύεται σαν ενέργεια χημικών δεσμών.

Οι σημαντικότερες παράμετροι για τις αντιδράσεις αυτές και συνεπώς για αυτά τα συστήματα αποθήκευσης, είναι οι τιμές της σταθεράς ισορροπίας και των σταθερών ταχύτητας των αντιδράσεων στη θερμοκρασία αποθήκευσης. Και οι δύο παράμετροι θα πρέπει να έχουν υψηλές τιμές προς την κατεύθυνση της ενδόθερμης αντίδρασης έτσι που να εξασφαλίζεται ταχύτερη και πλήρης απορρόφηση της θερμότητας. Ακόμη, η αντίστροφη αντίδραση που οδηγεί στην παραλαβή θερμότητας πρέπει να έχει ικανοποιητική απόδοση σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή της σταθεράς ισορροπίας πρέπει να μειώνεται δραστικά.

*Τα θερμοχημικά συστήματα αποθήκευσης έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:*

- Υψηλές τιμές πυκνοτήτων ενέργειας

Τα θερμοχημικά συστήματα αποθήκευσης συνδέονται με πυκνότητες ενέργειας από 2 έως 10 φορές μεγαλύτερες από εκείνες συστημάτων με άλλες μεθόδους αποθήκευσης π.χ. θέρμανση νερού, αποθήκευση με λανθάνουσα θερμότητα, διάλυση, απορρόφηση κλπ.

- Δυνατότητα αποθήκευσης σε θερμοκρασία δωματίου

Τα θερμοχημικά συστήματα αποθήκευσης έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Δηλαδή, τόσο οι αντιδρώντες ουσίες όσο και τα προϊόντα μπορούν να αποθηκευθούν, αφού πρώτα ψυχθούν, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατά αυτόν τον τρόπο οι χημικές αλλά και θερμοκρασιακές επιδράσεις ανάμεσα στις ουσίες αποθήκευσης και στις επιφάνειες των χρησιμοποιούμενων δοχείων αποφεύγονται. Επομένως, αποφεύγονται οι απώλειες θερμότητας, δεν απαιτούνται υλικά θερμικής μόνωσης και υλικά που να αντέχουν στη διάβρωση.

- Εξαιρετικά μεγάλους χρόνους αποθήκευσης

Η δυνατότητα αποθήκευσης στη θερμοκρασία περιβάλλοντος οδηγεί στη μεγάλης διάρκειας αποθήκευση της ενέργειας. (π.χ. Διεποχιακή αποθήκευση)

- Δυνατότητα μεταφοράς της ενέργειας

Ανάλογα με τη χημική αντίδραση που θα επιλέξουμε υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς της ενέργειας (μέσω της μεταφοράς των αντιδρώντων ή των παραγομένων ουσιών). Με αυτόν τον τρόπο είναι εφικτό ο ενδόθερμος αντιδραστήρας να βρίσκεται στον τόπο παραγωγής και δέσμωσης της θερμικής ενέργειας και ο εξώθερμος αντιδραστήρας να βρίσκεται στον τόπο απόληψης της ενέργειας.

- Δυνατότητα λειτουργίας τους ως αντλιών θερμότητας

Όπως γνωρίζουμε οι αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση ή την ψύξη χώρων. Στην προκειμένη περίπτωση για την δημιουργία μιας αντλίας θερμότητας, απαιτούνται δύο αντιδράσεις με κοινό αέριο προϊόν, με τη μία να πραγματοποιείται σε υψηλότερη θερμοκρασία από την άλλη. Κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης της αντλίας η θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για την ενδόθερμη αντίδραση υψηλής θερμοκρασίας. Το παραγόμενο αέριο αντιδρά εξώθερμα για την πραγματοποίηση της άλλης αντίδρασης χαμηλής θερμοκρασίας. Η θερμότητα που παράγεται σε αυτό το σημείο μπορεί είτε να απορρίπτεται είτε να διοχετεύεται για τη θέρμανση χώρων ή νερού.

Κατά τον κύκλο εκφόρτισης της αντλίας που γίνεται με τον αντίστροφο τρόπο μπορεί να επιτευχθεί ψύξη εσωτερικών χώρων. Τα συστήματα αυτά

βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή, όταν η θερμική ενέργεια προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια, οπότε υπάρχει άμεση εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και αποθήκευσή της.

- Χαμηλό ενεργειακό κόστος

Το κόστος ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συνδέεται με το κόστος ισχύος και το κόστος ενέργειας.

Το κόστος ισχύος σχετίζεται με τη μεταφερόμενη ενέργεια από ή προς τη μονάδα αποθήκευσης και περιλαμβάνει το κόστος των εναλλακτών θερμότητας, των χημικών αντιδραστήρων, των αντλιών και των συστημάτων συμπίεσης.

Το κόστος ενέργειας συνδέεται με την ποσότητα της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας και περιλαμβάνει το κόστος των μέσων αποθήκευσης (χημικών ουσιών και δοχείων αποθήκευσης) και των συστημάτων θερμικής μόνωσης. Στα θερμοχημικά συστήματα οι συσκευές ισχύος ξεχωρίζουν, φυσικά, από τα δοχεία αποθήκευσης, τις ουσίες και τα συστήματα μόνωσης. Αυτό, όμως, δε συμβαίνει στα άλλα συστήματα αποθήκευσης. Ακόμη, στα θερμοχημικά συστήματα το κόστος ενέργειας είναι χαμηλό(αφού δεν χρειαζόμαστε π.χ. θερμική μόνωση). Έχει διαπιστωθεί ότι για μικρούς χρόνους αποθήκευσης το κόστος ισχύος καθορίζει το συνολικό κόστος. Αυτό σημαίνει ότι τα θερμοχημικά συστήματα πλεονεκτούν έναντι των άλλων όταν απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι αποθήκευσης.

Γενικά, τα θερμοχημικά συστήματα αποθήκευσης δεν είναι εύχρηστα λόγω των πολλών δοχείων, στοιχείων ισχύος που απαιτούν, γεγονός το οποίο χαμηλώνει και την αποδοτικότητά τους.

Στην κατηγορία της θερμοχημικής αποθήκευσης ανήκουν και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με τη μορφή θερμότητας διάλυσης ή θερμότητας απορρόφησης, για την οποία παραθέτουμε ένα παράδειγμα.

Τα συστήματα αυτά περιέχουν δύο αποθηκευτικά δοχεία. Στο ένα δοχείο γίνεται η διάλυση (στην πραγματικότητα αραίωση) μιας ουσίας στο νερό, που είναι μια εξώθερμη διεργασία και οδηγεί στην απόδοση θερμότητας σε εμάς, οπότε καλύπτουμε τις ενεργειακές μας ανάγκες και το σύστημα αποφορτίζεται. Στο άλλο γίνεται εξάτμιση του νερού και συμπύκνωση με τη βοήθεια εξωτερικής θερμικής ενέργειας (π. χ ενέργειας που παίρνουμε από τον ήλιο ή από άλλες πηγές). Οι υδρατμοί που υγροποιούνται μεταφέρονται στο πρώτο δοχείο και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

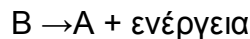
Οι ουσίες που διαλύονται στο νερό είναι το  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $NaOH$ . Στα συστήματα αυτά συναντάμε υψηλές τιμές ενεργειακής πυκνότητας αλλά και πολλά προβλήματα διάβρωσης με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους εγκατάστασης λόγω της χρήσης αντιδιαβρωτικών ουσιών για την κατασκευή των δοχείων.

Στην περίπτωση της προσρόφησης που είναι ενδόθερμη διεργασία το σύστημα έχει ως εξής:

Σε μία κλίνη (bed), που περιέχει κάποιο προσροφητή, διαβιβάζεται θερμός και ξηρός αέρας που προέρχεται από ένα σύστημα π.χ. ηλιακών συλλεκτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άνοδο της θερμοκρασίας του προσροφητή και την εκρόφηση του νερού (εξώθερμη διεργασία). Έτσι, η “ξηρότητα” του προσροφητή είναι το μέτρο της ποσότητας της αποθηκευμένης ενέργειας. Τη στιγμή που επιθυμούμε την παραλαβή της ηλιακής θερμικής ενέργειας διαβιβάζουμε μέσα από την κλίνη του προσροφητή υγρό αέρα θερμοκρασίας δωματίου. Η κλίνη αρχικά ψύχεται και αρχίζει κατόπιν η προσρόφηση του νερού με σύγχρονη έκλυση της θερμότητας προσρόφησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη θέρμανση και ξήρανση του αέρα. Ο θερμός αέρας μπορεί τώρα να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές όπως η θέρμανση χώρων και στην ξήρανση.

### *Φωτοχημική αποθήκευση*

Στην κατηγορία της χημικής αποθήκευσης εντάσσεται και η φωτοχημική αποθήκευση. Σε αυτού του είδους την αποθήκευση η ηλιακή ενέργεια-φως κατά την πρόσπτωσή της σε μια ένωση A οδηγεί σε μια φωτοχημική αντίδραση και την παραγωγή μιας ένωσης B. Η ένωση B, κατά την αντίστροφη πορεία της αντίδρασης, απελευθερώνει ενέργεια παράγει ξανά την ένωση A.



Η απόδοση της μετατροπής του φωτός σε χημική ενέργεια μέσω μιας φωτοχημικής αντίδρασης περιορίζεται από την κβαντική φύση των φωτοχημικών αντιδράσεων. Λόγω αυτού, για να μεταβεί η ένωση A στην ένωση B θα πρέπει η ενέργεια των φωτονίων που θα προσπέσουν στην A να είναι μεγαλύτερη ή τουλάχιστον ίση από την καθοριζόμενη ενέργεια από το ίδιο το σύστημα A-B για αυτή τη μετατροπή. Εάν η πηγή ακτινοβολίας για την πραγματοποίηση της αντίδρασης είναι το ηλιακό φως, τότε ένα μόνο κλάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι διαθέσιμο για την πραγματοποίηση της αντίδρασης αφού η ηλιακή ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από ένα ενεργειακό φάσμα και όχι μια συγκεκριμένη τιμή ενέργειας των φωτονίων. Στην καλύτερη περίπτωση μια φωτοχημική αντίδραση που πραγματοποιείται με την ηλιακή ενέργεια έχει μια απόδοση της τάξης του 44%.

Η συνολική απόδοση ενός συστήματος φωτοχημικής αποθήκευσης ενέργειας εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η εξώθερμη αντίδραση μετατροπής της ένωσης B σε A και η οποία εξαρτάται από τη μέθοδο με την οποία προκαλείται η συγκεκριμένη αντίδραση. Συνήθως γίνεται μια προθέρμανση του συστατικού B ώστε κατά τη μετατροπή του σε A να αποδώσει σημαντικά ποσά θερμότητας. Τέτοια συστήματα λειτουργούν σε μια περιοχή θερμοκρασιών από 100°C -200 °C. Η καταστροφή των αντιδραστηρίων στα οποία πραγματοποιούνται οι φωτοχημικές αντιδράσεις λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και η μη



ολοκληρωμένη κατανόηση των μηχανισμών των αντιδράσεων αυτών είναι τα προβλήματα που πρέπει να λυθούν για να προχωρήσουν και εμπορικά αυτού του είδους τα συστήματα.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι με τη φωτοχημική αποθήκευση είναι δυνατή η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας-φως σε μια μορφή ενέργειας που πιθανόν είναι ευκολότερα χρησιμοποιήσιμη.

#### *Αποθήκευση ενέργειας με την μορφή καυσίμου (Υδρογονοαποθήκευση)*

Στη χημική αποθήκευση της ενέργειας μπορεί να ενταχθεί και η αποθήκευση της ενέργειας με τη μορφή ενός καυσίμου.

Μια τέτοια μέθοδος αποθήκευσης είναι η υδρογονοαποθήκευση, δηλαδή η αποθήκευση ενέργειας μέσω του υδρογόνου. Το υδρογόνο σήμερα έχει πολύ ελκυστικές ιδιότητες ως μέσο αποθήκευσης του ηλεκτρισμού. Η ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας του υδρογόνου ανέρχεται σε 116300 kJ/kg, ποσό κατά πολύ μεγαλύτερο από αυτό του υγρού μεθανίου που ανέρχεται σε 46250 kJ/kg. Όμως, η ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου του υδρογόνου είναι πολύ μικρή, γεγονός που απαιτεί μεγάλο όγκο αποθήκευσης. Το υδρογόνο, παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα στο ρόλο του ενεργειακού μεταφορέα. Μπορεί να αποθηκευτεί σχετικά εύκολα, να μεταφερθεί οικονομικά και να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του υδρογόνου είναι ότι δε βρίσκεται σε ελεύθερη μορφή στη φύση.

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σαν πεπιεσμένο αέριο ή υγρό ή σε ένα χημικό μίγμα. Οι πιθανές προσεγγίσεις στην αποθήκευση του υδρογόνου περιλαμβάνουν τη φυσική αποθήκευση μέσω της υγροποίησης ή της συμπίεσης και την αποθήκευση σε υλικά μέσω αναστρέψιμων διαδικασιών ή χημικών αντιδράσεων. Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί υπό πίεση σε δεξαμενές, όπου το υλικό κατασκευής τους πρέπει να έχει αντοχή σε πολύ υψηλές πιέσεις και για αυτό το λόγο είναι πολύ ακριβό.

Προσρόφηση των μορίων υδρογόνου από ενεργό άνθρακα έχει μελετηθεί στο παρελθόν. Αυτού του είδους τα συστήματα απαιτούν χαμηλές θερμοκρασίες και έχουν καλή απόδοση ακόμη και με άνθρακα με μέσο πορώδες. Τα ανθρακικά υλικά παρουσιάζουν μία μακράς διάρκειας δυνατότητα για αποθήκευση του υδρογόνου και αρκετές ανθρακικές νανοτεχνολογίες έχουν ερευνηθεί με ιδιαίτερη εστίαση στα «single-wall nanotubes» (SWNTs). Όμως, η ποσότητα της αποθήκευσης και οι μηχανισμοί με τους οποίους το υδρογόνο αποθηκεύεται σε αυτά τα υλικά δεν είναι πλήρως γνωστά. Απαιτούνται περαιτέρω προσπάθειες προς αυτήν την κατεύθυνση.

Αρκετά καθαρά μέταλλα ή κράματα μετάλλων μπορούν να ενωθούν με το υδρογόνο παράγοντας σταθερά μεταλλικά υδρίδια. Τα υδρίδια αυτά όταν θερμανθούν διασπώνται και απελευθερώνουν υδρογόνο. Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί με τη μορφή ενός υδριδίου σε υψηλότερες πυκνότητες από όταν γίνεται απλώς συμπίεσή του. Η χρήση αυτού του ασφαλούς και αποδοτικού συστήματος αποθήκευσης εξαρτάται από την εύρεση ενός

μετάλλου με αρκετή προσροφητικότητα, το οποίο να «λειτουργεί» υπό κατάλληλες θερμοκρασίες. Το μειονέκτημα είναι ότι τα μεταλλικά υδρίδια είναι πολύ πυκνά και επομένως το μεγάλο βάρος αυτών σε τέτοιου είδους συστήματα αποθήκευσης οφείλεται στο μέταλλο και όχι στο υδρογόνο.

Όπως, προαναφέραμε το υδρογόνο δε βρίσκεται ελεύθερο στη φύση, υπάρχουν όμως μέθοδοι με τις οποίες μπορούμε να πάρουμε το υδρογόνο όπως:

- Παραγωγή υδρογόνου από στερεά και μη καύσιμα μέσω της αναμόρφωσης του φυσικού αερίου αλλά και από τη μερική οξειδωση άνθρακα ή και Diesel.
- Παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα (τα ένζυμα από τα φύκια βοηθούν στη διάσπαση του νερού)
- Παραγωγή υδρογόνου από τη χρήση ηλεκτρισμού, με μεθόδους όπως η ηλεκτρόλυση και η φωτοηλεκτρόλυση.

Η υδρογονοαποθήκευση βρίσκει άμεσα πεδίο εφαρμογής στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που έχει παραχθεί από φωτοβολταϊκά συστήματα ή ανεμογεννήτριες, χρησιμοποιείται για την ηλεκτρόλυση του νερού και την παραγωγή υδρογόνου. Το υδρογόνο αποθηκεύεται και κατά τις περιόδους αιχμής, που υπάρχει έλλειμμα στην παραγωγή ηλεκτρισμού, διοχετεύεται σε κυψέλες καυσίμου, όπου παράγεται ηλεκτρισμός.

Ένα άλλο υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως το υδρογόνο σαν μέσο αποθήκευσης είναι το αλουμίνιο. Μία μεγάλη ποσότητα ενέργειας μπορεί να αποθηκευτεί σε μια μικρή μάζα αλουμινίου. Το αλουμίνιο σε κοκκώδη μορφή μπορεί εύκολα να αποθηκευτεί σε στοίβες, χωρίς να χρειάζεται ειδικές αποθηκευτικές δεξαμενές ή κρυογενικά βυτιοφόρα όπως το υδρογόνο ή τα ανθρακικά καύσιμα. Το αλουμίνιο μπορεί εύκολα να οξειδωθεί με τον αέρα σε έναν τύπου καυστήρα, όπως ο κονιορτοποιημένος άνθρακας. Το προϊόν της καύσης είναι το οξειδίο του αλουμινίου, το οποίο είναι υγρό και μπορεί εύκολα να συλλεχτεί μετά την καύση με υψηλή απόδοση. Το οξειδίο του αλουμινίου μπορεί να αποθηκευτεί έως ότου χρειαστεί για την αναπαραγωγή του αλουμινίου. Το σημαντικότερο όμως μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι το υψηλό κόστος.

### 3.2.1.3 Βιολογική αποθήκευση ενέργειας

Στη βιολογική αποθήκευση ενέργειας, η ενέργεια αποθηκεύεται σε χημική μορφή μέσω βιολογικών διεργασιών. Θεωρείται πως η μέθοδος αυτή είναι σημαντική για τη μακροχρόνια αποθήκευση. Αυτή τη στιγμή η απόδοση των βιολογικών διεργασιών για αποθήκευση ενέργειας είναι της τάξης του 1%, ποσοστό πολύ μικρό. Είναι γεγονός, πως αν το ποσοστό αυτό με κάποιο τρόπο αυξηθεί και γίνει περίπου 10%, τότε μπορεί να υπάρξουν τεχνολογικές εφαρμογές βασισμένες σε αυτά τα συστήματα. Επειδή το ενδιαφέρον για αυτήν την τεχνική είναι μειωμένο, ελάχιστες πρόοδοι έχουν σημειωθεί και οι βιβλιογραφικές αναφορές είναι σχεδόν ανύπαρκτες.

#### 3.2.1.4 Μαγνητική αποθήκευση ενέργειας

Στη μαγνητική αποθήκευση της ενέργειας, η ενέργεια αποθηκεύεται σε κάποιο μαγνητικό πεδίο όπως σε ένα μεγάλο ηλεκτρομαγνήτη.

Ένα αναπτυσσόμενο σχέδιο σε αυτού του είδους την αποθήκευση αφορά στα υπεραγώγιμα υλικά. Σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν, μερικά υλικά εμφανίζουν σχεδόν μηδενική ηλεκτρική αντίσταση και επομένως μεγάλης έντασης ηλεκτρικά ρεύματα είναι δυνατόν να διέλθουν μέσα από αυτά τα υλικά σχεδόν χωρίς απώλειες. Επειδή, όμως σε αυτό το σενάριο η αποθήκευση γίνεται σε συνεχές ρεύμα, υπάρχουν κάποιες απώλειες κατά τη μετατροπή του ρεύματος αυτού σε εναλλασσόμενο. Επιπλέον, ένα ποσό της ενέργειας θα καταναλώνεται για την παραγωγή και διατήρηση αυτών των χαμηλών θερμοκρασιών. Για αυτού του είδους τα συστήματα αναμένονται βαθμοί απόδοσης της τάξης του 80%-90%.

Η μαγνητική αποθήκευση ενέργειας προωθείται για δύο βασικούς σκοπούς. Αρχικά, μεγάλοι υπεραγώγιμοι μαγνήτες ικανοί να αποθηκεύσουν 1000-10000 MWh ηλεκτρικής ενέργειας, θα χρησιμοποιούνται σε κεντρικούς σταθμούς παραγωγής με σκοπό να μειώνουν τα φορτία αιχμής. Στη συνέχεια, μικρότεροι μαγνήτες με χωρητικότητα αποθήκευσης μέχρι 10 kWh θα βοηθούν στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρότερες εφαρμογές καθώς και στην απόσβεση των διακυμάνσεων της τάσης λόγω των γραμμών μεταφοράς.

#### 3.2.1.5 Θερμική αποθήκευση ενέργειας

Τέλος, στη θερμική αποθήκευση ενέργειας, η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε μια ουσία με την αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας της (με τη μορφή αισθητής θερμότητας) ή με την αλλαγή της φάσης της (με τη μορφή της αισθητής θερμότητας). Ακόμη, στη θερμική αποθήκευση θα μπορούσαμε να συμπεριλάβουμε τη θερμοχημική αποθήκευση, αφού και εκεί η συναλλασσόμενη ενέργεια εισέρχεται και εξέρχεται από το αποθηκευτικό σύστημα με τη μορφή της θερμότητας. Παραδείγματα θερμικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι η αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας για νυχτερινή θέρμανση, η αποθήκευση της καλοκαιρινής θερμότητας για τη χρήση της το χειμώνα, η αποθήκευση του χειμωνιάτικου πάγου για τον καλοκαιρινό κλιματισμό.

Ένα άλλο είδος συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιεί ηλεκτρικούς θερμαντές για την παραγωγή θερμότητας τη νύχτα, που το κοστολόγιο της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερο και την αποθηκεύει στη δομική μάζα των υλικών του κτιρίου ή σε υλικά του εδάφους ή ακόμη σε κεραμικά υλικά που βρίσκονται σε καλά μονωμένες δεξαμενές, για την ημερήσια απόδοσή της.

Με παρόμοιο τρόπο στα συστήματα αποθήκευσης ψύξης γίνεται νυχτερινή παραγωγή πάγου, όταν δηλαδή δεν απαιτείται και αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί για τον κλιματισμό χώρων την επόμενη μέρα όταν αυτό απαιτηθεί.

Στις μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας μέσω αεριοστρόβιλων, τα συστήματα αποθήκευσης ψύξης χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στην ψύξη του αέρα περιβάλλοντος πριν εισέλθει στο συμπιεστή κυρίως κατά τους θερινούς μήνες που πέφτει η απόδοση του συστήματος.

Παρατηρούμε, λοιπόν, από τις εφαρμογές των συστημάτων αυτών ότι διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων στα οποία υφίστανται καθώς εξομαλύνουν τις διαφορές ανάμεσα στην παραγωγή και τη ζήτηση του φορτίου.

Στα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας θα αναφερθούμε διεξοδικά παρακάτω.

### 3.2.2 Μέθοδοι Αποθήκευσης Ενέργειας – Β' κατηγορία

Ανάλογα με τη διάρκεια αποθήκευσης τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας διαχωρίζονται σε μικρής, μεσαίας και μεγάλης διάρκειας.

Η μικρής διάρκειας αποθήκευση χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει τις αιχμές της ζήτησης ενός ενεργειακού συστήματος για λίγες ώρες σε μια ημέρα. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται το μέγεθος του ενεργειακού συστήματος. Το κεφάλαιο της επένδυσης, οι θερμικές απώλειες, και οι μονάδες παραγωγής της ενέργειας.

Η μεσαίας ή μεγάλης διάρκειας αποθήκευση συστήνεται όταν η περισσευούμενη θερμική ενέργεια ή το εποχιακό ενεργειακό κέρδος αντίστοιχα, μπορεί να μεταφερθεί με μία καθυστέρηση από μερικές εβδομάδες έως μερικούς μήνες.

Η μεγάλης διάρκειας αποθήκευση που εκμεταλλεύεται τις ετήσιες κλιματικές αλλαγές συχνά αναφέρεται σαν διεποχιακή αποθήκευση. Το βασικό χαρακτηριστικό της διεποχιακής αποθήκευσης είναι η πολύ μεγάλη χωρητικότητα που απαιτείται σε σχέση με την ημερήσια αποθήκευση ενέργειας. Οι θερμικές απώλειες γίνονται πολύ σημαντικές για τη διεποχιακή αποθήκευση αφού πρόκειται για μεγαλύτερα ποσά ενέργειας.

### 3.3 Χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Η αρχή που διέπει ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας είναι ότι η ενέργεια διοχετεύεται σε ένα σύστημα αποθήκευσης για να χρησιμοποιηθεί σε κάποια επόμενη χρονική στιγμή. Αυτό που κυρίως διαφέρει σε κάθε περίπτωση είναι ο χρόνος της αποθήκευσης και η μέθοδος που χρησιμοποιείται.

Οι παράμετροι που πρέπει να μελετώνται σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας είναι:

- Μορφή της αποθηκευόμενης ενέργειας

- Θερμοκρασία αποθήκευσης
- Ποσότητα της αποθηκευόμενης ενέργειας
- Ποιότητα της αποθηκευόμενης ενέργειας
- Ισχύς εισόδου και εξόδου
- Απόδοση
- Διάρκεια αποθήκευσης
- Η χρονική απόκριση του συστήματος ανάλογα με τη ζήτηση
- Η ταχύτητα φόρτισης και εκφόρτισης του συστήματος
- Βάρος, όγκος και άλλα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος
- Ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου του συστήματος
- Κόστος επένδυσης ανά μονάδα ενέργειας εξόδου
- Κόστος επένδυσης ανά μονάδα ισχύος εισόδου και εξόδου
- Κόστος συντήρησης και λειτουργίας.
- Διάρκεια ζωής
- Κρίσιμες παράμετροι ασφαλείας
- Επιπτώσεις στο περιβάλλον από τα υλικά και τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί
- Συμβατότητα με τις διαδικασίες παραγωγής ενέργειας
- Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας

Τέλος τα κύρια προβλήματα σε μια εγκατάσταση αποθήκευσης θερμότητας είναι:

- Η διαμόρφωση μιας κατάλληλης επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας με στόχο τη γρήγορη μεταφορά στο σύστημα για αποθήκευση αλλά και την ταχεία απόληψή της
- Ο περιορισμός των απωλειών στο περιβάλλον με στόχο την αύξηση του χρόνου αποθήκευσης στα επίπεδα που χρειάζεται

## **4 ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ** **ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**<sup>[12],[13],[14]</sup>

### **4.1 Γενικά**

Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται σαν μια από τις πιο προηγμένες τεχνολογίες σε θέματα ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια έχει εκδηλωθεί μεγάλο ενδιαφέρον, για αυτά τα συστήματα αποθήκευσης. Όπως γίνεται αντιληπτό, η θερμική αποθήκευση της ενέργειας κατέχει τον βασικό ρόλο στην εξοικονόμηση της ενέργειας. Καθώς βαδίζουμε σταθερά σε μια ενεργειακή κρίση, τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αναμένονται να είναι μια πολύ ελκυστική επιλογή σε βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές, καθώς θα οδηγούν μεταξύ των άλλων σε αύξηση της απόδοσης του ενεργειακού συστήματος και σε περιβαλλοντικά οφέλη.

Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν μια μέθοδο για την ουσιαστική μείωση του ηλεκτρικού φορτίου μειώνοντας τα φορτία αιχμής. Ακόμη, καθιστούν ευκολότερη μια σωστή πρόβλεψη της λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος, αφού αποσβένουν τις αποκλίσεις ανάμεσα στην παραγωγή και τη ζήτηση του ενεργειακού φορτίου. Επομένως, οδηγούν σε μια αποδοτικότερη χρήση των συστημάτων ενέργειας στα οποία υφίστανται. Για τους λόγους αυτούς, οι ερευνητικές δραστηριότητες σε αυτόν τον τομέα συνεχίζονται με ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον σε διάφορα ερευνητικά κέντρα, σε πολλές χώρες του κόσμου.

Υπάρχουν δύο κυρίως τύποι θερμικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που αποθηκεύουν τη θερμική ενέργεια με τη μορφή της αισθητής θερμότητας και τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που αποθηκεύουν τη θερμική ενέργεια με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας. Η επιλογή του εκάστοτε συστήματος εξαρτάται από τη διάρκεια της αποθήκευσης, την οικονομική του βιωσιμότητα και από διάφορες λειτουργικές παραμέτρους, δηλαδή κατά πόσο ταιριάζει το επιλεγμένο σύστημα στο ενεργειακό σύστημα που υπάγεται.

Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, η πλειοψηφία των οποίων αφορά στη θέρμανση και στην ψύξη. Τα αποθηκευτικά αυτά συστήματα αποτελούν ένα σύνδεσμο και μια προσωρινή αποθήκη μεταξύ της θερμικής πηγής και του χρήστη αυτής της θερμικής ενέργειας.

Ένας βασικός παράγοντας που καθορίζει την αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος αποθήκευσης είναι η ημερήσια διακύμανση του φορτίου, γιατί από αυτήν καθορίζεται η φόρτιση και η εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης.

Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υποβάλλονται σε ελέγχους πριν από τη χρήση τους. Η ASHRAE έχει θεσπίσει ένα σύνολο κανόνων και

δοκιμασιών στις οποίες μπορούμε να υποβάλλουμε τα συστήματά μας ώστε να ελέγχουμε αν είναι αποδοτική η χρήση τους.

#### **4.2 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας**

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας (θέρμανσης και ψύξης) με τη μορφή της αισθητής θερμότητας πραγματοποιείται με την αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας ενός υλικού, χωρίς να αλλάζει η φάση στην οποία βρίσκεται.

Έτσι, για ένα υλικό που μεταβαίνει από μια θερμοκρασία  $T_1$  σε μια θερμοκρασία  $T_2$ , η θερμική ενέργεια που συναλασσόμαστε (είτε προσδίδουμε είτε παίρνουμε από το υλικό) είναι :

$$\Delta Q = m \cdot \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = V \cdot \int_{T_1}^{T_2} (C_p \cdot \rho) dT, \quad (4)$$

Όπου:

m: η μάζα του υλικού σε kg

$C_p$ : η ειδική θερμοχωρητικότητα, υπό σταθερή πίεση, του υλικού σε J/KgK

V: ο όγκος του υλικού σε  $m^3$

dT: η διαφορά θερμοκρασίας σε βαθμούς K

Όπως σημειώσαμε και ανωτέρω, το υλικό αυτό δε θα αλλάζει φάση σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος της διαδικασίας. Η ποσότητα  $\Delta Q$  αποτελεί, τελικά, την ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύουμε στο σύστημα.

Αν και οι τιμές της πυκνότητας  $\rho$  και της ειδικής θερμοχωρητικότητας  $C_p$ , οι οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά των υλικών αυτών, μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, οι μέσες τιμές αυτών ικανοποιούν τη σχέση  $\Delta Q = C_p \cdot \Delta T$ , ανά μονάδα μάζας. Ένας ακόμη βασικός παράγοντας που χαρακτηρίζει αυτά τα υλικά είναι ο ρυθμός με τον οποίο μπορούν να αποθηκεύσουν ή να εκλύσουν θερμότητα.

Η πυκνότητα ενός υλικού,  $\rho$ , είναι το μέγεθος που μας δείχνει πόση μάζα καταλαμβάνει το υλικό ανά μονάδα όγκου ( $kg/m^3$ ) και η ειδική θερμοχωρητικότητα αυτού,  $C_p$  (J/KgK), είναι το μέγεθος που μας δείχνει πόση ενέργεια απαιτείται για να αυξήσουμε τη θερμοκρασία ενός kg του υλικού κατά έναν βαθμό Kelvin, υπό σταθερή πίεση.

Για να συγκρίνουμε κάποια υλικά η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο ίσως να είναι πιο χρήσιμη. Το μέγεθος αυτό,  $C_v$  (J/ $m^3K$ ), μας δείχνει πόση ενέργεια απαιτείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας ενός  $m^3$  ενός υλικού, κατά ένα βαθμό Kelvin, υπό σταθερό όγκο.

Από τους παραπάνω ορισμούς διαφαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού τόσο μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας μπορεί να αποθηκεύσει. Για αυτό το λόγο το μέγεθος αυτό αποτελεί βασικό κριτήριο για την ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύει αισθητή θερμότητα.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις ιδιότητες διαφόρων χρησιμοποιούμενων υλικών ως μέσα θερμικής αποθήκευσης, στους 20°C.

<b>Πίνακας 2 : Ιδιότητες Υλικών Θερμικής Αποθήκευσης<sup>[3]</sup></b>			
Υλικό	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/KgK)	$C_v$ (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

Για να είναι κατάλληλα τα υλικά για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής (αποθήκευση με τη μορφή αισθητής θερμότητας) πρέπει να έχουν:

- υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα
- υψηλή θερμική διάχυση, δηλαδή υψηλό ρυθμό απελευθέρωσης ή απορρόφησης της θερμότητας
- υψηλό ειδικό βάρος
- να είναι δυνατή η χρησιμοποίησή τους και σαν θερμικά και σαν ψυκτικά μέσα
- να έχουν θερμική και γεωμετρική σταθερότητα
- να μην είναι εύφλεκτα, διαβρωτικά ή τοξικά
- να έχουν σχετικά χαμηλό κόστος
- να έχουν ικανοποιητική αντοχή
- να λειτουργούν σε ευρύ φάσμα εφαρμογών

#### Παθητικό θερμικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Σε ένα παθητικό θερμικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, το αποθηκευτικό μέσο έρχεται σε άμεση επαφή με το περιβάλλον για το οποίο αποθηκεύουμε τη θερμική ενέργεια και δε μεσολαβούν άλλα εξαρτήματα.



### Ενεργό θερμικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Ένα ενεργό θερμικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας αποτελείται από έναν αποθηκευτικό χώρο μέσα στον οποίο βρίσκεται το αποθηκευτικό μέσο και συσκευές εισόδου και εξόδου.

Η αποθήκευση της θερμότητας βασίζεται σε μια απλή διαδικασία. Η θερμότητα που παράγεται από ένα σύστημα διοχετεύεται σε κάποιο υλικό, το οποίο βρίσκεται σε μια καλά μονωμένη δεξαμενή. Η θερμοκρασία του υλικού ανυψώνεται και έτσι το υλικό “αποθηκεύει” θερμότητα, την οποία και αποδίδει όταν εντός ενός ευλόγου χρονικού διαστήματος η θερμότητα αυτή ζητηθεί.

Στο ενεργό θερμικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας ο αποθηκευτικός χώρος πρέπει να διατηρεί το υλικό αποθήκευσης και να εμποδίζει τις θερμικές απώλειες, πρέπει δηλαδή να είναι καλά μονωμένος.

Η θερμική διαστρωμάτωση, δηλαδή η ύπαρξη μιας θερμοκρασιακής κλίσης διαμέσου του αποθηκευτικού χώρου αποθήκευσης είναι επιθυμητή, καθώς υπολογίζεται ότι αυξάνει την θερμική απόδοση του συστήματος κατά 10%. Η διατήρηση της διαστρωμάτωσης είναι απλούστερη στην αποθήκευση με στερεά υλικά από ότι με ρευστά.

#### 4.2.1 Στερεά υλικά

Τα στερεά υλικά, όπως πέτρες, χαλίκια, τούβλα, κεραμικά στερεά, τσιμέντο, έχουν το πλεονέκτημα της υψηλής τιμής στην ειδική θερμοχωρητικότητα (όχι υψηλότερης από του νερού). Συνήθεις εφαρμογές των υλικών αυτών είναι στην πλήρωση της θερμικής κλίνης στερεών (rock-bed), στους τοίχους θερμικής αποθήκευσης, σαν δομικά υλικά του κελύφους των κτιρίων, στην μακράς διάρκειας υπόγεια αποθήκευση (με υλικά του εδάφους, όπως πετρώματα).

Στα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας δύο μεγέθη παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο :η θερμοχωρητικότητα των υλικών, που αναφέρεται στην ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας σε αυτά και η θερμοπερατότητα του εκάστοτε κτιρίου, κτίσματος κλπ. η οποία χαρακτηρίζει συνολικά την ικανότητα του κτιρίου να αποθηκεύει ενέργεια σε σχέση με τις θερμικές απώλειες.<sup>[10]</sup>

#### Θερμοπερατότητα Κτιρίου

Η θερμοπερατότητα καθορίζει την ποσότητα θερμότητας που μεταδίδεται από τη μία πλευρά του υλικού στην άλλη, όταν και από τις δύο πλευρές το υλικό έρχεται σε επαφή με τον αέρα. Δηλαδή η θερμοπερατότητα λαμβάνει υπόψη τη θερμοδιαφυγή του υλικού και τη θερμική μετάβαση και από τις δύο πλευρές του.<sup>[10]</sup>

## Θερμοχωρητικότητα

Το μέγεθος που διαδραματίζει τον σπουδαιότερο ρόλο στη θερμική συμπεριφορά ενός υλικού, είναι η θερμοχωρητικότητά του. Η θερμοχωρητικότητα ενός υλικού (σε  $J/^{\circ}C$ ) καθορίζει την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε αυτό. Αντίστοιχα, η ειδική θερμοχωρητικότητα ενός υλικού ( $J/kg^{\circ}C$ ) καθορίζει την ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα μάζας υλικού, που μπορεί να αποθηκευτεί σε αυτό. Επομένως στην θερμική αποθήκευση ενέργειας, τα μεγέθη αυτά είναι μείζονος σημασίας.<sup>[10]</sup>

### 4.2.2 Υγρά υλικά

#### Νερό

Από τα διάφορα υγρά υλικά (αλλά και από τα στερεά υλικά) το νερό κυριαρχεί για θερμοκρασίες κάτω των  $100^{\circ}C$ , αφού έχει την υψηλότερη θερμοχωρητικότητα  $4,18 kJ/kgK$ , χαμηλή πυκνότητα, πολύ χαμηλή τιμή, είναι ευρέως διαθέσιμο και μπορεί εύκολα να αντληθεί και να μεταφερθεί, μεταφέροντας έτσι και την περιεχόμενη σε αυτό ενέργεια. (Το νερό παραμένει οικονομικά ανταγωνιστικό και σε υψηλότερες θερμοκρασίες, έως  $357^{\circ}C$ , παρόλη την ανάγκη για συμπίεσή του.) Ακόμη σαν υγρό επιτρέπει καλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας.

Όπως, προαναφέραμε το νερό κυριαρχεί μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται ως αποθηκευτικά μέσα θερμικής ενέργειας με τη μορφή της αισθητής θερμότητας. Το νερό, λόγω των θερμικών του ιδιοτήτων αλλά και εξαιτίας της ευκολίας στη διαχείρισή του, φαίνεται να είναι ένα εξαιρετικό μέσο για την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας, ειδικά σε εφαρμογές με χαμηλές θερμοκρασίες αποθήκευσης. (Το νερό μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια και με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας- πάγος, για ψυκτικές εφαρμογές)

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του νερού είναι:

- Η μεγάλη δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου, χάρη στη μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητά του
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί συγχρόνως και σαν ρευστό που θα μεταφέρει τη θερμική ενέργεια αλλά και σαν αποθηκευτικό μέσο
- Έχει ευρεία περιοχή λειτουργίας από  $0-100^{\circ}C$ , που μπορεί να διευρυνθεί και προς τα κάτω, με ειδικά πρόσθετα που αποτρέπουν την στερεοποίησή του και προς τα πάνω, με συμπίεσή του για την αποφυγή της εξάμισής του.
- Η πολύ οικονομική προμήθειά του και η εύκολη εύρεσή του

#### Έλαια

Έλαια, για ένα εύρος θερμοκρασιών  $-10$  έως  $320^{\circ}C$ , και τηγμένα άλατα και μέταλλα χρησιμοποιούνται επίσης συχνά σε διάφορες εφαρμογές. Όμως, τα έλαια εμφανίζουν μικρότερη θερμοχωρητικότητα από το νερό, περίπου 2.3

$\text{kJ/kgK}$  και έχουν την τάση σε υψηλές θερμοκρασίες να διασπούν και να αναδιαμορφώνουν τα πτητικά προϊόντα τους. Εμφανίζουν, λοιπόν, μια αστάθεια χημική.

Τα τηγμένα άλατα εμφανίζουν μια θερμοχωρητικότητα περίπου  $1.5 \text{ kJ/kgK}$  και χρησιμοποιούνται για αποθήκευση σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα μειονεκτήματά τους είναι η εμφάνιση του φαινομένου της στερεοποίησης σε θερμοκρασίες κάτω από  $150^\circ\text{C}$  και του φαινομένου της διάβρωσης. Τα τηγμένα μέταλλα (όπως η υγρή σόδα) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ασυμπύεστη κατάσταση για θερμοκρασίες αποθήκευσης πάνω από  $760^\circ\text{C}$  με μια μέση θερμοχωρητικότητα της τάξης του  $1.3 \text{ kJ/kg K}$  με κάποια προβλήματα διαχείρισης.

#### 4.2.3 Άλλα υλικά

Για υψηλής θερμοκρασίας αποθήκευση ο σίδηρος και τα οξειδία του σιδήρου έχουν θερμικές ιδιότητες συγκρίσιμες με του νερού ανά μονάδα όγκου της αποθήκευσης. Το κόστος των υλικών αυτών μετριάζεται για μικρές σφαιρικές γεωμετρίες. Ακόμη, εφόσον ο σίδηρος και τα οξειδία του έχουν παρόμοιες θερμικές ιδιότητες, μια οξειδωση του σιδήρου από τον αέρα σε υψηλές θερμοκρασίες δεν θα επηρεάσει την απόδοση του συστήματος.

Σε αρκετές εφαρμογές χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός υγρών και στερεών υλικών για τη βελτίωση της θερμικής διαστρωμάτωσης των στερεών υλικών και της μείωσης της ποσότητας των υγρών αντίστοιχα.

Κυρίως για την αποθήκευση της θερμότητας σε κτιριακές εφαρμογές, χρησιμοποιούμε σαν αποθηκευτικά μέσα το νερό ή και κάποιο άλλο υγρό, σε υγρές θερμικές αποθήκες υπέργειες ή υπόγειες, τα χαλίκια για θερμικές κλίνες στερεών και το έδαφος, για τη διεποχιακή αποθήκευση.

Στις υγρές θερμικές αποθήκες, το πιο συχνό αποθηκευτικό μέσο είναι το νερό. Όμως, ορισμένες φορές χρησιμοποιούνται και διαλύματα ουσιών στο νερό που επιτυγχάνουν υψηλές τιμές θερμοχωρητικότητας, όπως το διάλυμα silical-water.

Το υγρό αποθηκευτικό μέσο μπορεί να θερμαίνεται είτε από την ηλιακή ενέργεια είτε από κάποια θερμική αντίσταση είτε από κάποιο σύστημα θέρμανσης με καύσιμο.

#### 4.2.4 Υγρή θερμική αποθήκη

Οι υγρές θερμικές αποθήκες, υπέργειας αποθήκευσης, διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

1. Υγρές θερμικές αποθήκες ομοιόμορφης θερμοκρασίας
2. Θερμικά διαστρωματωμένες αποθήκες

Πριν, όμως εξετάσουμε τη λειτουργία των υγρών αποθηκών, πρέπει να αναφερθούμε σε ένα καίριο ζήτημα για την αποδοτική λειτουργία αυτών, τις διαστάσεις τους.

Η διαστασιολόγηση μιας αποθήκης θερμικής ενέργειας περιλαμβάνει το είδος και την ποσότητα του αποθηκευτικού μέσου ώστε να διαχειρίζεται μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας, τη μόνωση, η οποία πρέπει να οδηγεί στην αποδοτική λειτουργία της αποθήκης, τα χαρακτηριστικά μεγέθη της αποθήκης και την διερεύνηση της οικονομικής βιωσιμότητάς της μέσα στο ενεργειακό σύστημα στο οποίο υφίσταται.

Η αισθητή θερμότητα αποθήκευσης δίνεται από τη σχέση

$$Q_s = (\rho_s \cdot C_{ps}) \cdot V \cdot \Delta T \quad (5)$$

Όπου:

$\rho_s C_{ps}$ : η θερμοχωρητικότητα του υγρού μέσου αποθήκευσης

$V$  : ο όγκος του υγρού

$\Delta T$  : η διαφορά θερμοκρασίας του υγρού, πριν και μετά την πρόσδοση θερμότητας

Ακόμη αν  $Q_h$  οι ημερήσιες ανάγκες σε θερμότητα και  $Q_{sd}$  η ημερήσια αισθητή θερμότητα αποθήκευσης και  $T$  η επιθυμητή διάρκεια αποθήκευσης θερμότητας σε ημέρες, τότε ο απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής θα είναι :

$$V_s = \frac{Q_h \cdot T}{Q_{sd}} \quad (6)$$

Ειδικότερα, στην περίπτωση που η θέρμανση των χώρων και του νερού χρήσης γίνεται με χρήση ηλιακών συλλεκτών, ο απαιτούμενος όγκος δεξαμενής αποθήκευσης είναι:

$$V_s = \frac{\{[(UA + W_i \cdot Cp_i) + (UA)_s] \cdot F \cdot \theta + Q_w\}}{[(\rho_s C_{ps}) \cdot \Delta T \cdot (1 - \varepsilon)]} \quad (7)$$

όπου

$UA$  : παράγων θερμικού φορτίου του κτιρίου (θερμικές απώλειες) (kJ/(day°C))

$W_i C_{p_i}$  : παράγων θερμικού φορτίου λόγω διεύθυνσης αέρα (απώλειες αερισμού) (kJ/(day°C))

$(UA)_s$  : Παράγων θερμικού φορτίου δεξαμενής αποθήκευσης (θερμικές απώλειες δεξαμενής) ( $\text{kJ}/(\text{day}^\circ\text{C})$ )

F : Κλάσμα ημερών του μήνα, κατά τη διάρκεια των οποίων η μονάδα αποθήκευσης καλείται να αποδώσει ενέργεια (συνήθως 1/30 ή 2/30)

$\theta$  : Μέσος αριθμός βαθμοημερών, κατά τη διάρκεια των οποίων οι συλλέκτες συλλέγουν θερμότητα ( $^\circ\text{Cday}$ )

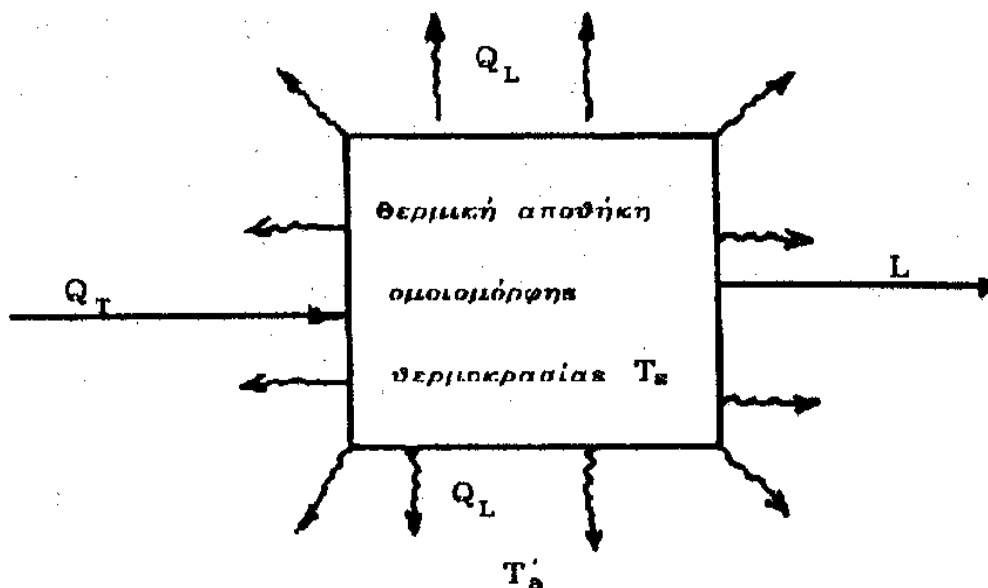
$Q_w$  :Συνολικό θερμικό φορτίο ζεστού νερού που θα πρέπει να αποδώσει το αποθηκευτικό σύστημα κατά τη διάρκεια της απαιτούμενης περιόδου (kJ)

$\Delta T$  :Η διαφορά θερμοκρασίας στην αποθηκευτική δεξαμενή

$\epsilon$  :Το ποσοστό κενού χώρου κατά την πλήρωση της δεξαμενής, το οποίο είναι 0 για δεξαμενές με υγρό, 0, 35- 0, 45 για θερμικές κλίνες στερεών και 0, 25-0, 45 για δεξαμενές που περιέχουν κάψουλες με υλικά που αλλάζουν φάση, για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας).

#### 4.2.5 Υγρή αποθήκη ομοιόμορφης θερμοκρασίας

Οι υγρές αποθήκες των οποίων η θερμοκρασία σε οποιοδήποτε σημείο τους είναι ίδια καλούνται υγρές αποθήκες ομοιόμορφης θερμοκρασίας. Η διατήρηση ίδιας θερμοκρασίας σε κάθε σημείο καθίσταται πρακτικά δυνατή μόνο με υγρό αποθηκευτικό μέσο. Όταν προσδίδεται ενέργεια σε μια υγρή αποθήκη ομοιόμορφης θερμοκρασίας, η θερμοκρασία της ανεβαίνει σχετικά αργά σε σχέση με μια θερμικά διαστρωματωμένη, αλλά πρακτικά ομοιόμορφα για όλο το υγρό μέσο.



Σχήμα 10 :Θερμική υδάτινη αποθήκη, με ομοιόμορφη θερμοκρασία αποθήκευσης του εργαζόμενου μέσου

Έστω ότι σε χρόνο  $dt$  η θερμοκρασία της αποθήκης μεταβάλλεται κατά  $dT_s$ . Το ενεργειακό ισοζύγιο της αποθήκης θα είναι :

$$(m_s C_{p_s}) \cdot dT_s = (Q_T - L - Q_L) dt \quad (8)$$

όπου:

$m_s$  : η μάζα του αποθηκευτικού μέσου

$C_{p_s}$  : η ειδική θερμοχωρητικότητα του αποθηκευτικού μέσου

$Q_T dt$  : η συνολική ενέργεια που προσδίδεται στην αποθήκη σε χρόνο  $dt$

$L dt$  : το χρήσιμο θερμικό φορτίο ή η ενέργεια που απομαστεύεται στον ίδιο χρόνο  $dt$

$Q_L dt$  : οι θερμικές απώλειες της αποθήκης στον ίδιο χρόνο  $dt$ .

Οι στιγμιαίες θερμικές απώλειες είναι :

$$Q_L = (UA)_s (T_s - T'_a) \quad (9)$$

και για χρόνο  $t$ ,

$$Q_{L,t} = (UA)_s (\bar{T}_s - \bar{T}'_a) t \quad (10)$$

Όπου:

$Q_{L,t}$  : οι συνολικές απώλειες σε χρόνο  $t$

$(UA)_s$  : το γινόμενο της επιφάνειας της αποθήκης επί τον συντελεστή θερμοπερατότητας αυτής

$\bar{T}_s$  : η μέση θερμοκρασία της αποθήκης στο χρόνο  $t$

$\bar{T}'_a$  : η μέση θερμοκρασία του αέρα γύρω από την αποθήκη στον ίδιο χρόνο  $t$ .

Συνεπώς, το ενεργειακό ισοζύγιο της αποθήκης διαμορφώνεται ως εξής:

$$(m_s C_{p_s}) \frac{dT_s}{dt} = Q_T - L - (UA)_s (T_s - T'_a) \quad (11)$$

Εάν θεωρήσουμε ότι σε ένα μικρό χρονικό διάστημα  $t$ , η τελική θερμοκρασία της αποθήκης γίνεται  $T_s^+$ , τότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$(m_s C_{p_s}) \frac{(T_s^+ - T_s)}{dt} = Q_T - L - (UA)_s (T_s - T_a') \quad (12)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η γενική εξίσωση της αποθήκης ομοιόμορφης θερμοκρασίας και από αυτήν είναι δυνατόν να υπολογιστεί η νέα θερμοκρασία  $T_s^+$ , βηματικά.

#### 4.2.6 Υγρή αποθήκη διαστρωματωμένης θερμοκρασίας

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι υγρές αποθήκες που παρουσιάζουν μια θερμοκρασιακή κλίση από το σημείο εισόδου του υγρού σε αυτές μέχρι το σημείο εξόδου του υγρού από αυτές. Δηλαδή, το θερμό υγρό εισόδου στη δεξαμενή δεν αναμιγνύεται με το κρύο υγρό εξόδου από αυτήν. Αυτό πρακτικά συμβαίνει όταν η εισαγωγή του θερμού υγρού γίνεται από το πάνω μέρος της αποθήκης και η εξαγωγή προς την πηγή θέρμανσης από το κάτω μέρος αυτής και όταν η ταχύτητα του υγρού είναι αρκετά μικρή, ώστε να μην αναμιγνύεται το θερμό υγρό εισαγωγής στην αποθήκη με το κρύο υγρό που εξέρχεται για την πηγή θέρμανσης.

Αυτό επιτυγχάνεται βέβαια, γιατί το θερμό υγρό, έχοντας μικρότερο ειδικό βάρος από το κρύο παραμένει στην κορυφή της αποθήκης ενώ το κρύο στον πυθμένα της. Για να παραμείνει μια αποθήκη θερμικά διαστρωματωμένη πρέπει επίσης το θερμό υγρό που εισάγεται σε αυτήν να κατεβαίνει κάθε φορά στο στρώμα υγρού που έχει την ίδια με αυτό θερμοκρασία. Αυτό γίνεται, αλλά όπως το υγρό κατεβαίνει για να πάει στο θερμοκρασιακό στρώμα του παρασύρει μαζί του και νερό του ανώτερου και θερμότερου στρώματος και έτσι η θερμική διαστρωμάτωση δεν μπορεί να είναι τέλεια. Κατά αυτόν τον τρόπο φορτίζεται η υγρή θερμικά διαστρωματωμένη αποθήκη.

Η εκφόρτισή της γίνεται με τον ακριβώς αντίθετο τρόπο, δηλ. θερμό υγρό από την αποθήκη φεύγει προς την κατανάλωση από το πάνω μέρος της και επιστρέφει κρύο στον πυθμένα για να μη διαταραχθεί η θερμική διαστρωμάτωση της αποθήκης. Πρέπει να τονίσουμε ότι η φόρτιση και εκφόρτιση της υγρής θερμικά διαστρωματωμένης αποθήκης μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα, σε αντίθεση με τη θερμική κλίση στερεών η οποία αν και θερμικά διαστρωματωμένη δεν μπορεί να φορτιστεί και να εκφορτιστεί ταυτόχρονα.

Με τη θερμική διαστρωμάτωση, λοιπόν, δημιουργείται μέσα στη δεξαμενή μια ομαλή μετάβαση από τις περιοχές που έχουν χαμηλότερη φόρτιση και υψηλότερη φόρτιση, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απώλειες λόγω της ανάμειξης των ρευμάτων με διαφορετική θερμοκρασία. Η θερμική διαστρωμάτωση σε δεξαμενές αποθήκευσης με υγρό μέσο είναι αρκετά δύσκολο να ελεγχθεί καθώς οι ποσότητες του υγρού που έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες έχουν ισχυρή τάση να αναμιγνύονται μεταξύ τους και έτσι η δεξαμενή αποκτά μια ομοιόμορφη θερμοκρασία. Πρακτικά αυτό το γεγονός μπορεί να αποσβεστεί αν η ταχύτητα εισόδου του υγρού είναι χαμηλή και εάν το υγρό εισέρχεται οριζόντια στις ανώτερες περιοχές τις δεξαμενής.

Στις θερμικές κλίνες στερεών η θερμική διαστρωμάτωση είναι ευκολότερη καθώς μπορούμε να διοχετεύσουμε το ρεύμα ρευστού που τις φορτίζει καθοδικά και κατακόρυφα στη δεξαμενή αποθήκευσης, οπότε να φορτίζουμε τις υψηλότερες περιοχές της αποθήκης, περιοχές στις οποίες έτσι και αλλιώς η θερμότητα είναι ευκολότερο να διατηρηθεί.

Η θερμική διαστρωμάτωση θεωρείται ότι αυξάνει τη θερμική απόδοση του συστήματος κατά 5-10% σε σχέση με συστήματα με δεξαμενή αποθήκευσης μη θερμικά διαστρωματωμένα και αυτό διότι η χαμηλότερη θερμοκρασιακά περιοχή του αποθηκευτικού μέσου διευκολύνεται στην είσοδό της στο σύστημα θέρμανσης, ενώ η υψηλότερη θερμοκρασιακά περιοχή λειτουργεί σαν αποθήκη ενέργειας.

Για να σχηματίσουμε μια πιο ολοκληρωμένη άποψη σχετικά με το ζήτημα της θερμικής διαστρωμάτωσης θα την προσεγγίσουμε με ένα μονοδιάστατο μοντέλο. Η δεξαμενή αποθήκευσης υποδιαιρείται σε έναν αριθμό στρωμάτων, με μια διαφορετική θερμοκρασία το καθένα. Θεωρούμε ότι το εισερχόμενο ρευστό κατευθύνεται απευθείας, ανάλογα με τη θερμοκρασία που έχει, στο εκάστοτε θερμοκρασιακό στρώμα της αποθήκης. Ακόμη, γίνεται η θεώρηση ότι η μόνη ενεργειακή συναλλαγή που πραγματοποιείται είναι ανάμεσα σε κάθε θερμοκρασιακό στρώμα και στα τοιχώματα της δεξαμενής που έχουν μέση θερμοκρασία  $T_a$ .

Έστω στρώμα J με μάζα  $M_J$  και θερμοκρασία  $T_J$ . Τότε η εξίσωση που δίνει τον ενεργειακό ισολογισμό, σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές είναι:

$$M_J \cdot C_p \cdot \frac{dT_J}{dt} = -U \cdot A \cdot (T_J - T_a) \quad (13)$$

Εάν η αρχική θερμοκρασία του στρώματος είναι  $T_{o,J}$  τότε για χρονικό διάστημα  $\Delta t$ , η αναλυτική λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης είναι :

$$(T_J - T_a) = (T_{o,J} - T_a) \cdot \exp\left(\frac{-U \cdot A \cdot \Delta t}{M_J \cdot C_p}\right) \quad (14)$$

Στις δύο παραπάνω σχέσεις με U συμβολίζεται ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας και με A η επιφάνεια, στην οποία αναφερόμαστε. Η προσέγγιση αυτή, αν και δεν περιλαμβάνει την συναλλαγή θερμότητας μεταξύ διαφόρων θερμοκρασιών δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

#### 4.2.7 Θερμική κλίνη στερεών<sup>[7]</sup>

Μια θερμική κλίνη στερεών αποτελείται από ένα σώμα θερμοαπορροφητικών στερεών, δια μέσου των οποίων διέρχεται ένα ρευστό, συνήθως αέρας, οπότε μεταφέρεται θερμότητα από το αέριο στα στερεά ή αντίστροφα. Μια ποικιλία υλικών πλήρωσης της κλίνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως λίθοι, τούβλα, κεραμικά, στερεά από τσιμέντο κλπ.

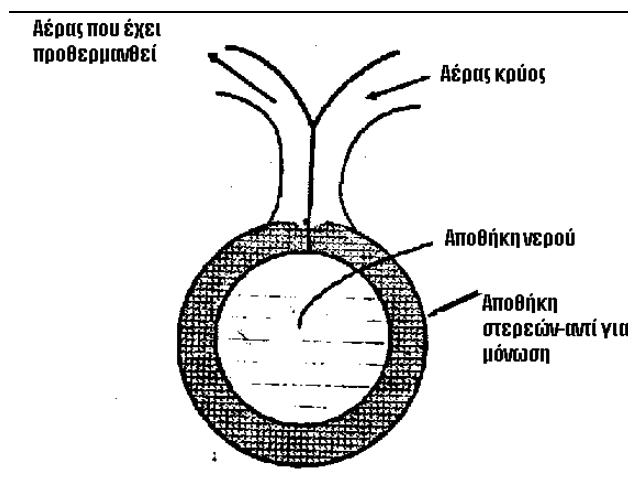


Η πιο συνήθης εφαρμογή της θερμικής κλίνης είναι σε συστήματα θέρμανσης αέρα, δηλαδή αέρας διαπερνά το υλικό της κλίνης και ανάλογα την φορτίζει ή την εκφορτίζει.

Το πλεονέκτημα της χρήσης στερεών υλικών σε αυτές τις εφαρμογές έναντι του νερού είναι η ευκολότερη χρήση τους για θερμοκρασίες άνω των 100°C.

Μία άλλη χρήση της θερμικής κλίνης σε συνδυασμό με ένα ηλιακό σύστημα περιγράφεται παρακάτω. Θερμό νερό από τους ηλιακούς συλλέκτες εισάγεται στην κορυφή μιας δεξαμενής νερού, βυθίζεται καθώς κρύνει και τελικά εξέρχεται από τη δεξαμενή για να εισέλθει και πάλι στους ηλιακούς συλλέκτες. Η δεξαμενή νερού περιβάλλεται από χαλίκια -στερεά σώματα- διαμέσου των οποίων κυκλοφορεί αέρας ο οποίος θερμαίνεται για τη θέρμανση του εκάστοτε χώρου. Η δεξαμενή νερού μαζί με τα χαλίκια που την περιβάλλουν αποτελούν το περιεχόμενο ενός άλλου καλά μονωμένου δοχείου. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, που είναι γνωστή σαν η μέθοδος του Harry Thomason, είναι η αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας στον αέρα λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητας του νερού και της εκτεταμένης επιφάνειας που παρουσιάζει το δοχείο με τα χαλίκια.

Μια άλλη χρήση συνδυασμένης θερμικής κλίνης στερεών και υδάτινης αποθήκης περιγράφεται στο επόμενο παράδειγμα. Η υδάτινη αποθήκη περιβάλλεται από μια θερμική κλίση στερεών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 11: Κυλινδρική αποθήκη ενέργειας, με συνδυασμό νερού και στερεών.

Η βασική ιδέα βασίζεται σε ένα σπίτι που θερμαίνεται από ηλιακούς συλλέκτες και οι θερμικές απώλειες ανακτώνται από το νερό που περιβάλλει την κλίση.

Οι θερμικές κλίνες στερεών ακολουθούν τον τρόπο λειτουργίας όλων των θερμικών αποθηκών και έτσι μπορούν να βρεθούν σε τρεις καταστάσεις:

- Φόρτιση της κλίνης
- Εκφόρτιση της κλίνης
- Αναμονή μεταξύ των δύο παραπάνω καταστάσεων

Αρχικά οι θερμικές κλίνες χρησιμοποιήθηκαν, γιατί παρουσιάζουν ως θερμικοί εναλλάκτες μεγάλο λόγο επιφάνειας συναλλαγής προς τον όγκο τους, γεγονός που είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

Τα πλεονεκτήματα στη χρήση των θερμικών κλινών είναι τα ακόλουθα:

- Υψηλός συντελεστής θερμικής μεταφοράς μεταξύ του αέρα και του στερεού, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα τη θερμική διαστρωμάτωση της κλίνης
- Μικρή θερμική αγωγιμότητα της κλίνης, όταν δεν υπάρχει ροή αέρα
- Μικρό κόστος του αποθηκευτικού στερεού όσο και του δοχείου που το περιέχει.
- Απλός σχεδιασμός εγκαταστάσεων

Παρολαυτά οι θερμικές κλίνες έχουν και τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- Στα συστήματα αέρα, παρουσιάζεται μεγάλη πτώση πίεσης του αέρα όταν διέρχεται μέσα από τη θερμική κλίνη, πράγμα που απαιτεί μεγάλης ισχύος ανεμιστήρες που δαπανούν σημαντικά ποσά ενέργειας κατά τη λειτουργία τους.
- Ο όγκος της κλίνης είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερος από τον όγκο της ισοδύναμης θερμικά υδάτινης αποθήκης που αυξάνει σημαντικά το κόστος εγκατάστασης αφού χρειαζόμαστε περισσότερο χώρο
- Υπάρχουν προβλήματα κατά την λειτουργία, που είναι συνδεδεμένα με τον καλό καθαρισμό του στερεού υλικού της αποθήκης από σκόνη επίσης έχουμε προβλήματα υγρασίας, αποχέτευσης κλπ.
- Η πυκνότητα ενέργειας είναι χαμηλή
- Ο χρόνος αποθήκευσης είναι μικρός
- Υπάρχει μικρή δυνατότητα μεταφοράς της θερμικής ενέργειας
- Εμφανίζονται προβλήματα όσον αφορά την αντοχή των υλικών ιδιαίτερα λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών

Οι θερμικές κλίνες στερεών, που είναι γνωστές και σαν θερμοσυσσωρευτές, εφαρμόζονται κυρίως σε συστήματα αέρα. Οι βασικές αρχές για την αποτελεσματική λειτουργία τους είναι:

- Ο αέρας θα πρέπει να λειτουργεί στους θερμοσυσσωρευτές κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και
- Κατά τη φάση φόρτισης του συστήματος ο αέρας πρέπει να ρέει προς την κάτω πλευρά του θερμοσυσσωρευτή.

Η τήρηση των αρχών αυτών οδηγεί στη θερμική διαστρωμάτωση εντός του θερμοσυσσωρευτή, με αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης και την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Κάθε θερμική κλίνη, ως μέσο που παίρνει ή δίνει θερμότητα, έχει ορισμένα φυσικά και θερμικά χαρακτηριστικά, που βέβαια εξαρτώνται από τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά και από τα υλικά μέσα που τη συγκροτούν.

Τα κυριότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι:

- Ο όγκος και το σχήμα της θερμικής κλίνης
- Το μήκος της
- Η διατομή της

Τα φυσικά χαρακτηριστικά -εκτός των θερμικών- είναι:

- Η ισοδύναμη διάμετρος των στερεών που τη συγκροτούν
- Το ποσοστό του κενού χώρου
- Ο συντελεστής σφαιρικότητας της επιφάνειας των στερεών
- Το μέτρο ροής μάζας του ρευστού
- Η πτώση πίεσης

Τέλος, τα θερμικά χαρακτηριστικά, που είναι και τα πιο ουσιώδη είναι :

- Ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
- Ο επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
- Ο συντελεστής της ενεργού θερμικής αγωγιμότητας της θερμικής κλίνης όταν δε διαρρέεται από ρευστό.

#### 4.2.7.1 Ο όγκος και το σχήμα

Ο όγκος μιας θερμικής κλίνης χαρακτηρίζει μαζί με άλλα μεγέθη, την ικανότητά της να αποθηκεύει θερμική ενέργεια, το σχήμα της χαρακτηρίζει τις θερμικές απώλειες για ένα συγκεκριμένο τρόπο μόνωσης. Θεωρητικά το σφαιρικό σχήμα δίνει για τον ίδιο όγκο τη μικρότερη εξωτερική επιφάνεια παρουσιάζει όμως δυσκολίες στην κατασκευή και στη λειτουργία της θερμικής κλίνης. Αντί αυτού, λοιπόν, κατασκευάζονται συνήθως κυλινδρικές αποθήκες, με μήκος ανάλογο με το χώρο που προσφέρεται για την τοποθέτησή τους.

#### 4.2.7.2 Το μήκος

Το μήκος είναι ένα κρίσιμο μέγεθος, γιατί αφενός από αυτό εξαρτάται ευθέως ανάλογα η πτώση πίεσης του αέρα που διέρχεται μέσα από τη θερμική αποθήκη και για αυτό τον λόγο δεν μπορεί να μεγαλώσει πάρα πολύ, αντίθετα μάλιστα πρέπει να κρατείται σε μικρά μεγέθη, αφετέρου εισέρχεται και στους υπολογισμούς της θερμικής συμπεριφοράς της αποθήκης.

Μήκος της κλίνης νοείται η διάσταση που είναι παράλληλη της ροής του αέρα. Ορίζεται το «μήκος ηρεμίας» λ:

$$\lambda = \frac{\frac{D_s}{6(1-\varepsilon)}}{h \cdot Cp_a \cdot G_f} \quad (15)$$

Όπου:

$h$ : Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ αερίου ρεύματος και των στερεών υλικών (συντελεστής συναγωγής)

$Cp_a$ : Η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα

Για να έχουμε μια αποδοτική λειτουργία της κλίνης σαν αποθήκη θερμότητας θα πρέπει ο λόγος του πραγματικού μήκους της κλίνης προς το μήκος ηρεμίας να μεγαλύτερος από την τιμή 0,3.

#### 4.2.7.3 Η διατομή

Από τη διατομή εξαρτάται η πτώση πίεσης και υπεισέρχεται στους θερμικούς υπολογισμούς της κλίνης.

#### 4.2.7.4 Το υλικό πλήρωσης

Όσον αφορά το υλικό που πληρώνει την κλίνη, μας ενδιαφέρουν πολύ το είδος του και οι διαστάσεις του. Οι θερμικές κλίνες συνήθως πληρώνονται με χαλίκια φυσικής προελεύσεως, όπως για παράδειγμα με χαλίκια από κοίτες ποταμών. Επιδιώκεται να είναι σκληρά, με ομαλή επιφάνεια και κανονικό σχήμα, κατά προτίμηση σφαιρικό. Η βέλτιστη διάσταση των χαλικιών κυμαίνεται από 0,75 έως 1,5 ίντσες διάμετρο. Αυτή η διάσταση νοείται ως η ισοδύναμη διάμετρος της σφαίρας, η οποία είναι η διάμετρος των σφαιρικών στερεών που καταλαμβάνουν τον ίδιο όγκο και τον ίδιο αριθμό με τα πραγματικά που απαρτίζουν την κλίνη και δίνεται από τη σχέση :

$$D_{pe} = \left( \frac{6V_p}{\pi \cdot N} \right)^{1/3} = \left( \frac{6m_p}{\pi \cdot \rho_p \cdot N} \right)^{1/3} \quad (16)$$

Όπου:

$m_p$ : Η μάζα των στερεών,

$\rho_p$ : Η πυκνότητα του υλικού των στερεών

$N$ : Ο αριθμός των στερεών που απαρτίζουν την κλίνη

$V_p$ : ο όγκος των στερεών με την ισοδύναμη διάμετρο.

Ακόμη ορίζεται και η ενεργός διάμετρος, που είναι :

$$D_s = D_{pe} \cdot \phi \quad (17)$$

όπου  $\phi$  είναι ο παράγων σχήματος, ο οποίος παίρνει την τιμή 1 για σφαιρικά χαλίκια, την τιμή 0,63 για θρυμματισμένα στερεά, την τιμή 0,806 για κύβους.

Το ποσοστό του κενού χώρου,  $\varepsilon$ , ορίζεται ως ο λόγος του όγκου μεταξύ των στερεών προς το συνολικό όγκο της κλίνης και μετράται αφού ζυγίσουμε τη θερμική κλίνη πριν και μετά την πλήρωσή της με ένα ρευστό, π.χ. νερό, οπότε:

$$\varepsilon = \frac{m_w / \rho_w}{V} \quad (18)$$

Όπου:

$m_w, \rho_w$  : Η μάζα και η πυκνότητα του νερού αντίστοιχα.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι αν όλα τα στερεά είναι τέλειες σφαίρες της ίδιας διαμέτρου, το ποσοστό του κενού χώρου είναι σταθερό, ανεξάρτητο από το μέγεθος των σφαιρών εξαρτώμενο μόνο από τον τρόπο τοποθέτησής τους. Όμως, εάν διαφορετικής διαμέτρου σφαίρες αποτελέσουν μια θερμική κλίνη τότε το « $\varepsilon$ » γίνεται μικρότερο γιατί οι μικρές σφαίρες καταλαμβάνουν τα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων. Συνήθως, λοιπόν, το μέγεθος αυτό κυμαίνεται μεταξύ 0,35 και 0,45.

Ο συντελεστής σφαιρικότητας της επιφάνειας των στερεών,  $\alpha$ , είναι ο λόγος της επιφάνειας των στερεών από τα οποία αποτελείται η κλίνη προς την επιφάνεια των ισοδύναμων σφαιρών. Η εκτίμηση αυτού του συντελεστή είναι δύσκολη. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι χαλίκια από σπαστήρα έχουν συντελεστή σφαιρικότητας που ποικίλλει από 2,5 μέχρι 1,5 συναρτήσει του μεγέθους των χαλικιών, από πολύ μικρά μεγέθη μέχρι τα 50mm και για λεία θαλασσινά χαλίκια ο συντελεστής αυτός είναι 1, 5 ανεξάρτητα από το μέγεθος.

Οι συνθήκες ροής του αέρα εντός της κλίνης είναι μείζονος σημασίας για την αποδοτική της λειτουργία. Το μέτρο ροής μάζας του ρευστού ορίζεται από το λόγο της μάζας του ρευστού, που ρέει μέσα στη θερμική κλίνη ανά μονάδα χρόνου, προς τη διατομή της κλίνης.

$$G_f = 42 \cdot \rho_p \cdot Cp \cdot (1 - \varepsilon) \cdot L \quad (19)$$

Όπου:

$\rho_p$  : Η πυκνότητα των στερεών υλικών

$C_p$  : Η ειδική θερμοχωρητικότητα των στερεών υλικών

$L$  : Το μήκος της κλίνης

Ορίζεται επίσης και ο αριθμός Reynolds :

$$Re = D_s \cdot \frac{G_f}{\mu} \quad (20)$$

Όπου :

$\mu$  : η δυναμική συνεκτικότητα. του ρευστού.

#### 4.2.7.5 Πτώση Πίεσης $\Delta P$

Σε αντίθεση με έναν εναλλάκτη θερμότητας, όπου η κίνηση του ρευστού μέσα σε αυτόν ακολουθεί προκαθορισμένο δρόμο, στη θερμική κλίση το ρευστό ακολουθεί, στρίβοντας συνεχώς, τυχαία μονοπάτια, που δημιουργούνται μεταξύ των στερεών. Το μέγεθος και η κατανομή αυτών των οδεύσεων είναι συνάρτηση του σχήματος και του ποσοστού του κενού χώρου των στερεών και κάθε υπολογισμός της πτώσης πίεσης πρέπει να συμμερίζεται αυτό το γεγονός.

Για την πτώση πίεσης, έχουν προταθεί μετά από πειραματικές μετρήσεις διάφορες σχέσεις.

Για μια πρώτη προσέγγιση προτείνεται η εξής σχέση για την πτώση πίεσης,

$$\Delta P = f \cdot L \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_p \cdot \frac{V_0^2}{D_s \cdot \varepsilon^3} \quad (21)$$

Όπου:

$V_0$ , η μέση ταχύτητα του αερίου ρεύματος που είναι ίση με:

$$V_0 = \frac{G_f}{\rho_o} \quad (22)$$

με  $\rho_o$ , την πυκνότητα του αέρα σε μια θερμοκρασία της τάξης των 40°C και

$$f = \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)}{Re} + 1.75 \quad (23)$$

Η μέση ταχύτητα του αερίου ρεύματος παίρνει τιμές από 2,1 έως 10,7 m/min, με συνηθέστερες από 6,0 έως 7,6 m/min. Στην παραπάνω σχέση φαίνεται η εξάρτηση της πτώσης πίεσης από τον παράγοντα «ε».

Υπάρχουν, επίσης εξισώσεις για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης που λαμβάνουν υπόψη το συντελεστή σφαιρικότητας της επιφάνειας των στερεών, «α», αλλά και εξισώσεις που προσεγγίζουν το  $\Delta P$ , χωρίς τον παράγοντα «ε».

Η πτώση πίεσης θα πρέπει να διατηρείται στην περιοχή μεταξύ 37 και 75Pa.

Η απαιτούμενη ισχύς για την κυκλοφορία του αέρα σε Watt είναι:

$$P = 0.0226 \cdot Q \cdot \Delta P \quad (24)$$

Όπου :

Q : Η ογκομετρική παροχή του αερίου ρεύματος.

#### 4.2.7.6 Ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

Ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας,  $h_v$  (W/m<sup>3</sup>°C), μας δίνει το μέτρο της θερμότητας που περνάει από το ρευστό στα στερεά ανά κυβικό μέτρο, ανά δευτερόλεπτο και βαθμό θερμοκρασίας. Η πιο εμπειριστατωμένη, εξίσωση υπολογισμού αυτού του συντελεστή είναι :

$$\frac{h_v D_{pe}^2}{\lambda_f} = 1.45 \left( \frac{\rho_f \cdot V_0 \cdot D_{pe}}{\mu} \right)^{0.7} \quad (25)$$

Η οποία ισχύει για  $100 < \frac{\rho_f \cdot V_0 \cdot D_{pe}}{\mu} < 1000$  και όπου το « $h_v$ », εξαρτάται όχι μόνο από τα  $D_{pe}$ ,  $G_f$  αλλά και από τα χαρακτηριστικά του ρευστού  $\rho_f$ ,  $\lambda_f$ ,  $\mu$ ,

όπου  $\lambda_f$ : Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα.

#### 4.2.7.7 Επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

Ο επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h_s$  (W/m<sup>2</sup>.°C), μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$h_s = \frac{h_v \cdot D_{pe}}{6(1 - \varepsilon)\alpha} \quad (26)$$

#### 4.2.7.8 Συντελεστής ενεργού θερμικής αγωγιμότητας

Ο συντελεστής της ενεργού θερμικής αγωγιμότητας της θερμικής κλίνης όταν δε διατρέχεται από ρευστό  $\lambda_e$  (W/m°C), επεμβαίνει άμεσα στη θερμική

διαστρωμάτωση στην κλίνη, η οποία λόγω ακριβώς της θερμικής αγωγιμότητας, τείνει να αποκτήσει ομοιόμορφη θερμοκρασία. Στη θερμική αποφόρτιση της κλίνης προς το περιβάλλον, όταν αποφορτίζονται τα εξωτερικά στρώματα, μεταφέρεται θερμότητα προς αυτά από τα εσωτερικά, ανάλογη με τη θερμική αγωγιμότητα της κλίνης. Μία από τις εξισώσεις που έχουν διατυπωθεί για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους είναι:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = \left( \frac{\lambda_e}{\lambda_f} \right)_{Nu=0} + 0.707 \cdot (Nu)^{0.96} \cdot \left( \frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right)^{1.11} \quad (27)$$

όπου:

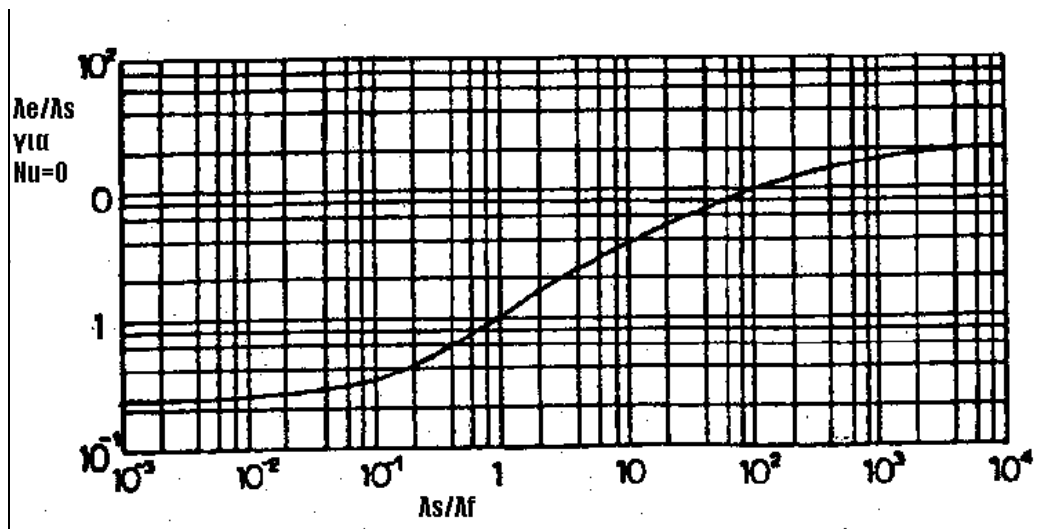
$$Nu = \frac{h_r \cdot D_{pe}}{\lambda_s} \quad (28)$$

ο τροποποιημένος συντελεστής Nu για ακτινοβολία, αφού για υψηλές θερμοκρασίες τα στερεά της κλίνης ακτινοβολούν,

$h_r$  : Ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς λόγω ακτινοβολίας σε (W/m<sup>2</sup>.°C),

$\lambda_s$ , ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των στερεών σε (W/m.°C).

Η εξίσωση (27) ισχύει όταν  $20 \leq \lambda_s/\lambda_f \leq 1000$  και  $0 \leq Nu \leq 0.3$ . Ο λόγος  $(\lambda_e/\lambda_f)_{Nu=0}$  έχει υπολογιστεί σαν συνάρτηση του λόγου  $\lambda_s/\lambda_f$  και δίνεται από το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 12: Διάγραμμα σχέσης  $(\lambda_e/\lambda_f)_{Nu=0}$ , συναρτήσεσι του  $\lambda_s/\lambda_f$



Το « $h_r$ » ισούται με :

$$h_r = \frac{\left[ \frac{0.227 \cdot (273.15 + T)}{100} \right]^3}{\frac{2}{\varepsilon} - 0.264} \quad (29)$$

Όπου :

$\varepsilon$  : ο συντελεστής εκπομπής των στερεών της κλίνης

$T$  : η επιφανειακή θερμοκρασία των στερεών σε °C.

Κατά τη μελέτη της λειτουργίας της θερμικής κλίνης μπορούμε να παρακολουθήσουμε τα εξής μεγέθη:

- τη θερμική αγωγή εντός και μεταξύ των στερεών
- την ακτινοβολία των στερεών
- τη ροή που ακολουθεί το ρευστό ανάμεσα στα στερεά.

Όταν θερμός αέρας περνάει μέσα από μια ψυχρή θερμική κλίση με ομοιόμορφη θερμοκρασία, αυξάνεται η θερμοκρασία των στρωμάτων των στερεών που βρίσκονται κοντά στην είσοδο του αέρα και βαθμιαία με μια χρονική υστέρηση, αυξάνεται η θερμοκρασία των στρωμάτων που βρίσκονται προς την έξοδο του αέρα. Η θερμική κλίση θεωρείται φορτισμένη όταν υπάρχει ομοιόμορφη υψηλή θερμοκρασία σε όλο το στρώμα των στερεών ίση με τη θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα. Η μαθηματική έκφραση αυτού του φαινομένου δόθηκε από τον Schumann και ονομάστηκε μοντέλο Schumann, με τις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Μονοδιάστατη κίνηση του ρευστού
2. Άπειρη θερμική αγωγιμότητα των στερεών σε κάθε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση της ροής του ρευστού
3. Μηδενική θερμική αγωγιμότητα των στερεών κατά τη διεύθυνση της ροής
4. Οι ιδιότητες της κλίνης παραμένουν σταθερές
5. Καθόλου θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον
6. Ομοιόμορφη αρχική θερμοκρασία της κλίνης
7. Μηδενική μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία
8. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ στερεών και αέρα είναι ομοιόμορφος

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι διαφορικές εξισώσεις για τη θερμική κλίση είναι:

$$\rho_f \cdot Cp_f \cdot \varepsilon \cdot \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} \right) = - \left( \frac{m_f \cdot Cp_f}{A} \right) \left( \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + h_v \cdot (T_p - T_f) \quad (30)$$

$$\rho_p \cdot Cp \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left( \frac{\partial T_p}{\partial t} \right) = h_v \cdot (T_f - T_p) \quad (31)$$

Όπου :

$Cp_f$  : Ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού

$T_f$  : Η θερμοκρασία του ρευστού

$t$  : Χρόνος

$m_f$  : Μέτρο ροής του ρευστού

$x$  : Μήκος κλίνης

$T_p$  : Θερμοκρασία των στερεών της κλίνης

$\varepsilon$  : Συντελεστής εκπομπής των στερεών της κλίνης

Εάν το ρευστό είναι αέρας ο όρος  $\rho_f \cdot Cp_f \cdot \varepsilon \cdot \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} \right)$  μπορεί να αγνοηθεί.

Επίσης αν είναι

$$NTU = \frac{h_v \cdot A \cdot L}{m_f \cdot Cp_f} \quad (32)$$

ο αριθμός των μεταφερόμενων μονάδων και

$$\Theta = \frac{t \cdot m_f \cdot Cp_f}{\rho_f \cdot Cp_f \cdot (1 - \varepsilon) \cdot A \cdot L} \quad (33)$$

ο αδιάστατος χρόνος οι παραπάνω εξισώσεις γίνονται:

$$\left( \frac{\partial T_f}{\partial x / L} \right) = NTU \cdot (T_p - T_f) \quad (34)$$

$$\left( \frac{\partial T_p}{\partial \Theta} \right) = NTU_v \cdot (T_f - T_p) \quad (35)$$

Για τις ηλιακές εφαρμογές όπου η επαναληπτική διαδικασία γίνεται πολλές φορές το χρόνο, οι παραπάνω εξισώσεις δεν είναι χρήσιμες. Αντί αυτών έχουν προταθεί διάφορες αριθμητικές λύσεις από πολλούς μελετητές.

#### 4.2.8 Εκτίμηση των θερμικών απωλειών

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μέσω της αισθητής θερμότητας είναι η εκτίμηση των απωλειών θερμότητας της εγκατάστασης, ώστε να επιλεγούν τα κατάλληλα μονωτικά υλικά, για να εξασφαλίσουμε όσο περισσότερο γίνεται την υψηλή θερμοκρασία του αποθηκευτικού μέσου κατά το στάδιο της αναμονής της αποθήκης.

Σύμφωνα με το U.S. Department of Housing and Urban Development ορίζεται ότι η αποθηκευτική μονάδα, όταν πρόκειται για δεξαμενή αποθήκευσης ενέργειας θα πρέπει να μονώνεται έτσι, ώστε οι θερμικές απώλειες εντός ενός 24ώρου να μην ξεπερνούν το 10% της αποθηκευτικής ικανότητας της δεξαμενής. Οι προδιαγραφές του Sheet Metal and Air Conditioning Contractor's Association είναι πιο αυστηρές και ορίζουν πως οι απώλειες της θερμικής αποθήκευσης πρέπει να περιορίζονται στο 2% της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας της δεξαμενής εντός ενός 12ώρου.

Αφού, λοιπόν, έχει οριστεί το μέγιστο ποσοστό θερμικών απωλειών  $f_0$ , υπολογίζεται από την επόμενη σχέση ο παράγων θερμικών απωλειών της μονάδας αποθήκευσης  $(UA)_s$  σε  $\text{kJ/h}^\circ\text{C}$ .

$$\exp\left[-\frac{(UA)_s \cdot t_0}{(m \cdot Cp)_s}\right] = 1 - f_0 \frac{T_0 - T_{\min}}{T_0 - T_a} \quad (36)$$

Όπου:

$(mCp)_s$ : Το γινόμενο της μάζας του αποθηκευτικού μέσου επί την ειδική θερμοχωρητικότητα του σε  $\text{kJ}/^\circ\text{C}$

$t_0$ : Θεωρούμενη χρονική περίοδος σε h

$f_0$ : Επιθυμητό ποσοστό θερμικών απωλειών

$T_0$ : Αρχική θερμοκρασία δεξαμενής αποθήκευσης,  $^\circ\text{C}$

$T_a$ : Μέση θερμοκρασία δεξαμενής αποθήκευσης,  $^\circ\text{C}$

Η Εξ.36 μπορεί να απλοποιηθεί υπό ορισμένες προϋποθέσεις. Εάν το ποσοστό  $f_0$  κυμαίνεται μεταξύ 2% και 5% και λαμβάνοντας υπόψη ότι η ικανότητα θερμικής αποθήκευσης είναι :

$$Q_s = (m_s Cp_s)(T_0 - T_{\min}) \quad (37)$$

ο συντελεστής  $U_s$  δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$U_s = \frac{\left( \frac{f_0 \cdot Q_s}{A_s \cdot t_0} \right)}{T_0 - T_a} \quad (38)$$

Μια απλούστερη σχέση, η οποία καλύπτει τις περισσότερες περιπτώσεις δεξαμενών, όπως π.χ. στις υδάτινες αποθήκες είναι :

$$Q_L = \lambda \cdot S \cdot \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (39)$$

Όπου:

$Q_L$  : Οι θερμικές απώλειες σε kcal/h

$\lambda$  : Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε kcal/m.h.°C

$S$  : Η επιφάνεια σε m<sup>2</sup>

$T_1$  : Η μέση ενεργός θερμοκρασία μέσου αποταμιεύσεως σε °C

$T_2$  : Η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε °C

$d$  : Το πάχος της μόνωσης σε m

Η εκτίμηση των θερμικών απωλειών με την Εξ.39 γίνεται με την παραδοχή ότι όλη η ποσότητα του αποθηκευτικού μέσου, εντός της δεξαμενής έχει την ίδια θερμοκρασία, τη μέση ενεργό θερμοκρασία.

Με τον υπολογισμό του  $U_s$  μπορούμε να επιλέξουμε το μονωτικό υλικό που θα είναι αποδοτικότερο για την εκάστοτε εφαρμογή αλλά και το πάχος αυτού.

Θα πρέπει εδώ να αναφέρουμε ότι η επιλογή της μόνωσης δεν είναι μόνο αποτέλεσμα αριθμητικών πράξεων. Καθώς η μόνωση αποτελεί έναν τρόπο για τη βελτιστοποίηση της όλης διαδικασίας αποθήκευσης, θα πρέπει να είναι οικονομικά βιώσιμη έναντι οποιουδήποτε άλλου τρόπου που προτείνεται για την αύξηση της αποδοτικότητας της εγκατάστασης.

Οι πολύ ισχυρές μονώσεις οδηγούν στην ελαχιστοποίηση των ετήσιων απωλειών θερμότητας και επομένως στην ελαχιστοποίηση του ετήσιου κόστους λειτουργίας της εγκατάστασης. Από την άλλη πλευρά, όμως, αυξάνουν κατά πολύ το συνολικό κόστος της αρχικής επένδυσης το οποίο καλείται η εγκατάσταση να αποσβέσει. Η βέλτιστη μόνωση είναι αυτή που θα ελαχιστοποιήσει τα δύο παραπάνω κόστη.

Εκτός, από το κόστος της μόνωσης, θα πρέπει να εξετάζουμε και τα παρακάτω κριτήρια για την μόνωση :

- Να έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα

- Αντοχή στη θερμοκρασία
- Υψηλή θερμοχωρητικότητα
- Διάρκεια ζωής
- Να μην επιβαρύνει το περιβάλλον με τοξικούς ρύπους ή οτιδήποτε άλλο επιβλαβές
- Να μην είναι εύφλεκτη
- Να μπορούμε εύκολα να τη μεταχειριστούμε
- Να είναι εμπορικά διαθέσιμη

Παράδειγμα μονωτικού υλικού για δεξαμενές αποθήκευσης αποτελεί η πολυουρεθάνη.

#### 4.2.9 Οι θερμικές αποθήκες στην πράξη

Αφού επιλέξουμε τον τρόπο αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας, με δεξαμενή νερού ή άλλου υγρού ή σε θερμική κλίνη στερεών, θα πρέπει να ασχοληθούμε με κάποιες δυσκολίες που μπορεί να αντιμετωπίσουμε κατά την εφαρμογή των συστημάτων αυτών. Αν για παράδειγμα επιλέξουμε μια θερμική κλίνη θα πρέπει να αντιμετωπίσουμε κάποιο ενδεχόμενο πρόβλημα χώρου, αφού η θερμική κλίνη στερεών καταλαμβάνει περίπου τρεις φορές το χώρο της υδάτινης δεξαμενής αποθήκευσης για την ίδια θερμοχωρητικότητα. Αυτό συμβαίνει γιατί η ειδική θερμοχωρητικότητα των χαλικιών, που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι μόλις το 1/5 του νερού και η πυκνότητά τους περίπου 1, 5 φορές μεγαλύτερη από αυτή του νερού.

Το μήκος μιας θερμικής κλίνης, επίσης, είναι κρίσιμο. Μεγάλο μήκος σημαίνει μεγάλη πτώση πίεσης και άρα μεγάλο ανεμιστήρα και υψηλή κατανάλωση παρασιτικής ενέργειας. Συνεπώς, όσο μεγαλώνουμε το μήκος της θερμικής κλίνης τόσο θα πρέπει να μεγαλώνει η ισοδύναμη διάμετρος των χαλικιών, για να κρατηθεί η πτώση πίεσης χαμηλή.

Στην περίπτωση των δεξαμενών με νερό σημαντικό είναι το πρόβλημα της διάβρωσης. Το νερό που προέρχεται από ένα κοινό δίκτυο ύδρευσης περιέχει άλατα και συνήθως είναι ελαφρά όξινο με αποτέλεσμα να έχει διαβρωτικό χαρακτήρα. Η διάβρωση, συνήθως αντιμετωπίζεται με ειδικές βαφές και επικαλύψεις στις δεξαμενές, με την επεξεργασία του νερού, ή με την επιλογή δεξαμενών πολυαιθυλενίου.

Ένα άλλο πρόβλημα που μπορεί να αντιμετωπίσουμε λόγω των υψηλών θερμοκρασιών αποθήκευσης είναι η διαστολή του δοχείου αποθήκευσης. Για το λόγο αυτό κατά τη διαστασιολόγηση της δεξαμενής θα πρέπει να προβλέπεται και μια αύξηση του όγκου του υλικού αποθήκευσης λόγω της διαστολής αυτού. Για τις δεξαμενές νερού αναμένεται μια αύξηση του όγκου περίπου 4%. Για την εξισορρόπηση αυτής της διαστολής μπορούμε να τοποθετήσουμε ένα δοχείο διαστολής στο κύκλωμα.

Επίσης απαιτείται προσοχή κατά την επιλογή του σχήματος αποθήκευσης, καθώς για παράδειγμα κυβικά ή παρεμφερή σχήματα παρουσιάζουν μικρή εξωτερική επιφάνεια και άρα μικρότερες θερμικές απώλειες.

#### 4.2.10 Μέτρα απόδοσης των συστημάτων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας

Η απόδοση των αποθηκευτικών συστημάτων ενέργειας και οποιασδήποτε άλλης εφαρμογής ενδεχομένως είναι το πρώτο κριτήριο στην επιλογή αυτών.

Σε μια διαστρωματωμένη δεξαμενή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας με αποθηκευτικό μέσο το νερό, οι επιστήμονες Abdoly-Rapp, θεωρούν ότι υπάρχει ένα θερμοκρασιακό όριο το οποίο θα πρέπει να μην παραβεί η μέση θερμοκρασία του νερού, ώστε να είναι το σύστημα αποθήκευσης αποδοτικό. Αν  $T_h$ , είναι η υψηλότερη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στη δεξαμενή, δηλ. η θερμοκρασία που αποκτά αμέσως μετά τη θερμική της φόρτιση, και  $T_l$ , η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία θα φτάσει το νερό της δεξαμενής, τότε η μέση θερμοκρασία του νερού θα πρέπει να είναι πάντα μεγαλύτερη ή ίση από το παρακάτω όριο:

$$\frac{T}{T_l} + 0.8(T_h - T_l) \quad (40)$$

Η τιμή  $T = T_l + 0.8(T_h - T_l)$  καλείται ελάχιστη ωφέλιμη θερμοκρασία.

Η ολική θερμότητα που μπορεί να ανακτηθεί από μια τέτοια δεξαμενή, θεωρητικά είναι :

$$Q_0 = M_T \cdot Cp \cdot (T_h - T_l) \quad (41)$$

Όπου:

$M_T$  : Η συνολική μάζα του νερού στη δεξαμενή

$Cp$  : Η θερμοχωρητικότητα του νερού

Η θερμότητα που θα αποδώσει στην πράξη μια τέτοια δεξαμενή κατά την αποφόρτισή της εξαρτάται από το χρόνο. Η διαστρωμάτωση του νερού υποβαθμίζεται με το πέρασμα του χρόνου με αποτέλεσμα αυτό να τείνει να αποκτήσει μια ομοιόμορφη θερμοκρασία, φυσικά χαμηλότερη της  $T_h$ . Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, η θερμοκρασία του νερού θα αποκτήσει την τιμή της ελάχιστης ωφέλιμης θερμοκρασίας, κάτω από την οποία το σύστημα δεν αποδίδει. Επομένως, υπάρχει και ένα χρονικό όριο για την κατάσταση αποφόρτισης της δεξαμενής,  $t_d$ .

Συνεπώς, αφού το νερό της δεξαμενής, πρακτικά ποτέ δε θα φτάσει στη θερμοκρασία  $T_l$ , η θερμότητα που θα ληφθεί κατά την αποφόρτιση αυτής θα είναι ίση με :

$$Q_d = \int_0^{t_d} m \cdot Cp \cdot |T_e(t) - T_{in}| dt \quad (42)$$

Όπου:

$m$  : Η παροχή μάζας του νερού

$T_e(t)$  : Η θερμοκρασία του νερού τη χρονική στιγμή  $t$

$T_{in}$  : Η θερμοκρασία εισόδου του νερού στη δεξαμενή

Ορίζεται, λοιπόν, ο βαθμός απόδοσης της δεξαμενής κατά την αποφόρτισης αυτής :

$$\eta_d = \frac{Q_d}{Q_0} \quad (43)$$

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, για την κατάσταση φόρτισης της δεξαμενής, η θερμότητα που αποθηκεύεται, πρακτικά στη δεξαμενή, είναι:

$$Q_c = \int_0^{t_c} m \cdot Cp \cdot |T_e(t) - T_{in}| dt \quad (44)$$

Ο χρόνος φόρτισης δεν μπορεί να υπερβαίνει ένα χρονικό όριο,  $t_c$ , πέρα από το οποίο η θερμοκρασία αποταμίευσης ξεπερνά μία τιμή, η οποία σχετίζεται με το σύστημα θέρμανσης του νερού.

Ορίζεται, τώρα, ο βαθμός απόδοσης της δεξαμενής κατά τη φόρτιση αυτής:

$$\eta_c = \frac{Q_c}{Q_0} \quad (45)$$

Για έναν πλήρη κύκλο φόρτισης και αποφόρτισης της δεξαμενής, ορίζεται το μέτρο του θερμικού βαθμού απόδοσης, ως ο λόγος :

$$\eta_{th} = \frac{Q_d}{Q_c} \quad (46)$$

Για να είναι το αποτέλεσμα της παραπάνω εξίσωσης έγκυρο, θα πρέπει οι θερμοκρασίες του νερού της δεξαμενής κατά την έναρξη της φόρτισης αυτής και κατά τη λήξη της αποφόρτισης να ταυτίζονται. Αυτή, όμως, η προϋπόθεση δύσκολα ικανοποιείται στην πράξη. Για το λόγο αυτό, αλλά και για να ληφθούν υπόψη φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που συμβαίνουν στο εσωτερικό της δεξαμενής, έχει εισαχθεί ένα άλλο μέτρο της απόδοσης της αποθήκης θερμότητας, το οποίο συμβολίζεται ως FOM, από τον όρο Figure of Merit.

$$FOM = \frac{\left[ \sum m \cdot Cp \cdot (T_{in} - T_e) dt \right]_{discharge}}{m \cdot Cp \cdot (T_{in,c} - T_{in,d})_{average}} \quad (47)$$

$T_{in} - T_e$  : Διαφορά θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του νερού

$(T_{in,c} - T_{in,d})_{average}$  : Διαφορά μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας εισόδου του νερού κατά τη φόρτιση και της μέσης θερμοκρασίας εισόδου του νερού κατά την αποφόρτιση.

Ο όρος FOM εκφράζει το λόγο της ενέργειας που ανακτάται από τη δεξαμενή κατά την αποφόρτιση προς τη μέγιστη, θεωρητικά, διαθέσιμη ενέργεια, όταν είναι πλήρως φορτισμένη.

Οι παραπάνω ορισμοί έχουν ισχύ, και για ένα σύστημα αποθήκευσης ψύξης, όπου το αποθηκευτικό μέσο σε μια δεξαμενή είναι το ψυχρό νερό.

#### 4.2.11 Διεποχιακή αποθήκευση<sup>[10]</sup>

Όπως προαναφέραμε, η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας με τη μορφή της αισθητής θερμότητας μπορεί να γίνει και για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η ενεργειακή αποθήκη που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι μια υπόγεια δεξαμενή νερού ή μια υπόγεια σπηλιά (δεξαμενή) με νερό ή το ίδιο το έδαφος, αφενός εξομαλύνει τις διακυμάνσεις στον εφοδιασμό ενός ενεργειακού συστήματος, αφετέρου αποθηκεύει αρκετή ενέργεια ώστε να καλύπτονται οι μεταβαλλόμενες ανάγκες της κατανάλωσης κατά τη διάρκεια πολλών μηνών. Επιπλέον, βελτιώνει την απόδοση των ενεργειακών μονάδων, δίνοντας τη δυνατότητα να γίνει αποδοτικότερη η εκμετάλλευση των ενεργειακών πηγών.

Οι διεποχιακές αποθήκες χαρακτηρίζονται, λοιπόν, από τη μεγάλη χρονική διάρκεια αποθήκευσης και τον μεγάλο όγκο. Αυτά τα χαρακτηριστικά τους, όμως, οδηγούν σε κάποια προβλήματα, όπως είναι οι μεγάλες θερμικές απώλειες και ο πολύ μεγάλος όγκος.

Μια συνιστώσα που πρέπει να εξεταστεί πριν την κατασκευή της θερμικής διεποχιακής αποθήκης, είναι η θερμική χωρητικότητά της. Για το λόγο αυτό πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εξής :

- Η αναμενόμενη και χρονικά μεταβαλλόμενη παραχθείσα θερμική ενέργεια
- Το μέγεθος και οι μεταβολές των ενεργειακών αναγκών
- Ο βαθμός αξιοπιστίας που πρέπει να έχει η εγκατάσταση
- Η διαθέσιμη βοηθητική ενέργεια
- Μία οικονομική μελέτη που θα καθορίζει το ποσοστό των ετήσιων ενεργειακών αναγκών που απαιτείται να καλύπτει η ενεργειακή εγκατάσταση

Τέτοιου είδους αποθήκες ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερο σε κτιριακά συγκροτήματα, αφού πρόκειται για μεγάλα ποσά



ενέργειας, και λιγότερο σε μεμονωμένα κτίρια, αφού έχουν μεγάλο οικονομικό κόστος.

Η υπόγεια δεξαμενή που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση ενός ρευστού που ζεσταίνεται ή ψύχεται από ένα σύστημα (ή και από το ίδιο το περιβάλλον) και κυκλοφορεί στο κτίριο χαρακτηρίζεται ως αποθήκη μακροταμίευσης ή διεποχιακή.

Το νερό είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μέσο αποθήκευσης σε αυτές τις αποθήκες εξαιτίας της διπλής χρήσης του για αποθήκευση θέρμανσης και ψύξης και της διπλής ιδιότητάς του σαν αποθηκευτικό μέσο αλλά και σαν μέσο μεταφοράς της ενέργειας. Ακόμη, το νερό έχει χαμηλό κόστος, είναι μη τοξικό, μη αναφλέξιμο, όχι έντονα διαβρωτικό, χημικά σταθερό και γενικά οι θερμοδυναμικές του ιδιότητες είναι γνωστές.

Το ξηρό έδαφος προσφέρεται ως υλικό και χώρος για αποθήκευση θερμικών φορτίων αλλά παράλληλα και ως καλή μόνωση φορτίων που είναι αποθηκευμένα σε μια θερμική αποθήκη μέσα σε αυτό. Το έδαφος μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους στη διαδικασία αποθήκευσης, όπως:

- σαν μόνωση αποθηκών νερού ή χαλικιών που βρίσκονται μέσα στο έδαφος
- σαν αποθήκη θερμικών φορτίων μέσα στο έδαφος με τη βοήθεια ενός θερμικού εναλλάκτη. Ο εναλλάκτης μεταφέρει θερμότητα από το σύστημα θέρμανσης προς το έδαφος κατά την περίοδο της θερμικής φόρτισης του εδάφους και αντίστροφα θερμικά φορτία από το έδαφος προς την κατανάλωση.
- σαν αποθήκη θερμικών φορτίων σε βαθιά φρέατα με νερό. Συνήθως υπάρχουν δύο φρέατα. Το νερό από το ένα φρέαρ με τη βοήθεια αντλιών περνά μέσα από το σύστημα θέρμανσης, π.χ. ηλιακούς συλλέκτες, θερμαίνεται και αποθηκεύεται στο δεύτερο φρέαρ από όπου την κατάλληλη περίοδο μεταφέρει θερμικά φορτία στην κατανάλωση και από εκεί μεταφέρεται πάλι στο πρώτο φρέαρ χαμηλής θερμοκρασίας.

Ακόμη, για τη μείωση των αναγκών σε ψύξη, σε περιοχές όπου τα υπόγεια ύδατα βρίσκονται σε χαμηλές θερμοκρασίες, κρύο νερό από το ένα φρέαρ κυκλοφορεί για να ψύξει ένα κτίριο, και ζεστό όπως επιστρέφει αποθηκεύεται στο άλλο φρέαρ, όπου θα καλύψει τις ανάγκες για θέρμανση κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Μία τέτοια λειτουργία του εδάφους σε μια κτιριακή εφαρμογή μπορεί να μειώσει τις ανάγκες σε ψύξη κατά 80% και τις ανάγκες για θέρμανση κατά 40%, και φυσικά έχει πρόσθετα περιβαλλοντικά οφέλη.

Το έδαφος θεωρείται ένα καλό αποθηκευτικό και μονωτικό ταυτόχρονα, όταν είναι ξηρό. Οι ιδιότητές του αυτές ελαττώνονται κατά πολύ όταν περιέχει υγρασία ή κινούμενα νερά και έτσι η διάχυση και απώλεια της αποθηκευόμενης θερμότητας δε γίνεται μόνο με αγωγή αλλά και με μεταφορά.

Όσον αφορά στις υδάτινες υπόγειες αποθήκες, το σχήμα τους είναι κυλινδρικό, το κάτω μέρος (πυθμένας) είναι επίπεδο, ενώ το πάνω μέρος τους (κορυφή) αποτελείται από ένα σφαιρικό θόλο. Τέτοιες αποθήκες, έχουν όγκο συνήθως πάνω από 350m<sup>3</sup>.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που παρουσιάζουν οι διεποχιακές αποθήκες είναι οι θερμικές απώλειες. Αυτές εξαρτώνται από την εξωτερική επιφάνεια, τη μόνωση και τη χρονική διάρκεια που γίνονται οι υπολογισμοί.

Έχοντας σαν κύριο στόχο τη μείωση των απωλειών η υπόγεια δεξαμενή, όταν δεν παρέχεται από την ίδια τη φύση με τη μορφή π.χ. υπόγειας σπηλιάς, κατασκευάζεται από συμπαγή οικοδομικά υλικά. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται μεγάλη οικονομία λόγω χαμηλού κόστους των υλικών, στιβαρότητα και μεγάλη διάρκεια κατασκευής.

Συχνά η υδάτινη υπόγεια θερμική αποθήκη παρουσιάζει προβλήματα που δημιουργούνται κυρίως λόγω της χρήσης του νερού ως αποθηκευτικό μέσο. Αυτά είναι :

- Η εμφάνιση διάβρωσης στο εσωτερικό της δεξαμενής
- Η ύπαρξη διαρροών

Προς αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων τα εσωτερικά τοιχώματα για παράδειγμα της υδάτινης υπόγειας δεξαμενής συνήθως καλύπτονται με μία λεπτή αδιάβροχη μεμβράνη. Ακόμη, τοποθετείται επαπτόμενα στη μεμβράνη μια διπλή στρώση από πλακάκια. Με τις στρώσεις αυτές αυξάνεται το πάχος του τοιχώματος, ελαττώνοντας τις απώλειες προς το έδαφος. Για ακόμη μεγαλύτερη στεγανότητα και μείωση των θερμικών απωλειών τα πλακάκια είναι κολλημένα μεταξύ τους με ένα υλικό που έχει ως κύριο συστατικό την πίσσα ανακατεμένη με διάφορα συνθετικά υλικά. Τέλος, ακολουθεί μία επιπλέον αδιάβροχη επένδυση για την αποφυγή των διαρροών και στη συνέχεια υπάρχει το τοίχωμα από συμπαγή οικοδομικά υλικά, που προαναφέρθηκε. Για να αποφευχθεί η υπερφόρτιση της κατασκευής, ο σφαιρικός θόλος που βρίσκεται στην κορυφή της δεξαμενής, είναι καλυμμένος με ένα ελαφρύ και συμπαγές στρώμα αργίλου.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, ο τρόπος της κατασκευής της υδάτινης διεποχιακής αποθήκης εξασφαλίζει:

- Μικρές θερμικές απώλειες προς το έδαφος
- Ασφάλεια
- Αντοχή και διάρκεια κατασκευής
- Κάθε τοίχωμα είναι κατασκευασμένο με το κατάλληλο υλικό έτσι ώστε οι μεταβολές του νερού μέσα στη δεξαμενή να μην ξεπερνούν τα όρια αντοχής του υλικού
- Πολύ ικανοποιητική συγκράτηση του νερού στο εσωτερικό της δεξαμενής.

#### 4.2.11.1 Διεποχιακή αποθήκευση με υδάτινες υπόγειες αποθήκες για Θέρμανση

Κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών το νερό ζεσταίνεται, συνήθως με τη χρήση ηλιακών συλλεκτών και αποθηκεύεται στην υπόγεια υδάτινη δεξαμενή για τη χρήση του κατά τους χειμερινούς μήνες όπου απαιτείται η θέρμανση.

Η απόδοση της θερμικής αποθήκευσης εξαρτάται από το επίπεδο της θερμοκρασίας στην οποία γίνεται η αποθήκευση και από την ποσότητα των θερμικών απωλειών.

#### 4.2.11.2 Διεποχιακή αποθήκευση με υδάτινες υπόγειες αποθήκες για ψύξη

Σε περιοχές όπου κατά τη διάρκεια του χειμώνα οι θερμοκρασίες μένουν αρκετά κοντά στο 0°C ψεκάζεται νερό σε μία δεξαμενή στην οποία η θερμοκρασία είναι ίδια με την ατμοσφαιρική, δηλ. κοντά στο 0°C, οπότε το νερό παγώνει. Αφού η δεξαμενή συμπληρωθεί, κλείνεται και μονώνεται από πάνω. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ο πάγος αφήνεται να λιώσει και το ψυχρό νερό κυκλοφορεί καλύπτοντας τις ανάγκες σε ψύξη.

Η απόδοση των διεποχιακών αποθηκών με υπόγειες δεξαμενές μπορεί να μειωθεί όταν εκδηλωθούν χημικές αντιδράσεις στα τοιχώματα των αποθηκών λόγω των θερμοκρασιών ή όταν αναμιγνύουμε νερό της υπόγειας δεξαμενής με νερό άλλης σύστασης από άλλο υδροφόρο ορίζοντα, οπότε μπορεί να υποστεί αλλαγές το πορώδες και η διαπερατότητα των τοιχωμάτων της αποθήκης αλλά και να χρειαστούν αλλαγή κάποια από τα εξαρτήματα της μονάδας αποθήκευσης, οπότε θα αυξηθεί και το λειτουργικό κόστος.

#### 4.2.11.3 Ηλιακή λίμνη<sup>[7]</sup>

Μία ακόμη μέθοδος για μεγάλης διάρκειας αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας είναι η ηλιακή λίμνη. Στην ηλιακή λίμνη συλλέγεται, αποταμιεύεται και αξιοποιείται σε μεγάλες μάζες νερού η ηλιακή ενέργεια. Οι ηλιακές λίμνες διακρίνονται ανάλογα με τη σύσταση του περιεχόμενου σε αυτές νερού σε λίμνες γλυκού ύδατος, που περιέχουν καθαρό νερό και σε λίμνες αλμυρού ύδατος, που περιέχουν διαλυμένο κάποιο αλάτι μέσα στη μάζα του νερού.

Η ηλιακή λίμνη αλμυρού ύδατος είναι μια αβαθής τεχνητή λίμνη, με προοδευτική από την επιφάνεια προς το βυθό αύξηση της περιεκτικότητάς της σε αλάτι και συνήθως ηλιοαπορροφητικό βυθό. Τα άλατα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το χλωριούχο (NaCl) νάτριο και το χλωριούχο μαγνήσιο (MgCl<sub>2</sub>). Το MgCl<sub>2</sub> παρουσιάζει σε σχέση με το NaCl το πλεονέκτημα ότι δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία στην επίτευξη σταθερών συνθηκών εντός της λίμνης. Επιπλέον, το MgCl<sub>2</sub> βρίσκεται σε πολύ μεγαλύτερη αφθονία, σαν στερεό υπόλειμμα κατά την εξάτμιση θαλασσινού νερού.

Το βάθος της λίμνης κυμαίνεται από 1-2m, και σε αυτό διακρίνουμε τρία στρώματα νερού. Το υδάτινο στρώμα επιφανείας, όπως ονομάζεται, το οποίο

έχει τη μικρότερη περιεκτικότητα σε αλάτι και συνήθως αποτελείται από φυσικό νερό. Το υδάτινο στρώμα φραγής, που έχει μια προοδευτικά αυξανόμενη – ανάλογα με το βάθος –περιεκτικότητα σε αλάτι και προφυλάσσει από τις θερμικές απώλειες προς τον αέρα το κατώτερο στρώμα. Τέλος, το κατώτερο θερμικό στρώμα, που έχει τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αλάτι - και το μεγαλύτερο ειδικό βάρος - από τα προηγούμενα αποτελεί την κύρια αποθήκη της ηλιακής ενέργειας που παγιδεύεται. Καθώς εγκλωβίζεται σε αυτό το στρώμα η ηλιακή ακτινοβολία η θερμοκρασία του διαλύματος φτάνει το σημείο ζέσεως.

Αυτή η στρωμάτωση του νερού, ιδίως του στρώματος φραγής επιτυγχάνεται κατά την πλήρωση της ηλιακής λίμνης με την προσαγωγή νερού με μικρή ταχύτητα (μέγιστη τιμή 0,12m/sec)και σε μικρά στρώματα πάχους 10-20cm προοδευτικά ελαττούμενης αλατότητας μέχρι την τελική προσθήκη καθαρού νερού στην επιφάνεια. Στη συνέχεια με την επίδραση της μοριακής διάχυσης το σύστημα αποκτά τις δύο ακραίες ζώνες, την άνω ζώνη, σχεδόν μηδενικής περιεκτικότητας σε αλάτι και την κάτω, μέγιστης περιεκτικότητας σε αλάτι και στο ενδιάμεσο δημιουργείται η ζώνη στην οποία η πυκνότητα σε αλάτι αυξάνεται σχεδόν γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα.

Ο βυθός της λίμνης είναι συνήθως βαμμένος μαύρος για να απορροφά και να αποδίδει την ηλιακή ενέργεια που φτάνει εκεί, στο θερμικό στρώμα. Ο βυθός και οι παράπλευρες επιφάνειες πρέπει να αποτελούνται από υλικά που θα παρουσιάζουν τις λιγότερες δυνατές διαρροές. Για να εμποδίσουμε τη διαρροή θερμότητας προς τη γη, ο βυθός μονώνεται όταν μετρηθούν κάτω από αυτόν μεγάλες ταχύτητες κίνησης των υπόγειων υδάτων. Οι ταχύτητες αυτές κυμαίνονται συνήθως από 1cm/έτος μέχρι 1m/ημέρα, σχετικά μικρές και για αυτό η απόφαση για τη μόνωση του βυθού εξαρτάται και από το μέγεθος της ηλιακής λίμνης. Αν η κίνηση των υπογείων υδάτων είναι μικρή, ο βυθός δε μονώνεται και η θερμότητα αποθηκεύεται και στο έδαφος κάτω από το βυθό. Η αποθήκευση αυτή στο έδαφος ισοδυναμεί σύμφωνα με κάποιους ερευνητές με νερό βάθους 1m επιπλέον.

Η επιφάνεια της λίμνης μπορεί να σκεπαστεί με ένα πλαστικό δίκτυ. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ο κυματισμός σε περίπτωση ισχυρών ανέμων που αφενός καταστρέφει τη στρωμάτωση της λίμνης, αφετέρου μειώνει το ποσοστό της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας λόγω μεγαλύτερης ανακλαστικότητας που παρουσιάζουν οι κυματισμοί στην ηλιακή ακτινοβολία.

Σε μια ηλιακή λίμνη η ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει απορροφάται από το υδάτινο σώμα κατά ποσοστό  $(1-\rho)$ , αν  $\rho$  είναι ο συντελεστής ανακλαστικότητας της επιφάνειας του νερού. Ειδικότερα, οι υπέρυθρες ακτινοβολίες απορροφώνται το πολύ στα πρώτα εκατοστά οι υπόλοιπες, όμως, διαπερνούν κατά μεγάλο μέρος το υδάτινο σώμα και απορροφώνται από το βυθό. Από το βυθό η θερμότητα διαδίδεται, με μεταφορά κυρίως, στο υπερκείμενο θερμικό στρώμα. Για το λόγο αυτό το θερμικό στρώμα παρουσιάζει μια διαρκή κίνηση και υψηλότερη θερμοκρασία αλλά λόγω μεγάλης αλατότητας δεν αναμειγνύεται με το υπερκείμενο σε αυτό στρώμα,

που θεωρείται ακίνητο. Η ανύψωση της θερμοκρασίας θεωρητικά μπορεί να φτάσει τους 90°C.

Η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου έχει προσεγγιστεί με διάφορους τρόπους. Σύμφωνα με τους ερευνητές Kishore και Joshi, θεωρώντας την ηλιακή λίμνη κάτω από σταθερές συνθήκες, η συλλεγόμενη ηλιακή ενέργεια σε μια ορισμένη χρονική στιγμή από την ηλιακή λίμνη  $Q_c$  ( $W/m^2$ ) δίνεται από τη σχέση :

$$Q_c = (1 - \rho) \cdot H \cdot \left[ 1 - \frac{U_L}{U_t} \cdot (1 - \tau\alpha) \right] - U_L \cdot \left( T_b - T_{sky} + \frac{Q_0}{h_0} \right) - U_b \cdot (T_b - T_g) \quad (48)$$

Όπου:

$\rho$  : Είναι ο συντελεστής ανακλαστικότητας της επιφάνειας του νερού στην ηλιακή ακτινοβολία  $H$

$H$  : Η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο της λίμνης ( $W/m^2$ )

$U_L$  : Ο ολικός συντελεστής απωλειών ( $W/m^2$ ) που δίνεται από τη σχέση

$$\frac{1}{U_L} = \frac{1}{U_t} + \frac{1}{h_0} \quad (49)$$

$U_t$  : Ο συντελεστής απωλειών ( $W/m^2$ ) του στρώματος επιφανείας που δίδεται από τη σχέση

$$U_t = \frac{\lambda_w}{x_2 - x_1} \quad (50)$$

με  $(x_2 - x_1)$  το πάχος του υδάτινου στρώματος φραγής σε m και  $\lambda_w$  η θερμική αγωγιμότητα του νερού σε ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

$(\tau\alpha)$  : Ο συνδυασμένος συντελεστής διαπερατότητας απορροφητικότητας του στρώματος φραγής που βρίσκεται από τη σχέση :

$$(\tau\alpha) = \int \frac{I(x)}{(x_2 - x_1)} dx \quad (51)$$

Το  $I(x)$  αντιπροσωπεύει το εναπομένον ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας σε βάθος  $x$  και η ολοκλήρωση γίνεται κατά το βάθος του στρώματος φραγής.

$T_b$  : Η θερμοκρασία σε  $^\circ C$  του κατώτερου θερμικού στρώματος

$T_{sky}$  : Η θερμοκρασία σε  $^\circ C$  του ουρανού που βρίσκεται από τη θερμοκρασία του αέρα  $T_a$  ( $^\circ C$ ) και τη μερική πίεση υδρατμών στον αέρα  $P_a$  (σε mmHg) από τη σχέση :

$$T_{sky} = (T_a + 273) \cdot [0.55 + 0.61 \cdot (Pa)^{0.5}]^{0.25} - 273 \quad (52)$$

και

$$Pa = RH \cdot \exp\left(18.403 - \frac{3885}{T_a + 230}\right) \quad (53)$$

και RH η σχετική υγρασία,

$Q_0$ : παράμετρος ( $W/m^2$ ) που δίνεται από τη σχέση

$$Q_0 = -hc \left[ \left( 1 + \frac{3885 \cdot k \cdot P_s(T_a)}{1,6(T_a + 230)^2 \cdot C_{pa} \cdot P_t} \right) \cdot (T_a - T_{sky}) - \frac{k \cdot P_s(T_a) \cdot (1 - RH)}{1,6 \cdot C_{pa} \cdot P_t} \right] \quad (54)$$

όπου είναι :

$$hc = 5,7 + 3,8 \cdot V \quad (55)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς λόγω ανέμου με V, την ταχύτητα του ανέμου σε m/sec όταν hc σε  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ,

k : Η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του νερού σε kJ/kg,

$P_s(T_a)$  : Η πίεση των υδρατμών σε κατάσταση κόρου στη θερμοκρασία  $T_a$ , σε mmHg,

$C_{pa}$  : Η θερμοχωρητικότητα του υγρού αέρα στην επιφάνεια του νερού σε kJ/kg $^\circ C$ ,

$P_t$  : Η ατμοσφαιρική πίεση σε mmHg,

$h_0$  : Ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς που ορίζεται από τη σχέση,

$$h_0 = 5,7 + hc \cdot \left[ 1 + \frac{3885 \cdot k \cdot P_s(T_a)}{1,6(T_a + 230)^2 \cdot C_{pa} \cdot P_t} \right] \quad (56)$$

$T_g$  : Η θερμοκρασία των υπόγειων υδάτων σε  $^\circ C$ .

Συνεπώς από την Εξ.48 και τις βοηθητικές, τα κλιματολογικά στοιχεία και τα στοιχεία της ηλιακής λίμνης καθορίζεται η συλλεγόμενη ενέργεια  $Q_c$  κάθε στιγμή.

Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης, καθορίζεται ως ο λόγος της συλλεγόμενης ενέργειας « $Q_c$ » προς την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια « $H$ » δηλαδή

$$\eta_c = \frac{Q_c}{H} \quad (57)$$

Οι ηλιακές λίμνες κατασκευάζονται κυρίως για θέρμανση νερού και θέρμανση συγκροτημάτων κατοικιών, αφού παρουσιάζουν χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης και την ικανότητα παραγωγής και αποθήκευσης μεγάλων ποσών ενέργειας. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι ασθενέστερη και διαρκεί λιγότερους μήνες, οπότε η αποθήκευσή της είναι μεγάλης σημασίας.

#### Παραδείγματα χρήσης ηλιακή λίμνης

- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Αφαλάτωση
- Θέρμανση νερού και χώρων (Τηλεθέρμανση και θέρμανση νερού βιομηχανικών διεργασιών)
- Ψύξη με απορρόφηση
- Γεωργικές εφαρμογές

Όμως όπως όλες οι εφαρμογές η ηλιακή λίμνη παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα που είναι:

- Η προοδευτική ελάττωση της διαφάνειας του νερού λόγω της σκόνης που μεταφέρουν μέσα στη λίμνη οι άνεμοι.
- Η μεγάλη εξάτμιση το καλοκαίρι, που εξαφανίζει το στρώμα επιφανείας που πρέπει να αναπληρώνεται.
- Η ενδεχόμενη μίξη των δύο κατώτερων υδάτινων στρωμάτων, οπότε μειώνεται η θερμοκρασία του τελευταίου.
- Πρόβλημα μεταφοράς της θερμότητας προς χρήση

#### Απόδοση της ηλιακής λίμνης (αλμυρού ύδατος)

Οι ηλιακές λίμνες (αλμυρού ύδατος) πλεονεκτούν έναντι άλλων, κυρίως των ηλιοθερμικών τεχνολογιών, χάρη :

- Στην απλότητα της κατασκευής τους
- Στην ενσωματωμένη μακρά αποθήκευση θερμότητας σε συνδυασμό με τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα
- Στο πολύ χαμηλό κόστος κατασκευής τους.

Οι εφαρμογές τους καθορίζονται από τη θερμοκρασία εξαγωγής που είναι δυνατόν να φθάνει τους 100°C.

Την απόδοση της ηλιακής λίμνης καθορίζουν κυρίως δύο παράγοντες που σχετίζονται με το ποσοστό της δεσμευόμενης ακτινοβολίας και συνεπώς της θερμικής αποθήκευσης

1. Η ενέργεια που φθάνει στον πυθμένα της λίμνης
2. Η ανάκλαση της ακτινοβολίας στην επιφάνεια της λίμνης

Η ενέργεια, που «φτάνει» στον πυθμένα της λίμνης, (στο κατώτερο στρώμα), μειώνεται με την αύξηση του βάθους της λίμνης. Αυτό οφείλεται στο ότι ένα μέρος της προσπίπτουσας στη λίμνη ακτινοβολίας απορροφάται από το διάλυμα νερού-άλατος. Επίσης, η αύξηση της περιεκτικότητας του διαλύματος σε αλάτι οδηγεί σε αύξηση της δεσμευμένης από το διάλυμα ακτινοβολίας. Βέβαια, αυτήν ακριβώς την ιδιότητα της λίμνης εκμεταλλευόμαστε. Επομένως, υπάρχει ένα βάθος, το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή και το οποίο βελτιστοποιεί την αποδοτικότητα της λίμνης. Συνήθης τιμή του βάθους είναι 1-2 m.

Αν, λοιπόν, λάβουμε υπόψη μας τους δύο παραπάνω παράγοντες, η ηλιακή ακτινοβολία που τελικά φτάνει τον θερμικό πυθμένα της όχι ρηχής ηλιακής λίμνης, κυμαίνεται σε ποσοστό 15%-25% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Αν και το ποσοστό αυτό είναι μικρό, σε σχέση με έναν ηλιακό συλλέκτη, το χαμηλό κόστος της εγκατάστασης και της λειτουργίας καθώς και ο ρόλος της λίμνης σαν αποθηκευτική μονάδα ενέργειας δημιουργούν τις συνθήκες για την επιλογή αυτής της μεθόδου σαν έναν εναλλακτικό τρόπο παραγωγής και διαχείρισης της ενέργειας.

#### **4.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας (PCM)**

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στην ιδιότητα των υλικών που αλλάζουν φάση (Phase Change Materials, PCM) να απορροφούν ή να απελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας (λανθάνουσα θερμότητα) κατά την ισοθερμοκρασιακή αλλαγή φάσης στην οποία βρίσκονται. Έτσι, η εξάτμιση, η τήξη, και η αλλαγή στην κρυσταλλική κατάσταση στερεών που, για παράδειγμα, περιέχουν νερό στους κρυστάλλους τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας.

Κατά αυτόν τον τρόπο ένα υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αποθήκη θερμότητας όταν το περίσσειμα της θερμικής ενέργειας διοχετευθεί σε αυτό έτσι ώστε να τηχθεί και το τήγμα να διατηρηθεί χωρίς απώλειες. Όταν απαιτηθεί αυτή η θερμότητα, θα ανακτηθεί από το τήγμα σε ποσότητα ίση με τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης, οπότε το τήγμα θα πήξει. Αυτό είναι δυνατό να επαναλαμβάνεται συνέχεια.

Για παράδειγμα, η αποθηκευμένη θερμότητα ενός υλικού που μεταβαίνει από μία θερμοκρασία  $T_1$  σε μια υψηλότερη θερμοκρασία  $T_2$ , αν συμβαίνει και αλλαγή φάσης αυτού σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία  $T^*$  είναι το άθροισμα της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση της στερεάς φάσης του υλικού από τη θερμοκρασία  $T_1$  στη θερμοκρασία  $T^*$  και της λανθάνουσας θερμότητας στη θερμοκρασία τήξης  $T^*$  και της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση της υγρής φάσης από θερμοκρασία  $T^*$  σε  $T_2$ :

$$Q_s = m \cdot [(T^* - T_1) \cdot C_s + f_s + (T_2 - T^*) \cdot C_l] \quad (58)$$



όπου,  $m$ , η μάζα του υλικού,  $C_s$ ,  $C_l$ , είναι οι ειδικές θερμοχωρητικότητες της στερεάς και της υγρής φάσης αυτού αντίστοιχα και,  $f_s$ , είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του υλικού.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με υλικά που αλλάζουν φάση είναι η υψηλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας ανά μονάδα μάζας σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης με αισθητή θερμότητα και το μικρό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του συστήματος, αφού η διεργασία αλλαγής φάσης γίνεται σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Επίσης, δεν υπάρχει βαθμιαία μείωση στην θερμοκρασία καθώς το υλικό αποφορτίζεται.

Γενικά είναι δυνατές οι ακόλουθες μετατροπές στην κατάσταση ενός υλικού, κατά φθίνουσα σειρά εμπλεκόμενου ποσού λανθάνουσας θερμότητας:

- Από στερεό σε αέριο
- Από υγρό σε αέριο
- Από στερεό σε υγρό

Οι πρώτες δύο μορφές αλλαγής φάσης δε χρησιμοποιούνται καθώς το βασικό τους πρόβλημα είναι ο σχηματισμός αερίου και κατά συνέπεια η σημαντική μεταβολή όγκου η οποία κάνει περισσότερο πολύπλοκη τη λειτουργία του συστήματος (δοχεία υπό πίεση κλπ.) Για αυτό η πιο συνηθισμένη διεργασία είναι η τήξη και η πήξη του μέσου αποθήκευσης.

Τα PCMs διατίθενται σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και θερμοτήτων αλλαγής φάσης. Σε πραγματικά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας η αλλαγή της φάσης του υλικού δε γίνεται σε απόλυτα σταθερή θερμοκρασία αφού τα συστήματα αυτά δε βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα εκτός από τη λανθάνουσα θερμότητα να αποθηκεύεται στο υλικό ακόμη ένα ποσό ενέργειας με τη μορφή της αισθητής θερμότητας.

Για να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό PCM, σαν αποθήκη ενέργειας, θα πρέπει, σε μια πρώτη προσέγγιση, να ικανοποιεί αυτό και ο χώρος στον οποίο θα γίνει η αποθήκευση, τα παρακάτω κριτήρια:

1. υψηλή ενθαλπία μετάβασης ανά μονάδα μάζας
2. Ικανότητα για πλήρη αντιστροφή της διαδικασίας
3. Ικανή θερμοκρασία μετάβασης από τη μια φάση στην άλλη
4. χημική ισορροπία και σταθερότητα με τον αποθηκευτικό χώρο
5. ελάχιστη αλλαγή όγκου με την αλλαγή φάσης
6. μη τοξικότητα
7. χαμηλό κόστος

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή αυτής της μεθόδου αποθήκευσης είναι η μετατροπή του νερού σε πάγο. Έτσι, τα συστήματα ψύξης που εμπεριέχουν την παραγωγή και αποθήκευση πάγου έχουν ένα εξαιρετικό πλεονέκτημα

όσον αφορά τις διαστάσεις των μονάδων των ψυκτικών μηχανημάτων. Αυτό είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποθήκευσης ενέργειας, ο μικρότερος όγκος του ενεργειακού συστήματος σε σχέση με τις άλλες μεθόδους αποθήκευσης.

Αυτά τα συστήματα προσφέρουν μεγαλύτερη χωρητικότητα θερμότητας από την αποθήκευση σε υλικά με απλή άνοδο της θερμοκρασίας. Με τα συστήματα αυτά, επίσης, έχουμε τη δυνατότητα να τροφοδοτούμε θερμότητα με σταθερή θερμοκρασία. Στην αποθήκευση με τήξη χρησιμοποιούμε χημικές ενώσεις με μεγάλη θερμότητα τήξης.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Οργανικά
2. Ανόργανα

Τα οργανικά υλικά περιλαμβάνουν τις εξής υποκατηγορίες:

- Εύτηκτα (συγκεκριμένη και μοναδική θερμοκρασία αλλαγής φάσης)
- Μίγματα (επιδέχονται αλλαγές στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης με την προσθήκη άλλων ουσιών)

Τέτοια οργανικά μίγματα είναι τα μίγματα των παραφινών, που ουσιαστικά είναι μίγματα αλκανίων και τα μίγματα των λιπαρών οξέων. Τα παραφινούχα μίγματα συναντώνται τόσο εμπορικά όσο και σε ερευνητικές δραστηριότητες.

Από την άλλη πλευρά τα ανόργανα υλικά χωρίζονται σε:

- Εύτηκτα (συγκεκριμένη και μοναδική θερμοκρασία αλλαγής φάσης)
- Μίγματα (επιδέχονται αλλαγές στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης με την προσθήκη άλλων ουσιών)

Ανόργανα μίγματα αποτελούν τα ένυδρα άλατα.

Συγκρίνοντας τις δύο μεγάλες κατηγορίες των οργανικών και ανόργανων PCM προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

<b>Πίνακας 3: Οργανικά και Ανόργανα PCM ,Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα</b>	
<i>Οργανικά PCM</i>	<i>Ανόργανα PCM</i>
<i>Πλεονεκτήματα</i>	<i>Πλεονεκτήματα</i>
<i>Μη διαβρωτικά</i>	<i>Μεγαλύτερη ενθαλπία αλλαγής φάσης</i>
<i>Ελάχιστη ή καθόλου υπόψυξη</i>	
<i>Χημική και θερμική σταθερότητα</i>	
<i>Μειονεκτήματα</i>	<i>Μειονεκτήματα</i>
<i>Χαμηλότερη ενθαλπία αλλαγής φάσης</i>	<i>Υπόψυξη</i>
<i>Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα</i>	<i>Διάβρωση</i>
<i>Εύφλεκτα</i>	<i>Διαχωρισμός φάσεων</i>
	<i>Απομόνωση φάσεων, έλλειψη θερμικής σταθερότητας</i>

Παρατίθεται ένας πίνακας με μερικά υλικά που έχουν μελετηθεί για τη χρήση τους σαν PCM και κάποιες από τις βασικές ιδιότητές τους.

<b>Πίνακας 4: Ιδιότητες PCM</b>				
<i>Μίγμα</i>	<i>Σημείο τήξεως (°C)</i>	<i>Θερμότητα τήξεως (Kj/kg)</i>	<i>Θερμική αγωγιμότητα (W/m K)</i>	<i>Πυκνότητα (kg/m<sup>3</sup>)</i>
<b>Ανόργανα</b>				
<i>H<sub>2</sub>O</i>	<i>0</i>	<i>333</i>	<i>0,612 (υγρό, 20°C)</i>	<i>998 (υγρό, 20°C) 917 (στερεό, 0°C)</i>
<i>MgCl<sub>2</sub>•6H<sub>2</sub>O</i>	<i>117</i>	<i>168, 6</i>	<i>0,570 (υγρό, 120°C) 0,694 (στερεό, 90°C)</i>	<i>1450 (υγρό, 120°C) 1569 (στερεό, 20°C)</i>
<i>Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>•6H<sub>2</sub>O</i>	<i>89</i>	<i>162, 8</i>	<i>0,490 (υγρό, 95°C) 0,611 (στερεό, 37°C)</i>	<i>1550 (υγρό, 94°C) 1636 (στερεό, 25°C)</i>
<i>Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>•6H<sub>2</sub>O</i>	<i>36</i>	<i>146, 9</i>	<i>0,464 (υγρό, 39, 9°C)</i>	<i>1828 (υγρό, 36°C)</i>

$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	27	190, 8	0,540 (υγρό, 38,7°C) 1,088 (στερεό, 23°C)	1937 (στερεό, 24°C) 1562 (υγρό, 32°C) 1802 (στερεό, 24°C)
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Glauber's Salt)	32	254	0,544	1485 (στερεό)
<b>Οργανικά</b>				
Παραφίνη	64	173, 6	0, 164 (υγρό, 63,5°C) 0,346 (στερεό, 33,6°C)	790 (υγρό, 65°C) 916 (στερεό, 24°C)
Πολυγλυκόλη E400	8	99, 6	0, 187 (υγρό, 38, 6°C) –	1125 (υγρό, 25°C) 1228 (στερεό, 3°C)
Πολυγλυκόλη E600	22	127, 2	0, 189 (υγρό, 38, 6°C) –	1126 (υγρό, 25°C) 1232 (στερεό, 4°C)
Παραφίνη C <sub>18</sub>	28	244	0,148 (υγρό, 40°C) 0,358 (στερεό, 25°C)	0, 774 (υγρό, 70°C) 0, 814 (στερεό, 20°C)
<b>Λιπαρά οξέα</b>				
Στεαρικό οξύ	69	202, 5	0,172 (υγρό, 70°C)	848 (υγρό, 70°C) 965 (στερεό, 24°C)
Παλμειτικό οξύ	64	185, 4	0,162 (υγρό, 68, 4°C)	850 (υγρό, 65°C) 989 (στερεό, 24°C)
Capric acid	32	152, 7	0,153 (υγρό, 38, 5°C)	850 (υγρό, 65°C) 989 (στερεό, 24°C)
Caprylic acid	16	148, 5	0,149 (υγρό, 38, 6°C)	901 (υγρό, 30°C) 981 (στερεό, 13°C)
<b>Αρωματικά</b>				
Ναφθαλίνη	80	147, 7	0,132 (υγρό, 83,3°C) 0,341 (στερεό, 49,9°C)	976 (υγρό, 84°C) 1145 (στερεό, 20°C)

Τα σημεία τήξεως που απαιτούνται να έχουν τα επιλεγθέντα υλικά αποθήκευσης ενέργειας για κάποιες εφαρμογές είναι :

- Ηλιακά συστήματα θέρμανσης 25°C – 50°C
- Παθητικά ηλιακά συστήματα 21°C – 25°C
- Αποθήκευση ψύξης 4,5°C – 18°C.
- Παθητική αποθήκευση θερμότητας 16 °C -28 °C

Υλικά αλλαγής φάσης με χαμηλό σημείο τήξης από 0°C-150°C παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τη θέρμανση και την ψύξη ενός χώρου ενώ PCMs με υψηλότερο σημείο τήξης για εφαρμογές όπως εγκαταστάσεις παραγωγής ρεύματος, συστήματα παραγωγής ατμού και άλλα.

Το κυριότερο κριτήριο για την επιλογή του υλικού που θα λειτουργήσει σαν αποθηκευτικό μέσο στο εκάστοτε σύστημα αποθήκευσης ενέργειας είναι το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του. Όμως, για την αποδοτική λειτουργία ενός τέτοιου υλικού σε ένα σύστημα αποθήκευσης θα πρέπει με την επιλογή του να ικανοποιούνται τα περισσότερα, αν όχι όλα, από τα παρακάτω κριτήρια.

#### 4.3.1 Θερμοδυναμικά κριτήρια

- Να έχει σημείο τήξεως στην επιθυμητή θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας
- Να έχει υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξεως ανά μονάδα μάζας, ώστε για την αποθήκευση μιας δεδομένης ποσότητας ενέργειας να χρησιμοποιείται μικρή ποσότητα από το υλικό
- Να έχει υψηλή πυκνότητα, ώστε να καταλαμβάνει μικρό όγκο.
- Να έχει υψηλή ειδική θερμότητα ώστε η αποθήκευση της ενέργειας να γίνεται και μέσω της αισθητής θερμότητας.
- Να έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα και στις δύο φάσεις ώστε μικρές θερμοκρασιακές διαφορές να απαιτούνται για τη φόρτιση και εκφόρτιση του υλικού.
- Να τήκεται πλήρως ώστε η υγρή και η στερεή φάση να έχουν την ίδια σύσταση.(Σε αντίθετη περίπτωση η διαφορά στις πυκνότητες ανάμεσα στις δύο φάσεις θα προκαλέσει το διαχωρισμό τους και κατά συνέπεια αλλαγή στη χημική σύσταση του υλικού.)
- Να έχει μικρές μεταβολές στον όγκο κατά την αλλαγή φάσης.
- Να μην εμφανίζει υπόψυξη (Subcooling)

#### 4.3.2 Κινητικά κριτήρια

- Να εμφανίζει μικρή ή καθόλου υπόψυξη κατά τη διάρκεια της πήξης του.(αυτό επιτυγχάνεται όταν έχουμε υψηλούς ρυθμούς δημιουργίας πυρήνων και ανάπτυξης των σχηματιζόμενων κρυστάλλων αλλά και με την προσθήκη κάποιου μέσου πυρήνωσης).

#### 4.3.3 Χημικά κριτήρια

- Να είναι χημικά σταθερό
- Να μην αποσυντίθεται χημικά, ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλη διάρκεια ζωής
- Να μην διαβρώνει τα υλικά στα οποία θα αποθηκευτεί
- Να μην είναι τοξικό, εύφλεκτο, ρυπογόνο και να μην εκρήγνυται

#### 4.3.4 Τεχνικά κριτήρια

- Να είναι απλό
- Να είναι εφαρμόσιμο
- Να είναι αποτελεσματικό
- Να είναι συμπαγές
- Να είναι συμβατό με τις διάφορες συσκευές και με τα υλικά που θα το περιβάλλουν
- Να μπορεί να εισαχθεί σε κάψουλες
- Να είναι αξιόπιστο

#### 4.3.5 Οικονομικά κριτήρια

- Να είναι εμπορικά και ευρέως διαθέσιμο
- Να έχει χαμηλό κόστος

#### 4.3.6 Θερμοφυσικές ιδιότητες

Όσον αφορά τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών, θα ασχοληθούμε κυρίως με τα ένυδρα άλατα και τις παραφίνες, αφού κυρίως αυτά χρησιμοποιούνται, στα ένυδρα άλατα δεν μπορούμε να τροποποιήσουμε τη θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας τους, ενώ με ομόλογες σειρές παραφινών μπορούμε να προσεγγίσουμε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας.

Η θερμοχωρητικότητα των υλικών είναι βασικά συνάρτηση της θερμότητας τήξης αυτών. Η θερμότητα τήξης των παραφινών αυξάνεται με το μέκος της ανθρακικής αλυσίδας τους, μέχρι τα 24 άτομα άνθρακα, και είναι γενικά μεγαλύτερη από αυτή των ένυδρων αλάτων. Η θερμότητα τήξης των ένυδρων αλάτων αυξάνεται με το βαθμό υδάτωσης, αλλά υψηλή υδάτωση συχνά οδηγεί σε ανομοιογένεια της σύστασης του υλικού μετά τη διαδικασία αλλαγής φάσης.

Η ειδική θερμότητα των υλικών δεν είναι κρίσιμος παράγοντας για την απόδοση του συστήματος, καθώς ένα μικρό μέρος της θερμικής ενέργειας αποθηκεύεται με τη μορφή της αισθητής θερμότητας. Οι παραφίνες, γενικά, έχουν υψηλότερη ειδική θερμότητα και στην υγρή και στη στερεή φάση από ότι τα ένυδρα άλατα.

Η μεταφορά θερμότητας από και προς μία αποθηκευτική μονάδα εξαρτάται ισχυρά από τη θερμική αγωγιμότητα του PCM, τόσο στη στερεή

όσο και στην υγρή φάση. Για ένα δεδομένο σύστημα αποθήκευσης όσο υψηλότερες είναι οι θερμικές αγωγιμότητες στις δύο φάσεις του υλικού, τόσο πιο αποτελεσματική είναι η μεταφορά θερμότητας. Τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από τις παραφίνες.

Η πυκνότητα του PCM είναι πολύ σημαντική αφού καθορίζει την αποτελεσματικότητα αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου. Τα ένυδρα άλατα είναι πιο πυκνά από τις παραφίνες. Αυτό το γεγονός επηρεάζει θετικότερα τη συμπεριφορά τους από την αρνητική επίδραση της χαμηλότερης θερμότητας τήξης από τις παραφίνες.

Σαν συνέπεια αυτού είναι το γεγονός ότι τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν μια χωρητικότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας από 250-400 KJ/dm<sup>3</sup>, σε σχέση με τα παραφινούχα υλικά των οποίων οι τιμές του αντίστοιχου μεγέθους κυμαίνονται από 125-200 KJ/dm<sup>3</sup>.

Οι παραφίνες κατά την πήξη τους δεν εμφανίζουν καθόλου υπόψυξη σε αντίθεση με τα ένυδρα άλατα που είναι επιρρεπή σε αυτό το φαινόμενο αλλά και στο φαινόμενο της μη σύμπτωτης τήξης.

Για την αντιμετώπιση της υπόψυξης προτείνονται οι παρακάτω λύσεις, που έχουν στόχο να προωθήσουν τη διεργασία της δημιουργίας πυρήνων:

- Με προσθήκη μικρής ποσότητας παραγόντων πυρήνωσης
- Με μηχανικά μέσα όπως η χρήση δοχείου με ανώμαλη επιφάνεια τοιχωμάτων, ή εναλλάκτη θερμότητας με τραχεία επιφάνεια
- Με διατήρηση μέσα στο PCM μιας περιοχής σε χαμηλή θερμοκρασία όταν το υπόλοιπο υλικό τήκεται με θέρμανση.

Για το πρόβλημα της μη σύμπτωτης τήξης προτείνονται οι ακόλουθες λύσεις:

- Χρήση προσθέτων που προκαλούν πύκνωση και παρεμποδίζουν έτσι την καθίζηση άνυδρου άλατος ή ένυδρου με λιγότερα μόρια νερού
- Με μηχανικά μέσα όπως η ανάδευση
- Με προσθήκη επιπλέον ποσότητας νερού έτσι ώστε όλο το ένυδρο άλας να μπορεί να διαλυθεί στο νερό στο σημείο τήξης
- Με τοποθέτηση του PCM σε κάψουλες για να μειωθεί ο διαχωρισμός

Οι παραφίνες μετά την αλλαγή της φάσης τους προς τη μια ή την άλλη κατεύθυνση εμφανίζουν ομοιογένεια στη σύστασή τους, σε αντίθεση και πάλι με τα ένυδρα άλατα τα περισσότερα εκ των οποίων εμφανίζουν μεγάλες διαφορές στις πυκνότητες της στερεής και της υγρής φάσης τους.

Οι παραφίνες έχουν χαμηλή πίεση ατμοποίησης, που οδηγεί πολύ μικρές απώλειες υλικού στο πέρασμα του χρόνου της αποθήκευσης. Τα ένυδρα

άλατα εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερη πίεση ατμοποίησης, η οποία προκαλεί απώλεια ύδατος και οδηγεί σε αλλαγές στη θερμική συμπεριφορά. Αυξανόμενη της υδάτωσης των ένυδρων αλάτων αυξάνεται και η πίεση ατμοποίησής τους. Σε αποθήκευση μεγάλης διάρκειας τα ένυδρα άλατα υποβιβάζονται αποικοδομούνται χημικά λόγω πιθανής οξειδωσης, υδρόλυσης κλπ. Οι παραφίνες είναι χημικά αδρανείς, μη τοξικές, και έχουν καλή θερμική συμπεριφορά, αν και με εκτεταμένη έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οξειδωθούν με αργούς ρυθμούς.

Τα ένυδρα άλατα είναι μη τοξικά και καθόλου εύφλεκτα. Αν και οι παραφίνες είναι εύφλεκτες παρουσία οξυγόνου σε υψηλές θερμοκρασίες, θεωρούνται χαμηλής επικινδυνότητας για την πρόκληση πυρκαγιάς.

Σαν μειονέκτημα των παραφινών μπορεί να σημειωθεί η αλλαγή του όγκου τους κατά 10% περίπου κατά τη μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη. Παρόλα αυτά, οι παραφίνες είναι στενά συνδεδεμένες με την αποθήκευση ενέργειας σε κτιριακές εφαρμογές, ενώ τα ένυδρα άλατα αντίστοιχα σχετίζονται με την αποθήκευση ενέργειας από ηλιακές εφαρμογές, π.χ ηλιακούς συλλέκτες.

Αντίστοιχες ιδιότητες με τις παραφίνες εμφανίζουν και τα λιπαρά οξέα, με τη διαφορά ότι εμφανίζουν ακόμη μικρότερη αλλαγή του όγκου τους κατά τη μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη.

Στην περίπτωση των ανόργανων αλάτων προτάθηκαν και μερικά φθοριούχα άλατα που λόγω, όμως, του υψηλού σημείου τήξης τους, παρουσιάζουν το μειονέκτημα της διάβρωσης των υλικών που τα περιέχουν.

Για να περιορισθεί το μειονέκτημα αυτό προτάθηκε η χρήση εύτηκτων μιγμάτων των φθοριούχων αλάτων.

<b>Πίνακας 5: Ιδιότητες εύτηκτων μιγμάτων</b>	
<i>Εύτηκτο</i>	<i>Σημείο Τήξης (°C)</i>
<i>NaF/MgF<sub>2</sub></i>	<i>832</i>
<i>LiF/MgF<sub>2</sub></i>	<i>746</i>
<i>NaF/CaF<sub>2</sub>/MgF<sub>2</sub></i>	<i>745</i>
<i>LiF/NaF/MgF<sub>2</sub></i>	<i>632</i>

Τα πλεονεκτήματα των εύτηκτων ουσιών είναι ότι αποτελούν σταθερές χημικές ενώσεις και μπορούν να διατηρούνται σε χάλυβα χρωμίου-νικελίου. Τα συστήματα αυτά είναι κατάλληλα για τη λειτουργία των θερμικών μηχανών αλλά δε συνιστώνται στη θέρμανση χώρων, εξαιτίας της μεγάλης θερμοκρασίας αποθήκευσης.

Η αποθήκευση-απόληψη θερμότητας με τη χρήση ένυδρων κρυσταλλικών αλάτων γίνεται με βάση την εξής αρχή: Το ένυδρο αλάτι χάνει το κρυσταλλικό νερό με παροχή σε αυτό θερμότητας σε μια ορισμένη θερμοκρασία. Με το φαινόμενο αυτό αποθηκεύουμε ενέργεια στο σύστημα αλατιού-νερού. Από το σύστημα αυτό έχουμε τη δυνατότητα να πάρουμε την ενέργεια που δώσαμε όταν τη χρειαζόμαστε με έναν εναλλάκτη οπότε και έχουμε επανακρυστάλλωση του αλατος. Το αμφίδρομο αυτό φαινόμενο μπορεί να



επαναλαμβάνεται συνέχεια εφόσον τα συστατικά είναι σταθερά στη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος πράγμα που συμβαίνει στα ανόργανα ένυδρα άλατα.

Ένα τέτοιο αλάτι που θεωρείται κατάλληλο για αυτού του είδους τη διεργασία είναι το  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Το ένυδρο κρυσταλλικό θειικό νάτριο αποβάλλει το κρυσταλλικό του νερό στους  $32^\circ\text{C}$  δημιουργώντας ένα κορεσμένο υδατικό διάλυμα  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  πάνω σε μία ποσότητα αδιάλυτου άνυδρου θειικού νατρίου. Το ποσό της θερμότητας που χρειάζεται για τη μεταβολή αυτή είναι  $70\text{Wh/kg}$ .

Παρατηρούμε ότι το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύουμε ανά μονάδα όγκου είναι περισσότερο από την περίπτωση αποθήκευσης σε θερμό νερό.

Πρόσφατα η NASA ασχολήθηκε με τη χρήση αλάτων φθοριούχου λιθίου για την αποθήκευση θερμότητας σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας, σε ένα διαστημικό σκάφος.

#### 4.3.7 Συστήματα αποθήκευσης με Υλικά αλλαγής φάσης

Μία εγκατάσταση αποθήκευσης με υλικά αλλαγής φάσης αποτελείται από το σύστημα που περιέχει το PCM και από το μέσο μεταφοράς θερμότητας. (Ο εναλλάκτης θερμότητας απαιτείται στην περίπτωση που το ίδιο το υλικό δεν αποτελεί δομικό στοιχείου του κτιρίου που θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας.)

Κάποια από τα συστήματα αποθήκευσης είναι :

1. Αποθήκευση σε δεξαμενές με εναλλάκτες θερμότητας
2. Τοποθέτηση σε κάψουλες μεσαίου μεγέθους (μακροκάψουλες)
3. Τοποθέτηση σε μικροκάψουλες
4. Τοποθέτηση σε τοιχοποιία

Η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος εξαρτάται από την εφαρμογή, την ύπαρξη κατάλληλου PCM, τη μέθοδο και τις απαιτήσεις για μεταφορά θερμότητας, το κόστος και αρκετούς άλλους παράγοντες.

Οι απαιτήσεις για ένα σύστημα το οποίο θα περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης είναι ποικίλες και σημαντικές. Το υλικό κατασκευής πρέπει :

- Να είναι συμβατό με το PCM
- Να έχει την ικανότητα να μεταφέρει τη θερμότητα αρκετά γρήγορα για να φορτίζει και να εκφορτίζει την εγκατάσταση αποθήκευσης θερμότητας
- Να είναι σταθερό στις ακραίες θερμοκρασίες λειτουργίας
- Να αντέχει στις 'τάσεις' που προκύπτουν από η μεταβολή του όγκου που συνοδεύει την αλλαγή φάσης

Η πιο σημαντική ιδιότητα είναι η συμβατότητα του υλικού κατασκευής με το PCM. Ως υλικά κατασκευής για τα συστήματα που περιέχουν PCM χρησιμοποιούνται μέταλλα, πλαστικά, και λιγότερο συχνά το τσιμέντο ή το γυαλί.

Σε γενικές γραμμές τα ένυδρα άλατα είναι συμβατά με τα πλαστικά ενώ τα οργανικά υλικά με τα μέταλλα. Εκτός από τις παραπάνω ιδιότητες είναι απαραίτητο το σύστημα να αντέχει στις συνθήκες για όλα τα δοχεία τάσεις κατά την αποστολή, τη μεταφορά, το χειρισμό ή τις επιδράσεις του περιβάλλοντος. Σημαντική δυσκολία των συστημάτων που περιέχουν PCM δεν είναι ο τύπος της τάσης αλλά η διάρκειά της γιατί τα PCM πρέπει να παραμένουν στα δοχεία για όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

#### 4.3.7.1 Αποθήκευση σε δεξαμενές

Η δεξαμενή με τον εναλλάκτη θερμότητας είναι η μέθοδος που επιλέγεται συνήθως όταν το μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι υγρό. Είναι το σύστημα εκείνο όπου το PCM περιέχεται σε μία δεξαμενή της οποίας ο ρόλος είναι να συγκρατεί και να προστατεύει το PCM ενώ υπάρχει και μία επιφάνεια η οποία διαχωρίζει το μέσο μεταφοράς θερμότητας και το PCM διαμέσου της οποίας γίνεται η συναλλαγή θερμότητας.

Το χαρακτηριστικό εκείνο που αποτελεί το κλειδί για τις δεξαμενές αυτές είναι η ανάγκη για πιο μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής ή για βελτίωση των ιδιοτήτων μεταφοράς θερμότητας γιατί

- κατά τη διεργασία τήξης-πήξης η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας τείνει να καλυφθεί με ένα στρώμα στερεοποιημένου PCM του οποίου το πάχος μεγαλώνει καθώς ο βρασμός εκφόρτισης αυξάνει. Το στερεό αυτό στρώμα ολοένα μειώνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας.
- ενώ τα PCM λόγω της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητάς τους απαιτούν μικρότερο όγκο συστήματος για την αποθήκευση ενός συγκεκριμένου ποσού θερμότητας, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος είναι ο ίδιος με τα άλλα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, επιβάλλει την ύπαρξη μίας μεγάλης επιφάνειας εναλλαγής.

Για την φόρτιση και την εκφόρτιση ενός τέτοιου συστήματος απαιτείται ένας κατάλληλος εναλλάκτης θερμότητας με μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής. Ακόμη, ο εναλλάκτης θα πρέπει να ικανοποιεί τα εξής:

- Να εξασφαλίζει έναν υψηλό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας έτσι ώστε να είναι δυνατή η ραγδαία φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος. Αυτό λόγω της μικρής αγωγιμότητας των PCM μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση μεταλλικών ελασμάτων, με φυσική ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία του PCM ή ακόμη και με την προσθήκη πτερυγίων στους σωλήνες του εναλλάκτη.
- Να επιτρέπει μόνο μικρές αλλαγές θερμοκρασίας για τη φόρτιση και την εκφόρτιση

- Να εξασφαλίζει υψηλή θερμική διαχυτότητα

Οι εναλλάκτες θερμότητας για τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας διακρίνονται σε δύο τύπους:

1. Παθητικοί εναλλάκτες οι οποίοι δεν διαθέτουν κινούμενα μέρη. Περιλαμβάνουν σωλήνες μικρής διαμέτρου (30-50mm) ή επίπεδους δίσκους μέσα στους οποίους βρίσκεται το PCM. Οι σωλήνες ενδέχεται να είναι εξοπλισμένοι και με μικρά πτερύγια για αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής θερμικής ενέργειας.
2. Ενεργητικοί εναλλάκτες στους οποίους υπάρχουν συστήματα για την ανάδευση του PCM βελτιώνοντας έτσι τη μεταφορά θερμότητας αλλά και παρεμποδίζοντας τον πιθανό διαχωρισμό φάσεων. Στα ενεργητικά συστήματα συμπεριλαμβάνονται και οι εναλλάκτες με απευθείας επαφή οι οποίοι παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της μεγάλης επιφάνειας συναλλαγής και της απουσίας εναπόθεσης στερεοποιημένου PCM κατά την εκφόρτιση στις επιφάνειες του εναλλάκτη.

Οι δυνατές εφαρμογές των δεξαμενών με PCM είναι (αντικαθιστώντας τις δεξαμενές νερού) :

- σε εγκαταστάσεις αντλιών θερμότητας με κλειστή κυκλοφορία νερού για θέρμανση και ψύξη κτιρίων
- για άλλες οικιακές χρήσεις, όπως το μαγείρεμα
- σε βιομηχανικά συστήματα ανάκτησης θερμότητας
- σε συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε εκτός αιχμής περιόδους
- σε μονάδες λήψης ηλιακής ακτινοβολίας για διαστημικές εφαρμογές

Για τη θέρμανση και την ψύξη των κτιρίων που το μέσο μεταφοράς είναι ο αέρας είναι καλύτερο τα PCM να περιέχονται σε μακρο-ή μικροκάψουλες.

#### 4.3.7.2 Τοποθέτηση σε μακροκάψουλες

Κατά την τοποθέτηση των υλικών αλλαγής φάσης σε μακροκάψουλες το δοχείο που τις περιέχει λειτουργεί και ως επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Ο όγκος του PCM ανά μονάδα μπορεί να ποικίλλει από μερικά γραμμάρια έως μερικά κιλά. Το σχήμα τους ποικίλλει από ορθογώνια πλαίσια έως ελαστικούς σάκους με συγκεκριμένο σχήμα.

Τα συστήματα αυτά επιλέγονται συνήθως όταν έχουμε μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα, όταν έχουμε εφαρμογές με PCMs χαμηλότερης θερμοκρασίας τήξης όπου απαιτούνται και μικρότεροι όγκοι ή όταν ο όγκος του συστήματος δεν είναι κρίσιμος.

Μια ποικιλία δοχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως :φιάλες, πλαστικοί σωλήνες, δοχεία, ελαστικές πλαστικές μεμβράνες. Η θερμική διαχυτότητα του υλικού της κάψουλας δεν πρέπει να είναι πολύ μικρότερη

από αυτή του PCM. Οι περισσότερες μακροκάψουλες είναι από πλαστικό (χαμηλές θερμοκρασίες), υπάρχουν όμως και ορισμένες που χρησιμοποιούν μέταλλα και μεμβράνες (υψηλές θερμοκρασίες).

Το σύστημα με μακροκάψουλες πρέπει να σχεδιασθεί έτσι ώστε να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και να ταιριάζει απόλυτα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Για να εξασφαλισθεί ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας τα PCM σε μακροκάψουλες έχουν μεγάλη αναλογία επιφάνειας /όγκο. Λόγω του μικρού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του αέρα, η διεπιφάνεια δοχείου –αέρα θα περιορίζει τη μεταφορά θερμότητας. Η ανάπτυξη στερεού στρώματος στην εσωτερική επιφάνεια μεταφοράς μπορεί να μειώσει σημαντικά το συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Ταυτόχρονα η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των PCM μειώνει σημαντικά τον όγκο σε σύγκριση με το νερό ή τα πετρώματα, όμως η απαίτηση για μεταφορά θερμότητας παραμένει η ίδια. Για αυτό στα συστήματα αυτά απαιτείται μεγαλύτερος λόγος επιφάνειας-όγκου.

#### *4.3.7.3 Τοποθέτηση σε μικροκάψουλες*

Με τις μικροκάψουλες έχουμε πολύ μικρές διακριτές μονάδες με PCM διεσπαρμένες και συνδεδεμένες μεταξύ τους με μία συνεχή φάση. Η συνεχής αυτή μήτρα πολλές φορές παρέχει όλα όσα απαιτούνται από ένα δοχείο, όπως προστασία από την υγρασία.

Λόγω του μικρού όγκου που έχει η κάθε μονάδα του PCM, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη υπόψυξη, κατά συνέπεια και στο υλικό που θα επιλεγεί. Ένα άλλο μειονέκτημα των PCM σε μικροκάψουλες είναι η μεγάλη αναλογία του υλικού κατασκευής ως προς το PCM. Αυτό μειώνει την ενεργειακή πυκνότητα και αυξάνει το κόστος. Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να παρουσιάσει επίσης προβλήματα καθώς η μήτρα που περιέχει τις μικροκάψουλες σταματά τη μεταφορά με συναγωγή κατά τη φόρτιση, μειώνοντας έτσι σημαντικά το ρυθμό φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό είναι περισσότερο έντονο για τις οργανικές μήτρες. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα συστήματα αυτά αντισταθμίζονται από την ικανότητά τους να αντικαθιστούν εύκολα συμβατικά υλικά, όπως είναι τα οικοδομικά υλικά αυξάνοντας το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσουν και παρέχοντας δυνατότητα διαχείρισης του φορτίου.

#### *4.3.7.4 Τοποθέτηση σε τοιχοποιία*

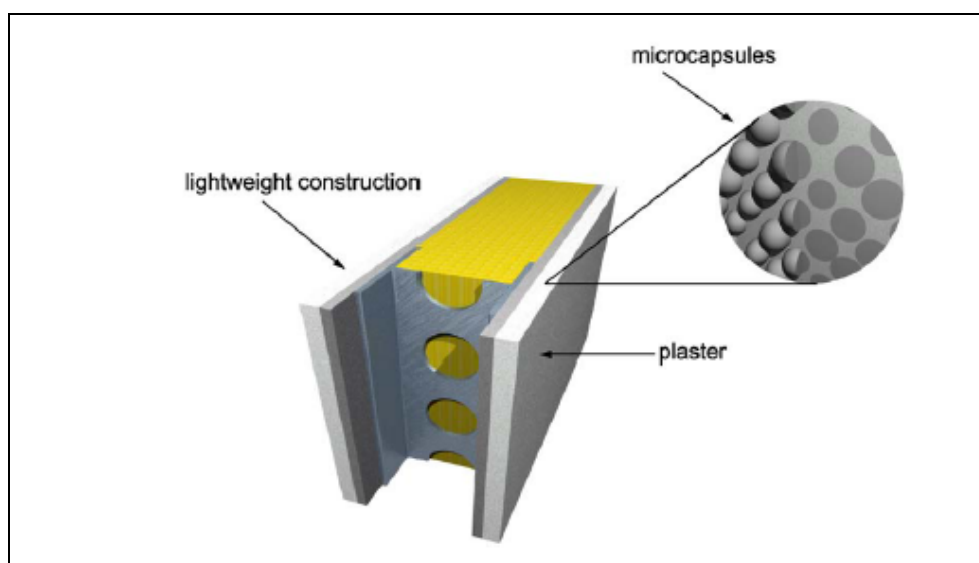
Το θερμικό κέλυφος των κτιρίων μέσω της θερμοχωρητικότητάς του μειώνει το εύρος των θερμοκρασιακών μεταβολών μέσα στο εσωτερικό των κτιρίων. Οι μεταβολές αυτές προκαλούνται είτε από τις αλλαγές της θερμοκρασίας στο εξωτερικό περιβάλλον, είτε από την ασυνεχή λειτουργία των συστημάτων ψύξης-θέρμανσης. Κτίρια με μεγάλες εξωτερικές επιφάνειες από γυαλί, όπως σύγχρονα κτίρια γραφείων ή κτίρια με παθητικά συστήματα θέρμανσης, συχνά παρουσιάζουν προβλήματα θερμικής άνεσης κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, όταν η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση αλλά και για φυσικό φωτισμό.

Επίσης, το πρόβλημα της υπερθέρμανσης εμφανίζεται σε τέτοιου είδους κτίρια αλλά και σε κτίρια ελαφριάς κατασκευής, κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι, όπου τα ηλιακά θερμικά κέρδη είναι πολύ μεγαλύτερα από τις ανάγκες σε θέρμανση και η τοιχοποιία αρκετά ελαφριά για να απορροφήσει αυτήν την πλεονάζουσα ηλιακή θερμική ενέργεια. Επομένως, η χρήση των PCM σε δομικά ή σαν δομικά στοιχεία αυτών των κτιρίων, καθίσταται αναπόφευκτη, αφού οδηγεί στην αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας από το κτιριακό κέλυφος, χωρίς τις μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας και της μεγάλης δομικής μάζας που απαιτεί η θερμική αποθήκευση μέσω της αισθητής θερμότητας.

Τα PCM μπορούν να τοποθετηθούν :

- με τη μορφή ενός συμπαγούς στρώματος, είτε ενιαίου, είτε με τη μορφή μιας μήτρας από μικροκάψουλες, πάνω σε μια υπάρχουσα τοιχοποιία του κτιρίου
- σε γύψινα πλαίσια, που έχουν εμποτιστεί με κάποιο PCM(σε αναλογία κατά μάζα περίπου 25%) και αυτά θα επικαλύψουν την τοιχοποιία
- σε πλαίσια από γύψο, τα οποία περιλαμβάνουν στο εσωτερικό τους σωλήνες που περιέχουν το PCM
- σε γυάλινα πλαίσια, διαμπερή και από τις δύο πλευρές, για την αντικατάσταση παραθύρων από γυαλί, οπότε χρησιμοποιούνται και για να παρέχουν φωτισμό
- με τη μορφή στρώματος, για την αντικατάσταση του θερμομπετόν σε συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης.
- με τη μορφή στρώματος μόνωσης, ανάμεσα σε δύο επιφάνειες εξωτερικού και εσωτερικού τοίχου

(στον όρο τοιχοποιία συμπεριλαμβάνουμε και τις οροφές των κτιρίων)



Σχήμα 13: Απεικόνιση της μορφής του PCM σαν στρώμα, σε τοιχοποιία.

#### 4.3.8 Δυσκολίες κατά τη χρήση των PCM

Κατά την εφαρμογή των PCM στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας κάποια προβλήματα εξακολουθούν να μένουν άλυτα :

- Αδυναμία να βρεθεί το κατάλληλο υλικό για την κατάλληλη εφαρμογή.(το υλικό δηλ. που θα αλλάζει φάση στη θερμοκρασία που απαιτεί η εφαρμογή.)
- Αβεβαιότητα στη συμπεριφορά των υλικών αυτών μετά από πολλούς κύκλους λειτουργίας.
- Αύξηση του κόστους του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

## **5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ**

### **5.1 Συστήματα PCM που κυκλοφορούν στο εμπόριο**

Ένα παράδειγμα τοποθέτησης PCM σε μικροκάψουλες μας παρέχει η γαλλική εταιρία «CRISTOPIA», η οποία δραστηριοποιείται στο χώρο της αποθήκευσης ενέργειας. Χρησιμοποιεί PCM με μεγάλο εύρος θερμοκρασιών τήξεως (-33 οC έως 27 οC). Η εταιρία κατασκευάζει κυρίως δεξαμενές, οι οποίες τοποθετούνται σε εγκαταστάσεις κλιματισμού με απώτερο στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας.

Η αρχή λειτουργίας στην περίπτωση π.χ. του κλιματισμού ενός χώρου γραφείων είναι η εξής:

Κατά τις νυχτερινές ώρες ή στη λειτουργία εκτός αιχμής φορτίου, διοχετεύεται ψυκτική ισχύς (μέσω ενός ψυκτικού ρευστού) στη δεξαμενή που περιέχει μικροκάψουλες με PCM. Έτσι, στερεοποιείται το υλικό που περιέχουν οι κάψουλες. Όταν τα ψυκτικά φορτία αυξηθούν, ανεβαίνει η θερμοκρασία στη δεξαμενή λανθάνουσας θερμότητας και το υλικό στις κάψουλες τήκεται. Η δεξαμενή είναι κατάλληλα συνδεδεμένη με το υπόλοιπο δίκτυο του κλιματισμού ώστε να μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο το φαινόμενο της απορρόφησης θερμότητας, που συμβαίνει κατά την τήξη του PCM. Έτσι, η δεξαμενή λανθάνουσας θερμότητας συντελεί κατά κάποιο ποσοστό στην κάλυψη των φορτίων με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας.

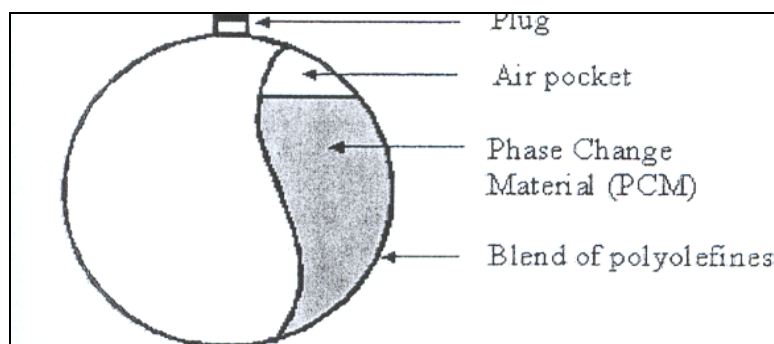
Η εταιρία κατασκευάζει ακόμη και δεξαμενές αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Αν και οι πωλήσεις τους είναι περιορισμένες, οι οιωνοί για περαιτέρω ανάπτυξη είναι καλοί.

Το σύστημα STL της θερμικής αποθήκευσης της εταιρίας αποτελείται από μια δεξαμενή που έχει πληρωθεί με μικροκάψουλες. Η δεξαμενή φέρει στο επάνω μέρος της μία μεγάλη οπή για την πλήρωσή της με μικροκάψουλες και στο κάτω μέρος της μία αντίστοιχη οπή για την εκκένωσή της από αυτές.

Μέσα στη δεξαμενή δύο διαχύτες (εισόδου και εξόδου) διαχέουν σε μορφή σπρέι το ψυκτικό ρευστό κατά μήκος αυτής. Ο διαχύτης που θα χρησιμοποιηθεί για την είσοδο του ψυκτικού ρευστού κατά τη φόρτιση της δεξαμενής πρέπει να είναι αυτός που βρίσκεται υψηλότερα στη δεξαμενή για να δημιουργείται και μια φυσική διαστρωμάτωση στη θερμοκρασία εντός της δεξαμενής.

Οι δεξαμενές συνήθως κατασκευάζονται από χάλυβα που αντέχει σε πιέσεις μεταξύ 4bar-10bar. Οι μικροκάψουλες είναι σφαιρικές με διάμετρο 77mm, 78mm ή 98mm. Η επιλογή της διαμέτρου εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή π.χ 98mm κάψουλες για συστήματα κλιματισμού και 78 ή 77 mm για συστήματα βιομηχανικής ψύξης.

Οι κάψουλες αυτές πληρώνονται με PCM, στο μεγαλύτερο μέρος τους αφήνοντας ένα ποσοστό για την πλήρωσή τους με αέρα. Επομένως, οι κάψουλες αυτές περιέχουν PCM και αέρα. Με τον αέρα αποφεύγονται τα προβλήματα των συστολών και των διαστολών του υλικού, που βρίσκεται στην κάψουλα και επομένως η μηχανική καταπόνηση της κάψουλας.



**Σχήμα 14: Τομή κάψουλας που περιέχει PCM, της εταιρίας CRISTOPIA**


Άλλες εταιρίες που δραστηριοποιούνται στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με λανθάνουσα θερμότητα είναι η γερμανική εταιρία «RUBITHERM» και η ιαπωνική εταιρία «MITSUBISHI Chemical Co».

Η RUBITHERM ασχολείται με προϊόντα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Το κύριο εμπορικό της προϊόν είναι ένα ειδικό παραφινούχο στρώμα, το οποίο τοποθετείται σε συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Το στρώμα αυτό όταν λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης τήκεται και όταν το σύστημα θέρμανσης δε λειτουργεί, επαναστερεοποιείται αποδίδοντας τη λανθάνουσα θερμότητα και έτσι επιτυγχάνεται θέρμανση του χώρου με λιγότερες ώρες λειτουργίας της θέρμανσης, και μικρότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο χώρο.

Η εταιρία ακόμη σχεδιάζει μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας, η οποία θα περιέχει κάψουλες PCM, στις οποίες θα μεταφέρεται θερμότητα μέσω νερού. Η δεξαμενή αυτή θα έχει εφαρμογή σε ηλιακά συστήματα.

Η MITSUBISHI Chemical Co ερευνά την απόδοση μιας δεξαμενής με μικροκάψουλες PCM για ηλιακές εφαρμογές. Στην περίπτωση αυτή το PCM θα αποτελείται από άλατα και υδρίδια, τα οποία θα περιέχονται στις κάψουλες, στις οποίες θα αποθηκεύεται θερμική ενέργεια κατά την ενυδάτωση του θερμικά αφυδατωμένου άλατος.



Data Sheet			
<b><u>RUBITHERM® RT 55</u></b>		<b>Typical Values</b>	
Melting area	°C	51 - 57 typical being: 55 °C	
Congeaing area	°C	56 - 51 typical being: 55 °C	
Heat storage capacity temperature range 48 °C to 63 °C	kJ/kg	172	
Density solid at 15 °C	kg/l	0.88	
Density liquid at 80 °C	kg/l	0.77	
Volume expansion In phase change range	%	14	
Heat conductivity	W/(m*K)	0.2	
Kin. Viscosity at 85 °C	mm <sup>2</sup> /s	34.08	
Flash point (PCM)	°C	> 100	
corrosion		chemically inert with respect to most materials	
water hazard		Water hazard class ( WGK ) 1	

Version: 20.08.2009

**Σχήμα 15: Φύλλο δεδομένων για την παραφίνη RT55, που χρησιμοποιείται από την εταιρεία RUBITHERM.**

## **5.2 Εφαρμογές στις μεταφορές (δοχεία αποθήκευσης)<sup>[2]</sup>**

### Δοχεία αποθήκευσης

Χρησιμοποιούνται κυρίως για την διατήρηση των τροφίμων κατά την μεταφορά και επίσης βρίσκουν εφαρμογή στον ιατρικό τομέα(Μεταφορές φαρμάκων, παγοκύστες, κλπ). Ακόμη υπάρχουν τέτοιου τύπου κιβώτια τα οποία δεν έχουν κατασκευαστεί αυστηρά για μεταφορά τροφίμων ή φαρμάκων και χρησιμοποιούνται με άλλους τρόπους.

*Παραδείγματα:*

1.

Το παρακάτω κιβώτιο συνδυάζει μια πολύ δυνατή μόνωση με PCM για την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας και δεν χρησιμοποιεί καθόλου ρεύμα.(Το συγκεκριμένο κιβώτιο κατασκευάζεται από την εταιρία va-Q-tec).

Χρησιμοποιείται για την μεταφορά προϊόντων που πρέπει να παραμένουν σε συγκεκριμένη θερμοκρασία , σε μεταφορικά φορτηγά , αεροπλάνα ή σε οποιοδήποτε άλλο κατάλληλο όχημα.



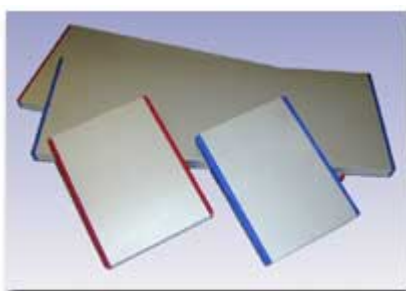
Το κιβώτιο έχει διαθέσιμο χώρο για μία παλέτα 120cm x 120cm και έχει την δυνατότητα να κρατήσει σταθερή θερμοκρασία 2°C-8 °C για 96 ώρες ή και περισσότερο όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι μεταξύ 0 °C-30 °C

**Σχήμα 16:Κιβώτιο διατήρησης θερμοκρασίας**

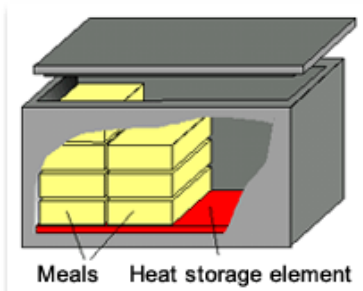
2.

Η εταιρία «RUBITHERM» έχει κατασκευάσει τις παρακάτω πλάκες που αποτελούνται από αλουμίνιο και είναι γεμισμένες με ένα υλικό αλλαγής φάσης που ονομάζεται «Granulate Rubitherm GR».

Το υλικό αυτό είναι στην ουσία μικροκάψουλες που περιέχουν PCM και κάποιο επιπρόσθετο. Το επιπρόσθετο είναι κάθε φορά ένα διαφορετικό υλικό ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής και βοηθάει στην ομογενοποιημένη διανομή του PCM καθώς και στην διατήρηση της δομής του. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι ούτε η κάψουλες ούτε το επιπρόσθετο αλλάζουν την κρυσταλλική δομή του PCM που οδηγεί στην μείωση της ικανότητας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.



**Σχήμα 17**



**Σχήμα 18**



**Σχήμα 19**

**Σχήμα 17:Πλάκες θέρμανσης η ψύξης τροφίμων.**

**Σχήμα 18:Σχεδιάγραμμα (Παράδειγμα τοποθέτησης των πλακών).**

**Σχήμα 19:Υλικό Granulate Rubitherm GR.**

3.

Η αποθήκευση και η μεταφορά ιατροφαρμακευτικών προϊόντων είναι μία κατάλληλη εφαρμογή για τα PCM. Ο λόγος είναι ότι πολλά από αυτά τα προϊόντα είναι πολύ ακριβά και η ποιότητά τους εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες θερμοκρασίας κατά την μεταφορά και την αποθήκευση.

Η θερμοκρασίες που διατηρούνται τέτοιου είδους προϊόντα είναι από 20°C έως 24°C από 2°C έως 6°C και άλλα από -30°C έως -26°C. Είναι δυνατό πάραυτα τα οχήματα που μεταφέρουν τα προϊόντα να έχουν κάποιο σύστημα ψύξης όμως το πρόβλημα είναι στη μεταφορά ανάμεσα στο νοσοκομείο και το όχημα και μετά ανάμεσα στο όχημα και τον τελευταίο προορισμό. Για παράδειγμα το αίμα απαγορεύεται να παγώσει όπως και να ανέβει πάνω από κάποιο όριο η θερμοκρασία του διότι μετά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Η παραδοσιακή μέθοδος διατήρησης της θερμοκρασίας σε κάποια προκαθορισμένα όρια είναι η χρήση πολύπλοκων και ακριβών συστημάτων ψύξης. Παρακάτω βλέπουμε ειδικές συσκευασίες της εταιρίας «Delta T» για την μεταφορά αίματος που διατηρούν την θερμοκρασία μεταξύ 2°C και 10°C έως και για 12 ώρες χωρίς περαιτέρω τεχνικό εξοπλισμό κλίνοντας έτσι τα κενά στην αλυσίδα των μεταφορών.



**Σχήμα 20,21: Δοχεία αποθήκευσης ιατροφαρμακευτικών προϊόντων από την εταιρία «Delta T».**

### **5.3 Εφαρμογές στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό<sup>[2]</sup>**

Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός λειτουργεί γενικώς καλύτερα μεταξύ συγκεκριμένων θερμοκρασιακών ορίων και μειώνεται ο χρόνος ζωής του ή αστοχεί σε πολύ υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα η εταιρίες τηλεφωνίας χρησιμοποιούν μπαταρίες για να τροφοδοτήσουν με ενέργεια εξοπλισμό, και επειδή πολλές φορές ηλεκτρονικός εξοπλισμός πρέπει να βρίσκεται και να χρησιμοποιείται υπαίθρια, υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από -40 °C έως +50 °C μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα. Η μπαταρίες έχουν πολύ μεγάλη ενεργειακή απώλεια όταν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή ή αστοχούν όταν είναι πολύ υψηλή και επιπλέον η διάρκεια ζωής μίας μπαταρίας εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται.

Η χρήση υλικών αλλαγής φάσης οδηγεί σε μία πιο σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας των μπαταριών απορροφώντας τα μεγάλα φορτία κατά τις ώρες αιχμής και απορρίπτοντάς τα αργότερα όταν η συνθήκες του περιβάλλοντος το επιτρέπουν. Ένα παράδειγμα χρήσης των PCM στις μπαταρίες είναι ένα ειδικό περίβλημα που έχει αναπτυχθεί από τις εταιρίες «TEAP», «Power Conversion Products» και «MJM-Engineering». Το περίβλημα αυτό έχει σακούλες γεμισμένες με PCM και τυλίγεται γύρω από την μπαταρία.

## 5.4 Εφαρμογές για το ανθρώπινο σώμα<sup>[2]</sup>

### Φορητοί Θερμαντές

Ίσως η πιο γνώστη εφαρμογή για την θερμική άνεση του ανθρώπινου σώματος είναι οι «Φορητοί θερμαντές» (Pocket heaters) οι οποίοι αποδεσμεύουν θερμότητα όταν κάποιος παγώνει.

Οι φορητοί θερμαντές είναι από τις λίγες εφαρμογές όπου το φαινόμενο Supercooling χρησιμοποιείται σκόπιμα. Η συσκευή αυτή θερμαίνεται μέχρι να τηχθεί το PCM που περιέχει μέσα και ύστερα φτάνει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος όμως χωρίς να έχει αποδώσει την λανθάνουσα θερμότητα. Ο λόγος είναι ότι χρησιμοποιείται ένυδρο άλας καθώς και κάποια πρόσθετα τα οποία οδηγούν στην εκτενή εμφάνιση του φαινομένου Subcooling. Έτσι λοιπόν το PCM δεν στερεοποιείται όταν φτάνει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Όταν λοιπόν είναι απαραίτητη η θερμότητα ένας μηχανισμός τοποθετημένος μέσα στον «φορητό θερμαντή» δίνει την έναυση για την στερεοποίηση του PCM και την αποδέσμευση της λανθάνουσας θερμότητας. Ο φορητός θερμαντής είναι μία βολική συσκευή για ανθρώπους που περνάνε αρκετό χρόνο στο εξωτερικό περιβάλλον όπως κυνηγοί, ναυτικοί, ψαράδες κλπ. Σε μεγαλύτερη κλίμακα τέτοιες συσκευές χρησιμοποιήθηκαν από μία ομάδα διάσωσης ορειβατών στο Garmisch Partenkirchen στην Γερμανία.

### Γιλέκα για διάφορες χρήσεις

Η εταιρία «Climator AB» έχει αναπτύξει μία εφαρμογή όπου PCM εγκιβωτισμένο σε κάψουλες τοποθετείται μέσα σε γιλέκα. Αυτά τα γιλέκα έχουν αναπτυχθεί έτσι ώστε να ψύχουν το σώμα ανθρώπων που δουλεύουν σε ζεστά περιβάλλοντα ή εκτελούν βαριά χειρονακτική εργασία. Φυσικά γενικά είναι εφικτό να ελέγχεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ειδικά σε κλειστά δωμάτια όμως σε πολύ ανοιχτά μέρη όπως αυτό είναι αδύνατο. Σε μία τέτοια περίπτωση είναι προτιμότερο να ελέγχεται η θερμοκρασία του σώματος παρά του χώρου.

Παρακάτω φαίνεται το γιλέκο που έχει αναπτύξει η εταιρία «Climator AB». Η απορρόφηση θερμότητας από το εγκιβωτισμένο PCM ξεκινά μόλις η θερμοκρασία ξεπεράσει την θερμοκρασία τήξης, η οποία είναι στους 28°C. Το φαινόμενο διαρκεί ως και τρεις ώρες ανάλογα με την εφαρμογή.

Η ποσότητα του PCM μέσα στο γιλέκο φτάνει τα 2.3 κιλά και είναι διαμοιρασμένο έτσι ώστε το πάχος του γιλέκου να είναι μόλις μερικά mm.



**Σχήμα 22: Γιλέκο διατήρησης θερμοκρασίας σώματος από την «Climator AB»**

### *Εφαρμογές σε ρουχισμό*

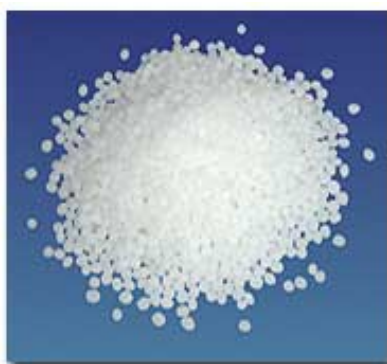
Η εταιρία «Outlast» έχει αναπτύξει ρούχα , εσώρουχα , μπουφάν , γάντια και όλων των ειδών ρουχισμό ,τα οποία περιέχουν PCM μέσα σε πολύ μικρές κάψουλες που βρίσκονται στα ρούχα οι οποίες διατηρούν την θερμοκρασία του σώματος.

### *Εφαρμογές για τον ύπνο*

Μία συνήθης κατάσταση στην οποία η ρύθμιση της θερμοκρασίας του σώματος είναι σοβαρή είναι ο ύπνος. Αν η θερμοκρασία δεν βρίσκεται μέσα σε κάποια αποδεκτά όρια τότε δεν μπορούμε να κοιμηθούμε καλά και το επόμενο πρωινό αισθανόμαστε άσχημα. Υπάρχουν πολλές εταιρίες σήμερα που παράγουν προϊόντα που βελτιώνουν την θερμική μας άνεση κατά την διάρκεια του ύπνου χρησιμοποιώντας υλικά αλλαγής φάσης , η λειτουργία είναι παρόμοια με αυτή των ρούχων και των γιλέκων.

### *Εφαρμογές σε πάτους παπουτσιών*

Ένα ακόμα μέρος στο οποίο χρειαζόμαστε ρύθμιση της θερμοκρασίας είναι στα πόδια. Όταν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή τότε ιδρώνουμε , ενώ όταν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή νιώθουμε πολύ άβολα.



Η εταιρία «Colortex GmbH» έχει δημιουργήσει έναν πάτο παπουτσιών με PCM βασισμένο στο υλικό «PK31» της εταιρίας Rubitherm το οποίο έχει θερμοκρασία τήξης 31°C.

**Σχήμα 23: Υλικό PK31 της εταιρίας Rubitherm**

### **5.5 Εφαρμογές για ιατρικούς σκοπούς<sup>[2]</sup>**

Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και για ιατρικούς σκοπούς. Η χρήση πάγου για ψύξη σαν θεραπεία σε διάφορους μικροτραυματισμούς είναι συνήθης. Πάραυτα η χρήση πάγου δεν είναι πάντα ιδανική .Για παράδειγμα έχει προταθεί η χρήση PCM για την μείωση της θερμοκρασίας του σώματος όταν έχουμε πυρετό. Ο λόγος είναι ότι οι συνηθισμένοι τρόποι μείωσης της θερμοκρασίας όπως ψυχρές πετσέτες , παγάκια κλπ στερούνται ενός επαρκούς τρόπου ρύθμισης της θερμοκρασίας. Όσον αφορά τα βρέφη τα οποία κινδυνεύουν από βλάβες στον εγκέφαλο εξαιτίας έλλειψης οξυγόνου , πρώτη η εταιρία «Osslon» διεξήγαγε πειράματα στα οποία ένυδρο άλας με θερμοκρασία τήξης 28 °C χρησιμοποιήθηκε για να μειώσει την θερμοκρασία του σώματος ενός μικρού χοιριδίου.

## **5.6 Δυναμικές Εφαρμογές των PCM στα κτίρια**

Ένα PCM με θερμοκρασία τήξης από 5°C - 15°C, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση ψύξης. Το PCM πηζει με τη λειτουργία μιας ψυκτικής εγκατάστασης τη νύχτα. όταν το κόστος του ηλεκτρισμού, όπως και η ζήτηση είναι χαμηλά και αφήνεται να ρευστοποιηθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας καλύπτοντας τις ανάγκες σε ψύξη του κτιρίου.

Ένα PCM, όπως το CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, με θερμοκρασία τήξεως περίπου στους 27°C μπορεί να ενσωματωθεί στα δομικά στοιχεία ενός κτιρίου μετριάζοντας έτσι το ημερήσιο εύρος αλλαγής θερμοκρασίας.

Ένα κτίριο μπορεί να θερμανθεί και να ψυχθεί χρησιμοποιώντας αντλίες θερμότητας που συνδέονται με νερό που κυκλοφορεί του οποίου η θερμοκρασία καθορίζεται από ένα PCM με σημείο τήξης από 20°C - 35°C. Σε μία ηλιακή εγκατάσταση θέρμανσης νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία δεξαμενή που θα περιέχει PCM σε μικροκάψουλες ή όχι, με σημείο τήξεως από 60-95 οC, σαν σύστημα αποθήκευσης του θερμού νερού.

## **5.7 Χρήση υλικών αλλαγής φάσης σε ηλιακή εφαρμογή**

Σε μία συσκευή αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας με ένυδρο κρυσταλλικό αλάτι συμβαίνουν τα εξής:

Το ορυκτέλαιο ή η υγρή σιλικόνη θερμαίνεται στον ηλιακό συλλέκτη με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Το θερμό υγρό διαβιβάζεται στο ένυδρο στερεό άλας οπότε και έχουμε απελευθέρωση του κρυσταλλικού νερού, δημιουργία κορεσμένου υδατικού διαλύματος του άλατος, στερεού υπολειμματος του αδιάλυτου άλατος και επίπλευση σε αυτό του ορυκτελαίου.

Το στάδιο αυτό είναι εκείνο στο οποίο η ηλιακή ενέργεια αποθηκεύεται. Για την απόληψη της θερμότητας όταν εμείς το επιθυμούμε, το ορυκτέλαιο περνά στον εναλλάκτη, όπου θερμαίνει νερό π.χ. για τη θέρμανση χώρων. Το ορυκτέλαιο ψυχόμενο διαβιβάζεται πάλι στο κορεσμένο διάλυμα, θερμαίνεται και ψύχει παράλληλα το διάλυμα που τελικά μετά την αφαίρεση θερμότητας επανακρυσταλλώνεται και αποδίδει θερμότητα.

Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης είναι ιδιαίτερα επωφελής σε εφαρμογές που απαιτούν μικρό αποθηκευτικό όγκο και μικρές διακυμάνσεις στη θερμοκρασία.

Για να συγκρίνουμε το νερό, που είναι το πιο διαδεδομένο μέσο για την αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας με ένα άλλο υλικό που αλλάζει φάση, αρχικά χρειάζεται να καθορίσουμε την αύξηση θερμοκρασίας του νερού κατά τη λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης. Ας υποθέσουμε εδώ ότι από τους 32oC(305,1K) το νερό ζεσταίνεται έως τους 50 οC(323,1K).

Υπό αυτές τις συνθήκες το νερό μπορεί να απορροφήσει :

$$Q = \rho \cdot C_p \cdot \Delta T = 988(\text{kg} / \text{m}^3) \cdot 4182(\text{J} / \text{kgK}) \cdot (323.1 - 305.1)(\text{K}) = 74.37 \text{MJ} / \text{m}^3$$

Αντίστοιχα, το υλικό  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (Glauber's Salt), το οποίο τήκεται στους  $32^\circ\text{C}$  μπορεί να απορροφήσει :

$$Q' = f_s \cdot \rho = 254(\text{kJ} / \text{kg}) \cdot 1485(\text{kg} / \text{m}^3) = 377.19 \text{MJ} / \text{m}^3$$

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι το  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  μπορεί να αποθηκεύσει περίπου 5,2 φορές περισσότερη ενέργεια από ότι ο ίδιος όγκος νερού με μια ανύψωση θερμοκρασίας  $18^\circ\text{C}$ .

## 6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Στην θερμοδυναμική, η θερμότητα ορίζεται ως η ενέργεια που διασχίζει τα όρια ενός συστήματος όταν αυτή η μεταφορά της ενέργειας συμβαίνει εξαιτίας μίας διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντός του. Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος δηλώνει ότι η θερμότητα ρέει πάντα προς το ψυχρότερο μέσο.

Ωστόσο η θερμοδυναμική δεν δείχνει, πως αυτή η μεταφερόμενη θερμότητα εξαρτάται από την διαφορά της θερμοκρασίας ή πόσο γρήγορη και έντονη αυτή η μη αναστρέψιμη διαδικασία είναι. Η επιστήμη της μεταφοράς θερμότητας διευκρινίζει τους νόμους που διέπουν αυτή την διαδικασία.

Υπάρχουν τρεις τρόποι για την μεταφορά θερμότητας :

- Αγωγή
- Συναγωγή
- Ακτινοβολία

### 6.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή<sup>[1],[4],[5],[6]</sup>

Αγωγή είναι η μεταφορά ενέργειας από τα πιο ενεργά σωματίδια μίας ουσίας προς τα γειτονικά λιγότερο ενεργά σωματίδια λόγω των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η αγωγή μπορεί να συμβεί στα στερεά στα υγρά ή στα αέρια. Στα αέρια και στα υγρά, η αγωγή οφείλεται στις συγκρούσεις και στην διάχυση μεταξύ των μορίων κατά την τυχαία κίνησή τους. Στα στερεά, οφείλεται στο συνδυασμό των ταλαντώσεων των μορίων σε μία δομή πλέγματος και της μεταφοράς ενέργειας από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια.

Εάν σε ένα μέσο υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας, η θερμότητα θα ρέει από την περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας στην περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας. Ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα δια αγωγής ( $q_k$ ) είναι ανάλογος με την παράγωγο της θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο επί την επιφάνεια μέσα από την οποία μεταδίδεται η θερμότητα.

$$q_k \propto A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (60)$$

Στην παραπάνω σχέση το  $T(x)$  είναι η τοπική θερμοκρασία και  $x$  είναι η απόσταση στην διεύθυνση που μεταδίδεται η θερμότητα. Ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητα εξαρτάται από την θερμοκίνη αγωγιμότητα, που είναι μία φυσική ιδιότητα του μέσου.

Για αγωγή μέσο ενός ομογενούς μέσου, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι:

$$q_k = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (61)$$



Το σύμβολο « - » είναι συνέπεια του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, που απαιτεί η θερμότητα να ρέει από την υψηλότερη στην χαμηλότερη θερμοκρασία.

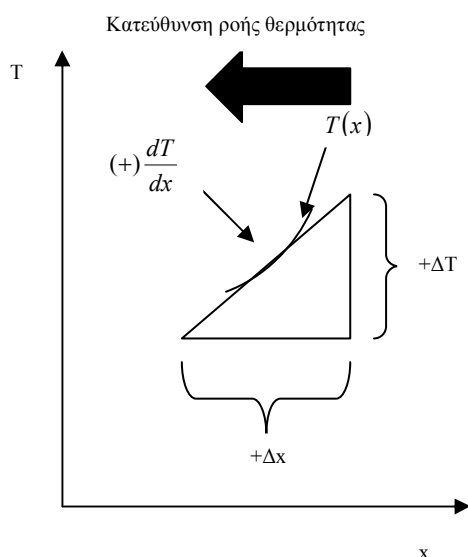
Όπως φαίνεται παρακάτω (Σχ. 24,25) η παράγωγος της θερμοκρασίας θα είναι αρνητική αν η θερμοκρασία ελαττώνεται όταν η τιμές του x αυξάνονται. Έτσι πρέπει να βάλουμε « - » αν θερμότητα μεταφέρεται προς τα θετικά του x στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (1).

Η εξίσωση Εξ.61 ορίζει την θερμική αγωγιμότητα και είναι ο νόμος του Fourier για την αγωγή(1822).

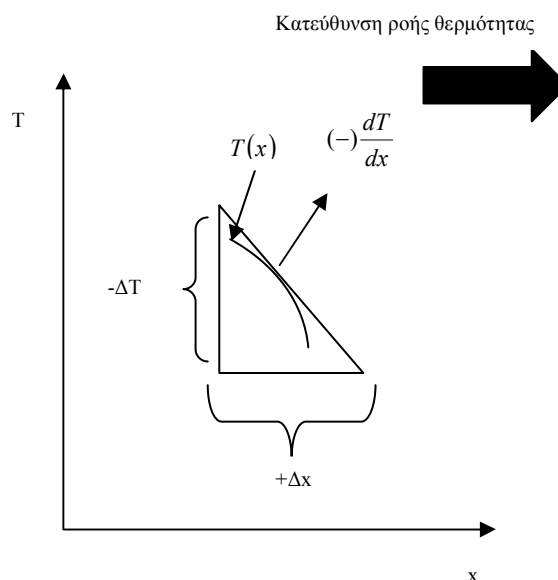
Η θερμική αγωγιμότητα (k) είναι μια ιδιότητα του υλικού που δείχνει την ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται στην μονάδα του χρόνου κατά μήκος της μονάδας επιφάνειας όταν η παράγωγος της θερμοκρασίας είναι συνεχής.

Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) ,η επιφάνεια μετράτε σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ ), η θερμοκρασία σε Kelvin (K) , η απόσταση x σε μέτρα (m) και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε Watts(W). Έτσι οι μονάδες της θερμικής αγωγιμότητας είναι  $\frac{W}{mK}$  .Στο Βρετανικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στις Η.Π.Α η επιφάνεια μετράτε σε τετραγωνικά πόδια ( $ft^2$ ) , η απόσταση σε πόδια (ft) , η θερμοκρασία σε βαθμούς Fahrenheit ( $^{\circ}F$ ), και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε Btu/hr. Έτσι το k έχει μονάδες  $\frac{Btu}{hr \cdot ft \cdot ^{\circ}F}$  .

Σχ24



Σχ25



**Σχήμα 24:** Αυξανόμενη θερμοκρασία κινούμενοι προς τα δεξιά του x  
**Σχήμα 25:** Μειούμενη θερμοκρασία κινούμενη προς τα δεξιά του x

Πίνακας 6: Τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας ( $k$ ) <sup>[2]</sup>		
Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα στους 300K	
	$\frac{W}{m \cdot K}$	$\frac{Btu}{hr \cdot ft \cdot ^\circ F}$
Χαλκός	399	231
Αλουμίνιο	237	137
Ατσάλι, 1%C	43	25
Γυαλί	0.81	0.47
Πλαστικό	0.2-0.3	0.12-0.17
Νερό	0.6	0.35
Αιθυλική αλκοόλη	0.26	0.15
Λάδι μηχανής	0.15	0.09
Φρέον (υγρό)	0.07	0.04
Υδρογόνο	0.18	0.10
Αέρας	0.026	0.02

Ο νόμος του Fourier ορίζει την θερμική αγωγιμότητα με την σχέση:

$$k \equiv \frac{q_k / A}{|dT/dx|} \quad (62)$$

Πάραυτα στους υπολογισμούς γενικά χρησιμοποιούμε πειραματικά μετρημένες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας, αν και για τα αέρια σε μέτριες θερμοκρασίες η θεωρία της κινητικής των αερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των πειραματικών δεδομένων επαρκώς.

Ο παραπάνω πίνακας (5.1) παραθέτει μερικές τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας κάποιων υλικών. Από ότι φαίνεται οι ικανότεροι αγωγοί θερμότητας είναι τα μέταλλα και οι χαμηλότερες τιμές του  $k$  εμφανίζονται στα αέρια, ενώ στο ενδιάμεσο βρίσκονται τα κράματα μετάλλων και τα υγρά.

#### 6.1.1 Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα Αέρια/Υγρά/Στερεά

##### Αέρια

Ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα αέρια μπορεί να εξηγηθεί σε μοριακό επίπεδο, μέσο της κινητικής θεωρίας των αερίων.

Η κινητική ενέργεια ενός μορίου σχετίζεται με την θερμοκρασία του. Τα μόρια σε μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας έχουν υψηλότερες ταχύτητες από αυτά που βρίσκονται σε μία περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας. Καθώς τα μόρια βρίσκονται σε συνεχή τυχαία κίνηση, συγκρούονται μεταξύ τους και ανταλλάσσουν ορμή και ενέργεια. Όταν ένα μόριο κινηθεί από μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας, σε μία περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας μεταφέρει κινητική ενέργεια. Καθώς συγκρούεται με τα μόρια χαμηλής ταχύτητας, δίνει κάποιο μέρος της ενέργειάς του, αυξάνοντας έτσι την ενέργεια των μορίων χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου. Με αυτόν τον τρόπο θερμότητα

μεταφέρεται από τις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας στις αντίστοιχες χαμηλής μέσο της μοριακής κίνησης.

Σε συμφωνία με τα παραπάνω, όσο πιο μεγάλη ταχύτητα έχουν τα μόρια τόσο πιο γρήγορα θα γίνεται και η μεταφορά θερμότητας. Συνεπώς, η ιδιότητα που ονομάσαμε θερμική αγωγιμότητα πρέπει να εξαρτάτε από την θερμοκρασία του αερίου. Σε λογικές θερμοκρασίες η απόσταση μεταξύ των μορίων ενός αερίου είναι πολύ μεγάλη συγκρινόμενη με το μέγεθος των μορίων, επομένως η θερμική αγωγιμότητα των αερίων μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη της πίεσης.

### Υγρά

Ο βασικός μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα υγρά είναι ποιοτικά παρόμοιος με τον αντίστοιχο των αερίων. Ωστόσο η μοριακή κατάσταση στα υγρά είναι πιο δύσκολο να εξηγηθεί.

Για τα περισσότερα υγρά η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με αυξανόμενη την θερμοκρασία εν τούτοις το νερό είναι μια αξιοσημείωτη εξαίρεση. Ακόμη η θερμική αγωγιμότητα είναι ανεξάρτητη της πίεσης στα υγρά εκτός από τις περιοχές κοντά στο κρίσιμο σημείο. Τέλος σαν γενικός κανόνας, η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με αυξανόμενο το μοριακό βάρος των υγρών.

### Στερεά

Σύμφωνα με τις υπάρχουσες θεωρίες, τα στερεά υλικά αποτελούνται από ελεύθερα ηλεκτρόνια και άτομα σε περιοδική κρυσταλλική δομή. Λόγω αυτού η μεταφορά θερμότητας μπορεί να γίνει με δύο μηχανισμούς:

- Κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων
- Ταλάντωση του κρυσταλλικού πλέγματος.

Αυτά τα δύο φαινόμενα είναι προσθετικά, γενικότερα όμως η μετάδοση θερμότητας μέσω των ηλεκτρονίων είναι πιο αποτελεσματική. Εφόσον τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν ηλεκτρικό φορτίο με ένα τρόπο παρόμοιο με αυτόν με τον οποίο μεταφέρουν θερμότητα από περιοχές υψηλής θερμοκρασίας σε περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας, οι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού είναι συνήθως και καλοί αγωγοί θερμότητας ενώ οι μονωτές του ηλεκτρικού ρεύματος είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας.

Στα μη μεταλλικά στερεά υπάρχει πολύ μικρή ως και καθόλου μεταφορά ηλεκτρονίων και συνεπώς η αγωγιμότητα καθορίζεται από την ταλάντωση του κρυσταλλικού πλέγματος, σαν συνέπεια αυτά τα υλικά έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα μέταλλα.

## 6.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή<sup>[1],[4],[5],[6]</sup>

Συναγωγή είναι ο τρόπος μεταφοράς της ενέργειας μεταξύ μίας στερεάς επιφάνειας και του γειτονικού υγρού ή αέριου που βρίσκεται σε κίνηση , και περιλαμβάνει τη συνδυασμένη επίδραση της αγωγής και της κίνησης του ρευστού. Όσο πιο γρήγορη είναι η κίνηση του ρευστού , τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.

Όταν δεν υπάρχει μεγάλη κίνηση ρευστού , η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του γειτονικού ρευστού γίνεται αποκλειστικά με αγωγή. Όταν υπάρχει μεγάλη κίνηση ρευστού , ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του γειτονικού ρευστού , αλλά κάνει και πιο πολύπλοκο τον προσδιορισμό των ρυθμών μεταφοράς θερμότητας.

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή αποτελείται οπότε από δύο μηχανισμούς που εκτελούνται ταυτόχρονα:

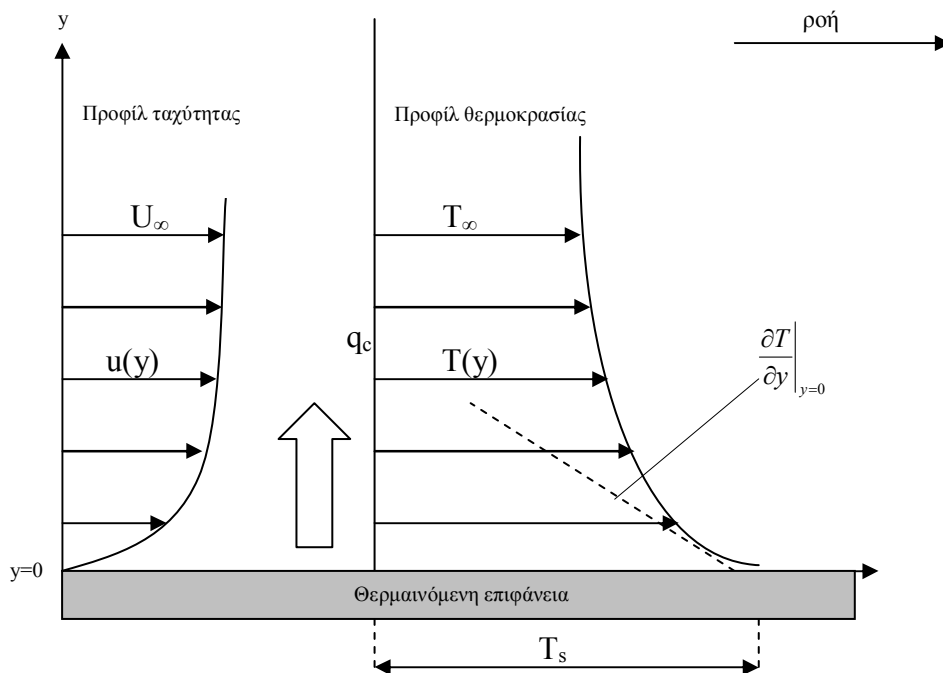
- μεταφορά ενέργειας εξαιτίας της μοριακής κίνησης (αγωγή)
- μεταφορά ενέργειας λόγω των μακροσκοπικών κινήσεων των μορίων του ρευστού

Η κίνηση του ρευστού είναι αποτέλεσμα ομάδων μορίων του ρευστού που κινούνται λόγω μίας εξωτερικής δύναμης. Αυτή η δύναμη είτε υπάρχει λόγω διαφοράς πυκνότητας όπως συμβαίνει στην ελεύθερη συναγωγή ,είτε λόγω διαφοράς πίεσης που δημιουργείται από μία αντλία ή έναν ανεμιστήρα ,είτε από συνδυασμό των δύο παραπάνω.

Το παρακάτω σχήμα(Σχ.26) δείχνει μία πλάκα με θερμοκρασία  $T_s$  στην επιφάνειά της και ρευστό θερμοκρασίας  $T_\infty$  που ρέει παράλληλα στην πλάκα.

Η ταχύτητα του ρευστού στην επιφάνεια είναι μηδέν λόγω τυρβωδών δυνάμεων και αυξάνει προς τα πάνω ως  $U_\infty$  .Αφού το ρευστό είναι ακίνητο στην επιφάνεια σε εκείνο το σημείο η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο με αγωγή. Εάν γνωρίζαμε την διάφορα της θερμοκρασίας και την θερμική αγωγιμότητα σε εκείνο το σημείο θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε την θερμοροή από την εξίσωση Εξ.61.

$$q_c = -k_{fluid} \cdot A \cdot \left. \frac{dT}{dx} \right|_{y=0} \quad (63)$$



**Σχήμα 26: Προφίλ ταχύτητας και θερμοκρασίας για μεταφορά θερμότητας με συναγωγή σε πλάκα με ροή ρευστού στην επιφάνειά της.**

Εν τούτοις η θερμοκρασιακή διαφορά στην επιφάνεια εξαρτάται από τον ρυθμό με τον οποίο οι μακροσκοπικές και η μικροσκοπικές κινήσεις των μορίων του ρευστού μεταφέρουν θερμότητα μακριά από την επιφάνεια. Συνεπώς η θερμοκρασιακή διαφορά στην επιφάνεια της πλάκας εξαρτάται από την ροή του ρευστού, και συγκεκριμένα από την ταχύτητα  $U_\infty$ .

Ο μηχανισμός είναι παρόμοιος και για την ελεύθερη συναγωγή. Η ειδοποιός διαφορά βρίσκεται στην ταχύτητα. Στην εξαναγκασμένη συναγωγή μακριά από την επιφάνεια συναλλαγής η ταχύτητα πλησιάζει την ταχύτητα της ελεύθερης ροής  $U_\infty$ , ενώ στην ελεύθερη συναγωγή η ταχύτητα στην αρχή αυξάνει με αυξανόμενη την απόσταση από την επιφάνεια συναλλαγής και μετά από κάποια τιμή αρχίζει και μειώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι το ιξώδες μειώνεται πολύ γρήγορα αυξάνοντας την απόσταση από την επιφάνεια, ενώ η πυκνότητα πολύ πιο αργά. Τελικά όμως και η δύναμη της άνωσης μειώνεται καθώς η πυκνότητα του ρευστού πλησιάζει αυτή του ρευστού που δεν έχει θερμανθεί.

Αυτή η αλληλεπίδραση των δυνάμεων οδηγεί την ταχύτητα του ρευστού σε ένα μέγιστο σημείο και μετά στο μηδέν, μακριά από την θερμαινόμενη πλάκα. Τα προφίλ της θερμοκρασίας και στις δύο περιπτώσεις είναι παρεμφερή και η μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια γίνεται με αγωγή.

Τα παραπάνω δείχνουν πως η συναγωγή εξαρτάται από την πυκνότητα, το ιξώδες και την ταχύτητα του ρευστού καθώς και από της θερμικές του ιδιότητες (θερμική αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα). Αν και στην εξαναγκασμένη συναγωγή η ταχύτητα προσδίδεται στο σύστημα από μία

αντλία ή έναν ανεμιστήρα και μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα , στην ελεύθερη συναγωγή η ταχύτητα εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην επιφάνεια και στο ρευστό , τον συντελεστή θερμικής διαστολής του ρευστού (που καθορίζει την μεταβολή της πυκνότητας ανά μονάδα θερμοκρασιακής διαφοράς) και την δύναμη κίνησης (για συστήματα στην Γ η δύναμη της βαρύτητας).

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μεταξύ μίας επιφάνειας και ενός ρευστού που ρέει παράλληλα προς την επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση :

$$q_c = \bar{h}_c \cdot A \cdot \Delta T \quad (64)$$

Όπου:

$q_c$  = Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή , Watt ( ή Btu/hr)

$A$  = Επιφάνεια συναλλαγής , m<sup>2</sup>(ή ft<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = Θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας της πλάκας θερμοκρασίας  $T_s$  και του ρευστού θερμοκρασίας  $T_\infty$  (μακριά από την επιφάνεια) , Κ (ή °F)

$\bar{h}_c$  = Μέσος συντελεστής συναγωγής στην επιφάνεια  $A$  , W/m<sup>2</sup>K

(ή  $\frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$  )

Η σχέση Εξ.64 προτάθηκε αρχικά από τον Βρετανό επιστήμονα Isaac Newton το 1701. Ο ι μηχανικοί χρησιμοποιούσαν αυτή την έκφραση για πολλά χρόνια, αν και περισσότερο είναι ορισμός του  $\bar{h}_c$  παρά νόμος της συναγωγής. Η εκτίμηση του συντελεστή συναγωγής είναι δύσκολη γιατί η συναγωγή είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο.

Η τιμή του μέσου συντελεστή συναγωγής σε ένα σύστημα εξαρτάται από την γεωμετρία της επιφάνειας ,την ταχύτητα και της θερμικές ιδιότητες του ρευστού και συχνά ακόμα και από την θερμοκρασιακή διαφορά  $\Delta T$ . Δεδομένου ότι αυτές οι τιμές δεν παραμένουν σταθερές κατά μήκος μίας επιφάνειας , ο συντελεστής συναγωγής μπορεί και αυτός να διαφέρει από σημείο σε σημείο. Για αυτό τον λόγο διαχωρίζουμε τον συντελεστή συναγωγής στον τοπικό συντελεστή και τον μέσο συντελεστή. Έτσι έχουμε για τον τοπικό συντελεστή  $h_c$  :

$$dq_c = h_c \cdot dA(T_s - T_\infty) \quad (65)$$

Ενώ για τον μέσο συντελεστή  $\bar{h}_c$  :

$$\bar{h}_c = \frac{1}{A} \iint_A h_c dA \quad (66)$$

Στις περισσότερες εφαρμογές ενδιαφερόμαστε για μέσες τιμές. Στον παρακάτω πίνακα(1.2) παρατίθενται τυπικές τιμές του συντελεστή συναγωγής.

<b>Πίνακας 7 :Συντελεστής συναγωγής<sup>[4]</sup></b>		
Ρευστό	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$
Αέρας ,ελεύθερη συναγωγή	6-30	1-5
Υπέρθερμος ατμός ή αέρας , εξαναγκασμένη συναγωγή	30-300	5-50
Λάδι ,εξαναγκασμένη συναγωγή	60-1,800	10-300
Νερό , εξαναγκασμένη συναγωγή	300-18,000	50-3,000
Νερό , βρασμός	3,000-60,000	500-10,000
Νερό , συμπύκνωση	6,000-120,000	1,000-20,000

### **6.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία<sup>[5],[6]</sup>**

Ακτινοβολία είναι η ενέργεια που εκπέμπει η ύλη με την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ή φωτονίων) λόγω των μεταβολών στην ηλεκτρονική διαμόρφωση των ατόμων ή των μορίων. Σε αντίθεση με την αγωγή και την συναγωγή, η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη υλικού μέσου. Στην πραγματικότητα , η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία είναι γρηγορότερη (ίση με την ταχύτητα του φωτός) και δεν υφίσταται απώλειες στο κενό.

Στη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας ενδιαφέρει η θερμική ακτινοβολία , η οποία αποτελεί τη μορφή ενέργειας που εκπέμπουν τα σώματα λόγω της θερμοκρασίας τους. Διαφέρει από τις άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπως ακτίνες-Χ , οι ακτίνες-γ , τα μικροκύματα , τα ραδιοκύματα και τα τηλεοπτικά κύματα , τα οποία δεν σχετίζονται με την θερμοκρασία. Όλα τα σώματα σε θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία είναι ένα ογκομετρικό φαινόμενο και όλα τα στερεά , τα υγρά και τα αέρια εκπέμπουν, απορροφούν, ή μεταδίδουν ακτινοβολία σε διαφορετικό βαθμό. Ωστόσο, η ακτινοβολία θεωρείται συνήθως ως επιφανειακό φαινόμενο για τα στερεά που είναι αδιαφανή στη θερμική ακτινοβολία όπως τα μέταλλα, το ξύλο και τα πετρώματα, αφού η ακτινοβολία που εκπέμπουν οι εσωτερικές περιοχές αυτών των υλικών δεν φτάνει ποτέ στην επιφάνεια, και η προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω σε τέτοια σώματα απορροφάται συνήθως σε λίγα μόνο μικρά από την επιφάνεια.

Η ποσότητα της ενέργειας που διαφεύγει από μία επιφάνεια σαν ακτινοβολία εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία και την φύση της επιφάνειας.

Ένας ιδανικός εκπομπός ακτινοβολίας, εκπέμπει θερμότητα από την επιφάνεια του με ρυθμό  $q_r$ , που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma \cdot A_1 \cdot T_1^4 \quad (67)$$

$\dot{Q}_{emit,max}$  = ρυθμός που εκπέμπεται θερμότητα σε Watt

$A$  = επιφάνεια σε  $m^2$

$T_1$  = Θερμοκρασία στην επιφάνεια σε K

$\sigma$  = σταθερά «Stefan-Boltzman», με τιμή  $5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

Η ιδανική επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία με το μέγιστο αυτό ρυθμό ονομάζεται μέλαν (μαύρο) σώμα, και η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα τέτοιο σώμα ονομάζεται ακτινοβολία του μέλανος σώματος. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν όλες οι πραγματικές επιφάνειες είναι μικρότερη από εκείνη του μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία, και εκφράζεται ως:

$$\dot{Q}_{emit,max} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_1 \cdot T_1^4 \quad (68)$$



## **7 ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ PCM**

Οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης καλύπτουν πολλά διαφορετικά πεδία , όμως για όλες το πιο σημαντικό είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού. Μόνο μία κατάλληλη επιλογή εξασφαλίζει την συνεχή λειτουργία του κύκλου (τήξη και στερεοποίηση του υλικού).

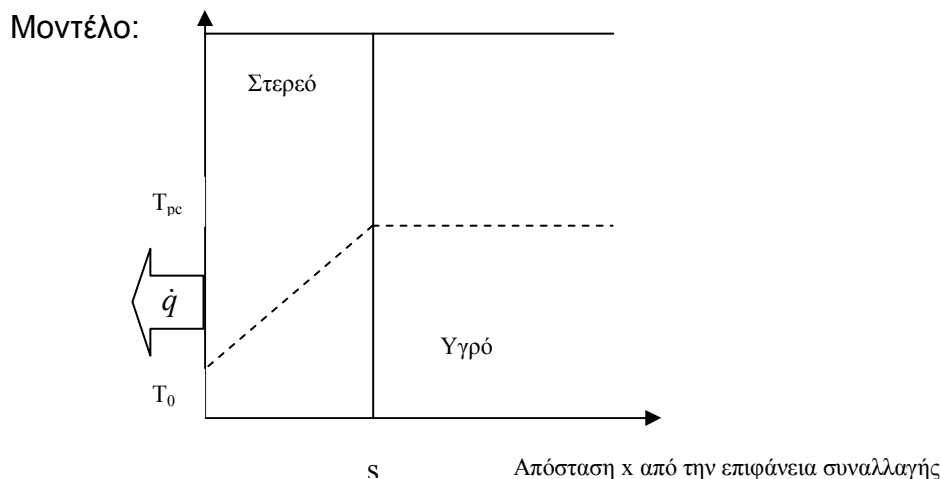
Η μεταφορά θερμότητας επίσης είναι συνδεδεμένη με την διαδικασία της αλλαγής φάσης , αυτή επιτρέπει την αποθήκευση θερμότητας σε ένα υλικό αλλαγής φάσης ή την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας από ένα PCM. Ανάλογα με την εφαρμογή η θερμορροή μπορεί να κυμαίνεται από μερικά kW όπως σε ένα σύστημα θέρμανσης χώρων με την χρήση νερού μέχρι σε μερικά W για την διατήρηση της θερμοκρασίας σε δοχεία μεταφοράς. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της θερμορροής και του χρόνου ολοκλήρωσης της αλλαγής φάσης για διάφορα γεωμετρικά μοντέλα.

### **7.1 Μονοδιάστατο ημιάπειρο επίπεδο PCM<sup>[2]</sup>**

Εξαιτίας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός τέτοιου συστήματος και το ότι ο όγκος παραμένει σταθερός εξαιτίας της αλλαγής φάσης στερεού-υγρού είναι αναγκαίο να εφαρμόσουμε κάποιους περιορισμούς ή παραδοχές για να φτάσουμε στην αναλυτική λύση. Έτσι θεωρούμε ότι :

- Αποθηκεύεται ενέργεια μόνο υπό την μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Η αισθητή θερμότητα που αποθηκεύεται είναι αμελητέα συγκρινόμενη με την διαφορά ενθαλπίας της αλλαγής φάσης και έτσι μόνο η λανθάνουσα θερμότητα στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης θεωρείται μετρήσιμη.
- Η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο με αγωγή, δεν υπάρχει συναγωγή. Έτσι το προφίλ της θερμοκρασίας είναι γραμμικό και η θερμορροή είναι ανάλογη της παραγωγού της θερμοκρασίας.
- Στην αρχή για  $t=0$ , το PCM είναι υγρό και η θερμοκρασία του είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης.
- Για  $x=0$  η θερμοκρασία είναι  $T_0$  και παραμένει σταθερή.

Αυτό το απλό πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις ονομάζεται «Stefan problem». Η μαθηματική λύση είναι ευθείς και το αποτέλεσμα είναι χρήσιμο σε πολλές περιπτώσεις.



**Σχήμα 27: Ψύξη ,μονοδιάστατο ημιάπειρο επίπεδο PCM**

Αμελώντας την αισθητή θερμότητα παντού έχω:

$$c_p (T_{pc} - T_0) \ll \Delta_{pc} h \quad (69)$$

Η ποσότητα θερμότητας που αποδεσμεύεται ( $dQ$ ) όταν η διαχωριστική επιφάνεια αλλαγής φάσης(νοητή γραμμή μεταξύ των δύο φάσεων) μετακινείται κατά  $ds$  είναι:

$$dQ(t) = \Delta_{pc} h \cdot A \cdot ds(t) \quad (70)$$

Η θερμότητα που απελευθερώνεται όταν το μέτωπο αλλαγής φάσης μετακινείται είναι ίση με την θερμότητα που αποδεσμεύεται στην επιφάνεια (αυτή που επικοινωνεί με τα άκρα του υλικού), διότι σύμφωνα με την Εξ.69 δεν αποθηκεύεται θερμότητα πουθενά ανάμεσα. Η πυκνότητα θερμότητας στην επιφάνεια (επιφάνεια συναλλαγής) βρίσκεται από την εξίσωση Εξ.70 παίρνοντας την παράγωγο ως προς τον χρόνο και διαιρώντας με την επιφάνεια.

$$\frac{dq(t)}{dt} = \dot{q}(t) = \Delta_{pc} h \cdot \frac{ds}{dt} \quad (71)$$

Παράλληλα όμως επειδή η αισθητή θερμότητα αμελείται και η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο δια αγωγής, η μεταβολή της θερμοκρασίας από το μέτωπο αλλαγής φάσης σε απόσταση  $s$  από την επιφάνεια είναι γραμμική.

Τότε η πυκνότητα θερμότητας στην επιφάνεια ως συνάρτηση της απόστασης από το μέτωπο αλλαγής φάσης είναι:

$$\dot{q}(s) = \lambda \cdot \frac{T_{pc} - T_0}{s} \quad (72)$$

Εξισώνοντας τις 71 και 72 έχω:

$$\lambda \cdot \frac{T_{pc} - T_0}{s} = \Delta_{pc} h \frac{ds}{dt} \quad (73)$$

Χωρίζοντας τις μεταβλητές s,t στα δύο μέλη της εξίσωσης και ολοκληρώνοντας από  $t'=0$  ως  $t'=t$  έχω:

$$\int_0^t \frac{\lambda \cdot (T_{pc} - T_0)}{\Delta_{pc} h} dt' - \int_{s(t'=0)}^{s(t'=t)} s \cdot ds \Rightarrow \frac{\lambda \cdot (T_{pc} - T_0)}{\Delta_{pc} h} \cdot t = \frac{1}{2} s(t)^2 \quad (74)$$

Έτσι ο χρόνος ο οποίος χρειάζεται ώστε το μέτωπο αλλαγής φάσης να μετακινηθεί κατά s είναι :

$$t = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta_{pc} h}{\lambda \cdot (T_{pc} - T_0)} \cdot s(t)^2 \quad (75)$$

Ακόμη η απόσταση s του μετώπου αλλαγής φάσης από την επιφάνεια είναι:

$$s(t) = \sqrt{2 \cdot \frac{\lambda \cdot (T_{pc} - T_0)}{\Delta_{pc} h} \cdot t} \quad (76)$$

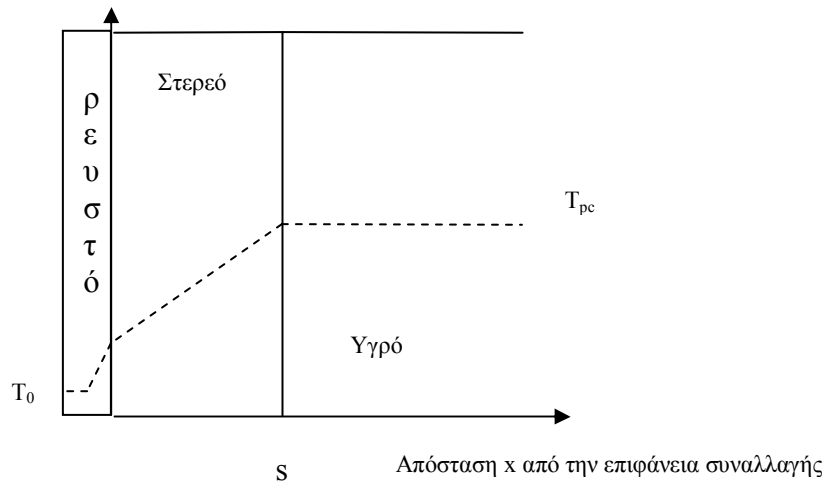
Τέλος χρησιμοποιώντας την (76) στην εξίσωση (72) έχουμε:

$$\dot{q}(t) = \sqrt{2 \cdot \frac{\lambda \cdot (T_{pc} - T_0) \cdot \Delta_{pc} h}{2 \cdot t}} \quad (77)$$

Οι εξισώσεις (76),(77) δείχνουν την επιρροή των  $T_{pc}, T_0, \lambda, \Delta_{pc} h$  και t στην μεταβολή της πυκνότητας θερμότητας και του μετώπου αλλαγής φάσης με τον χρόνο.

Όσο μεγαλύτερο είναι το  $\Delta_{pc} h$  τόσο περισσότερο χρόνο παίρνει για να μετακινηθεί το μέτωπο μία προκαθορισμένη απόσταση από την επιφάνεια για προκαθορισμένη πυκνότητα θερμότητας. Καθώς η απόσταση αυτή εισέρχεται στην πυκνότητα θερμότητας μέσω της παραγωγού της θερμοκρασίας, το  $\Delta_{pc} h$  επηρεάζει και την πυκνότητα θερμότητας.

## 7.2 Μονοδιάστατο ημιάπειρο επίπεδο PCM με ρευστό για την μεταφορά θερμότητας<sup>[2]</sup>



**Σχήμα 28: Ψύξη , Μονοδιάστατο ημιάπειρο επίπεδο PCM με ρευστό για μεταφορά θερμότητας**

Παραπάνω υποθέσαμε ότι η αλλαγή της θερμοκρασίας γίνεται κατευθείαν πάνω στην επιφάνεια του υλικού αποθήκευσης. Το διαχωριστικό(μεταξύ PCM και επιφάνειας συναλλαγής) στην πραγματικότητα αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας με ρευστό για την μεταφορά θερμότητας. Η διαφορά με αυτά που παρατίθενται παραπάνω είναι ότι τώρα υπάρχει περαιτέρω θερμική αντίσταση μεταξύ του τοιχώματος του εναλλάκτη και του ρευστού καθώς και ότι η αλλαγή της θερμοκρασίας από  $T_{pc}$  σε  $T_0$  δεν γίνεται μόνο κατά μήκος του υλικού αποθήκευσης.

Το φαινόμενο αυτών των διαδοχικών θερμικών αντιστάσεων από  $T_{pc}$  σε  $T_0$  αλλάζει την εξίσωση (72). Χρησιμοποιώντας την θερμική αντίσταση του τοιχώματος του εναλλάκτη  $d_{wall}/\lambda_{wall}$  και του ρευστού  $1/a_{fluid}$  η πυκνότητα θερμότητας μέσα στο ρευστό γίνεται:

$$\dot{q}(t) = \frac{1}{\frac{s(t)}{\lambda} + \frac{d_{wall}}{\lambda_{wall}} + \frac{1}{a_{fluid}}} \cdot (T_{pc} - T_0) \quad (78)$$

Ορίζοντας τον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $k$  :

$$\frac{1}{k} = \frac{d_{wall}}{\lambda_{wall}} + \frac{1}{a_{fluid}} \quad (79)$$

Η λύση είναι(Baehr και Stephan 1994):

$$t = \frac{\Delta_{pc} h \cdot s^2}{2 \cdot \lambda \cdot (T_{pc} - T_0)} \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{\lambda}{k \cdot s} \right) \quad (80)$$

Στην ιδανική περίπτωση η θερμική αντίσταση στην επιφάνεια , που αποτελείται από τις θερμικές αντιστάσεις του ρευστού και του τοιχώματος , είναι μηδενική. Ως αποτέλεσμα έχουμε  $k \rightarrow \infty$  και η εξίσωση (80) γίνεται ίση με την (75).

Η (80) περιέχοντας την θερμική αντίσταση μπορεί να λυθεί με την απόσταση s σαν συνάρτηση του χρόνου (Mehling 1999).

$$s(t) = \frac{1}{2 \cdot \Delta_{pc} h \cdot k} \cdot \left[ -2 \cdot \Delta_{pc} h \cdot \lambda + 2 \cdot \sqrt{\Delta_{pc} h \cdot \lambda \cdot (\Delta_{pc} h \cdot \lambda + 2 \cdot k^2 \cdot t \cdot (T_{pc} - T_0))} \right] \quad (81)$$

Παρά τις πολλές παραδοχές που θεωρήσαμε στην αρχή οι αναλυτικές εκφράσεις που δίνονται στις εξισώσεις (75),(76),(77),(80) και (81) μπορούν να φανούν πολύ χρήσιμες. Χρησιμοποιούνται σαν μία πρώτη εκτίμηση ειδικά για την μελέτη της επιρροής διαφόρων παραμέτρων.

### **7.3 Κυλινδρική και σφαιρική γεωμετρία<sup>[2]</sup>**

Οι Baehr και Stephan το 1994 υπολόγισαν τις λύσεις για τις κυλινδρικές και σφαιρικές γεωμετρίες. Σε τέτοιου είδους προβλήματα υπάρχουν δύο περιπτώσεις: Το PCM εντός και το PCM εκτός σφαιρικών ή κυλινδρικών ορίων.

Οι λύσεις για αυτές τις γεωμετρίες μπορούν να εφαρμοστούν σε προβλήματα με εναλλάκτες θερμότητας που περιέχουν σωλήνες(κύλινδροι θέρμανσης ή ψύξης,PCM εκτός των κυλίνδρων),οι σε προβλήματα κυλινδρικών σωλήνων ή σφαιριδίων που εμπεριέχουν PCM(για θέρμανση ή ψύξη με το PCM να θερμαίνεται ή να ψύχεται από έξω).Ακόμη οι λύσεις αυτές δίνουν μία γενική εικόνα πάνω στην επιρροή τις γεωμετρίας στην μεταφορά θερμότητας.

Εξαιτίας της σφαιρικής και κυλινδρικής γεωμετρίας πρέπει να εισάγουμε μία καινούργια παράμετρο , την ακτίνα R.Ο χρόνος που χρειάζεται το μέτωπο αλλαγής φάσης να μετακινηθεί απόσταση s μακριά από την επιφάνεια (που διαχωρίζει το υλικό αποθήκευσης από την επιφάνεια συναλλαγής) με ακτίνα R είναι:

$$t = \frac{\Delta_{pc} h \cdot s^2}{2 \cdot \lambda \cdot (T_{pc} - T_0)} f(s^+, \beta) \quad s^+ = \frac{s}{R} \quad (82)$$

Η παραπάνω εξίσωση περιέχει τις περιπτώσεις για το μονοδιάστατο πρόβλημα με ή χωρίς την θερμική αντίσταση Εξ. (75),(80). Ο αδιάστατος αριθμός f ,ο οποίος είναι συνάρτηση των  $s^+$  και  $\beta$  , περιγράφει την απόκλιση της λύσης από το Stephan problem. Έτσι , η παράμετρος  $s^+$  είναι η αδιάστατη αναλογία της απόστασης s από το μέτωπο αλλαγής φάσης με την ακτίνα R

του κυλίνδρου ή της σφαίρας. Ο αδιάστατος αριθμός  $\beta$  περιγράφει την επιρροή της διαχωριστικής επιφάνειας αφού περιέχει τις παραμέτρους  $\lambda_{wall}$ ,  $d_{wall}$  και  $\alpha$  σε σχέση με το  $R$ . Οι τιμές για τους αδιάστατους αριθμούς  $f(s^+, \beta)$  και  $\beta$  δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8).

**Πίνακας 8 : Τιμές των  $f(s^+, \beta)$ ,  $\beta$  κατά περίπτωση<sup>[2]</sup>**

-	$f(s^+, \beta)$	$\beta$
Απλό ,PCM στην μία πλευρά $s^+ \geq 0$	$1 + 2 \cdot \frac{\lambda}{k \cdot R \cdot s^+} = 1 + 2 \cdot \frac{\beta}{s^+}$	$\beta = \frac{\lambda}{\lambda_{wall}} \cdot \frac{1}{R} + \frac{\lambda}{\alpha_{fluid} \cdot R}$ $d_{wall}$
Κύλινδρος,PCM εκτός $s^+ \geq 0$	$\left(1 + \frac{1}{s^+}\right)^2 \cdot \ln(1 + s^+) - \left(1 + \frac{2}{s^+}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} - \beta\right)$	$\frac{\lambda}{\lambda_{wall}} \ln \frac{R}{R - d_{wall}} + \frac{\lambda}{\alpha(R - d_{wall})}$
Κύλινδρος,PCM εντός $1 \geq s^+ \geq 0$	$\left(1 - \frac{1}{s^+}\right)^2 \cdot \ln(1 - s^+) - \left(1 - \frac{2}{s^+}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \beta\right)$	$\frac{\lambda}{\lambda_{wall}} \ln \frac{R + d_{wall}}{R} + \frac{\lambda}{\alpha(R + d_{wall})}$
Σφαίρα,PCM εκτός $s^+ \geq 0$	$1 + \frac{2}{3}s^+ + \frac{2 \cdot \beta}{s^+} \left(1 + s^+ + \frac{(s^+)^2}{3}\right)$	$\frac{\lambda}{\lambda_{wall}} + \frac{d_{wall}}{R - d_{wall}} + \frac{\lambda}{\alpha(R - d_{wall})} \cdot \frac{R}{R - d_{wall}}$
Σφαίρα,PCM εντός $1 \geq s^+ \geq 0$	$1 - \frac{2}{3}s^+ + \frac{2 \cdot \beta}{s^+} \left(1 - s^+ + \frac{(s^+)^2}{3}\right)$	$\frac{\lambda}{\lambda_{wall}} + \frac{d_{wall}}{R + d_{wall}} + \frac{\lambda}{\alpha(R + d_{wall})} \cdot \frac{R}{R + d_{wall}}$

Για τις κυλινδρικές και τις σφαιρικές γεωμετρίες τα  $\beta$  και  $f$  υπολογίστηκαν από τους Baehr και Stephan το 1994. Για απλές γεωμετρίες, οι τιμές έχουν προκύψει από μια αλλαγή της εξίσωσης (80) σε αυτές του πίνακα.

Για μικρό πάχος τοιχώματος  $d_{wall} \ll R$  και  $\lambda_{wall} \ll \lambda$  του PCM, ο πρώτος όρος του  $\beta$  γίνεται μηδέν και  $\beta = \lambda / (\alpha \cdot R)$  σε όλες τις περιπτώσεις. Η θερμοκρασιακή πτώση μεταξύ της διαχωριστικής επιφάνειας και  $T_0$  είναι μηδέν, επίσης αν  $\alpha \cdot R \gg \lambda$  τότε  $\beta = 0$  (Πίνακας 6.2). Για την περίπτωση της απλής γεωμετρίας με το PCM στην μία πλευρά παίρνοντας μηδενικές θερμικές αντιστάσεις έχουμε την λύση του «Stephen problem»  $f=1$ .

Σε σφαιρικές και κυλινδρικές γεωμετρίες και για αμελούμενες θερμικές αντιστάσεις στην διαχωριστική επιφάνεια ( $\beta=0$ ) καθώς και για μικρή απόσταση  $s$  μπορούμε να πάρουμε  $f=1$ , εξαιτίας των αμελούμενων φαινομένων στον τοίχο και του μικρού  $s$  έχουμε πρακτικά ένα επίπεδο από PCM που είναι τόσο λεπτό ώστε η καμπύλωση εξαιτίας της ειδικής γεωμετρίας αμελείτε. Αυτό σημαίνει ότι για  $\beta=0$  και για μικρές αποστάσεις ( $s^+ \rightarrow 0$ ) όλες οι λύσεις τείνουν στο  $f(s^+, \beta)=1$  και η λύση είναι ξανά η λύση του «Stephen problem».

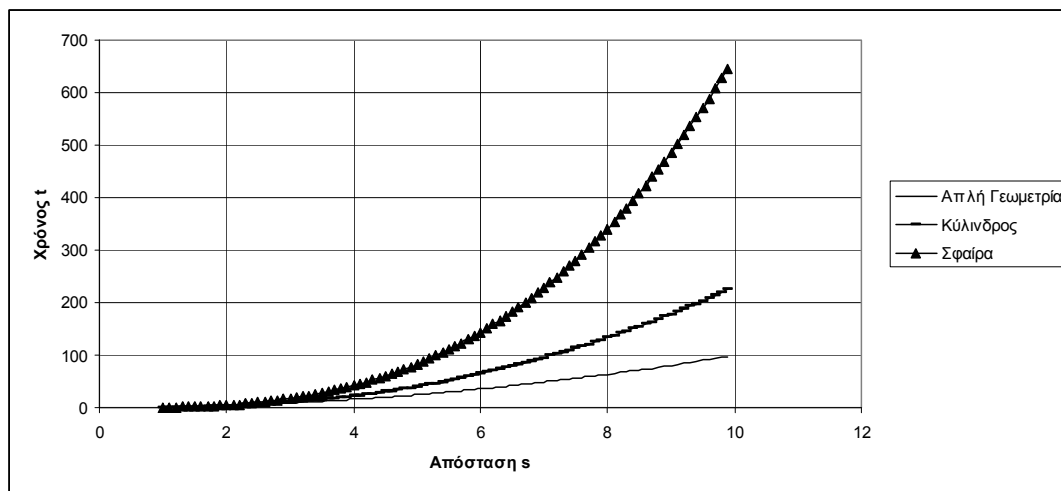
$$t = \frac{\Delta_{pc} h \cdot s^2}{2 \cdot \lambda \cdot (T_{pc} - T_0)} f(s^+, \beta) = \frac{\Delta_{pc} h \cdot s^2}{2 \cdot \lambda \cdot (T_{pc} - T_0)} \quad (83)$$

Μια άλλη περίπτωση είναι να έχουμε πολύ μεγάλο  $s$  ( $s^+ \rightarrow \infty$ ). Εδώ μπορούμε να έχουμε μόνο τρεις πιθανές γεωμετρίες, διότι το PCM μπορεί να είναι μόνο εκτός της διαχωριστικής επιφάνειας. Οι λύσεις φαίνονται στην δεξιά

στήλη στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9) και για τις τρεις περιπτώσεις , επίσης παρατίθενται και οι λύσεις μόνο για  $\beta=0$ .

Πίνακας 9 : Τιμές των $f(s^+, \beta=0)$ , $f(s^+ \rightarrow \infty, \beta=0)$ κατά περίπτωση <sup>[2]</sup>		
-	$f(s^+, \beta=0)$	$f(s^+ \rightarrow \infty, \beta=0)$
Απλό,PCM στην μία πλευρά	1	1
Κύλινδρος,PCM εκτός $s^+ \geq 0$	$\left(1 + \frac{1}{s^+}\right)^2 \cdot \ln(1 + s^+) - \left(1 + \frac{2}{s^+}\right) \cdot \frac{1}{2}$	$\ln(s^+) - \frac{1}{2} = \ln\left(\frac{s}{R}\right) - \frac{1}{2} = \ln\left(\frac{s}{R}\right)$
Κύλινδρος,PCM εντός $1 \geq s^+ \geq 0$	$\left(1 - \frac{1}{s^+}\right)^2 \cdot \ln(1 - s^+) - \left(1 - \frac{2}{s^+}\right) \cdot \frac{1}{2}$	_____
Σφαίρα,PCM εκτός $s^+ \geq 0$	$1 + \frac{2}{3}s^+$	$\frac{2}{3} \cdot \frac{s}{R}$
Σφαίρα,PCM εντός $1 \geq s^+ \geq 0$	$1 - \frac{2}{3}s^+$	_____

Για μεγάλες αποστάσεις  $s^+ \rightarrow \infty$  όλες οι λύσεις είναι διαφορετικές σε σχέση με το  $s$ . Όσον αφορά τις γεωμετρίες το  $s$  αυξάνεται πιο γρήγορα για θέρμανση η ψύξη σε απλή γεωμετρία ύστερα σε κυλινδρική και τέλος σε σφαιρική(παρακάτω διάγραμμα).



Σχήμα 29<sup>[2]</sup>: Διάγραμμα  $t-f(s^+, \beta)$  για  $s \gg R$  και  $R=1$

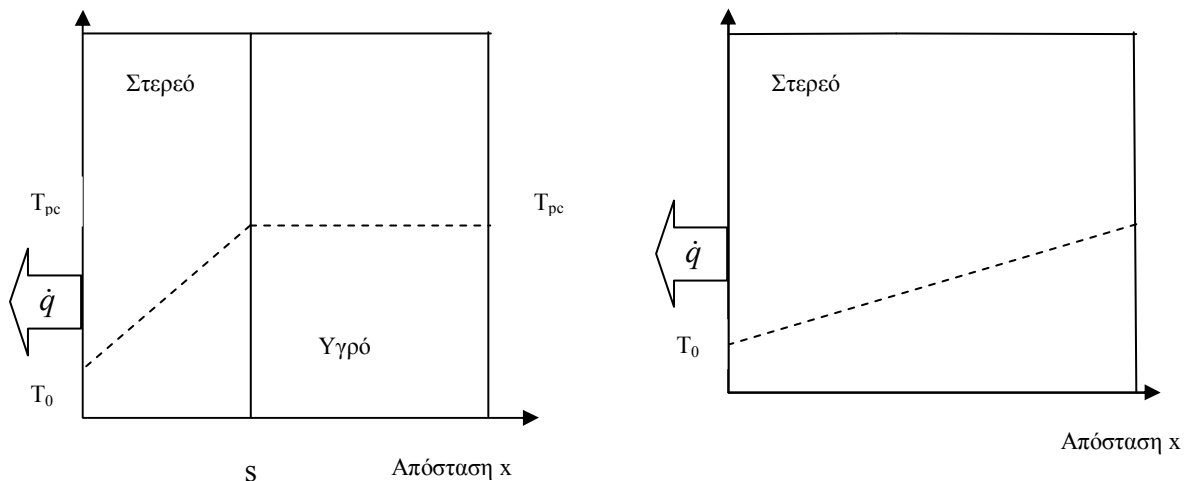
Με Απλή Γεωμετρία:  $t \sim s^2$     Κύλινδρος:  $t \sim s^2 \ln(s/R)$     Σφαίρα:  $t \sim s^2 \cdot 2/3 \cdot s/R$

Τα παραπάνω έχουν σοβαρή επίδραση στην μεταφορά θερμότητας. Όσο πιο γρήγορη είναι η αλλαγή του  $s$  τόσο γρηγορότερη είναι και η αλλαγή της θερμορροής με τον χρόνο ( $dQ/dt$ ). Πάραυτα ποια θερμορροή είναι μεγαλύτερη δεν μπορεί να απαντηθεί ευθέως διότι η εξίσωση (72) δεν ισχύει για κυλινδρικές και σφαιρικές γεωμετρίες.

Τέλος παρατίθεται και ο πίνακας λύσεων για πολύ μεγάλα  $\beta$  (Πίνακας 10).

Πίνακας 10 : Τιμές των $f(s^+, \beta)$ , $f(s^+, \beta \rightarrow \infty)$ κατά περίπτωση <sup>[2]</sup>		
-	$f(s^+, \beta)$	$f(s^+, \beta \rightarrow \infty)$
Απλό ,PCM στην μία πλευρά $s^+ \geq 0$	$1 + 2 \cdot \frac{\beta}{s^+}$	$2 \cdot \frac{\beta}{s^+}$
Κύλινδρος,PCM εκτός $s^+ \geq 0$	$\left(1 + \frac{1}{s^+}\right)^2 \cdot \ln(1 + s^+) - \left(1 + \frac{2}{s^+}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} - \beta\right)$	$2 \cdot \frac{\beta}{s^+} + \beta$
Κύλινδρος,PCM εντός $1 \geq s^+ \geq 0$	$\left(1 - \frac{1}{s^+}\right)^2 \cdot \ln(1 - s^+) - \left(1 - \frac{2}{s^+}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \beta\right)$	$2 \cdot \frac{\beta}{s^+} - \beta$
Σφαίρα,PCM εκτός $s^+ \geq 0$	$1 + \frac{2}{3}s^+ + \frac{2 \cdot \beta}{s^+} \left(1 + s^+ + \frac{(s^+)^2}{3}\right)$	$2 \cdot \frac{\beta}{s^+} \left(1 + s^+ + \frac{(s^+)^2}{3}\right)$
Σφαίρα,PCM εντός $1 \geq s^+ \geq 0$	$1 - \frac{2}{3}s^+ + \frac{2 \cdot \beta}{s^+} \left(1 - s^+ + \frac{(s^+)^2}{3}\right)$	$2 \cdot \frac{\beta}{s^+} \left(1 - s^+ + \frac{(s^+)^2}{3}\right)$

#### 7.4 Επίπεδο με πεπερασμένο πάχος<sup>[2]</sup>



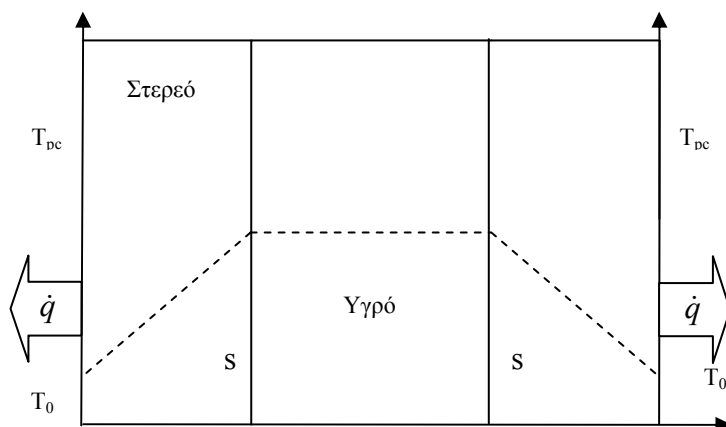
**Σχήμα 30:** Ψύξη επιπέδου με πεπερασμένο πάχος από την μία πλευρά μέχρι το μέτωπο αλλαγής φάσης να φτάσει στην άλλη άκρη.

Όταν η αισθητή θερμότητα αμελείτε , είναι δυνατόν να επεξεργαστούμε και επίπεδα με πεπερασμένο πάχος.

Επειδή οι υπολογισμοί βασίζονται στην υπόθεση ότι η θερμοκρασία είναι η θερμοκρασία τήξης από την αρχή μέχρι το τέλος, το πεπερασμένο πάχος δεν έχει καμία επίδραση μέχρις ότου το μέτωπο αλλαγής φάσης φτάσει στο απέναντι άκρο του PCM. Οι εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως πριν αρκεί το  $s$  να μην ξεπερνάει το πάχος του επιπέδου.



Παρόμοιο είναι το πρόβλημα όταν ψύχουμε και από τις δύο πλευρές. Το μέτωπο αλλαγής φάσης σε αυτή την περίπτωση μετακινείται και από τις δύο πλευρές του PCM. Τα δύο διαφορετικά μέτωπα θα συναντηθούν και η διαδικασία θα τελειώσει. Πάλι όμως πρέπει το άθροισμα των δύο αποστάσεων που έχει διανυθεί να μην ξεπερνά το πάχος του επιπέδου. Η ίδια προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για σφαιρικές και κυλινδρικές γεωμετρίες.



**Σχήμα 31:** Ψύξη επίπεδου με πεπερασμένο πάχος και από τις δύο πλευρές

### 7.5 Θερμική ανάλυση δεξαμενής που περιέχει PCM σε μικροκάψουλες.<sup>[9]</sup>

Θα παρουσιάσουμε ένα μοντέλο προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς μιας αποθήκης λανθάνουσας θερμότητας, η οποία πληρώνεται από μικρά σώματα σφαιρικής γεωμετρίας που περιέχουν ένα υλικό αλλαγής φάσης (παραφίνη, ένυδρο άλας).

Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι ο αέρας και δεν χρησιμοποιείται ενεργητικός ή παθητικός εναλλάκτης θερμότητας, όπως συμβαίνει στις πιο πρόσφατες εμπορικές δραστηριότητες. Η αποθήκη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα θέρμανσης ή ψύξης αέρα.

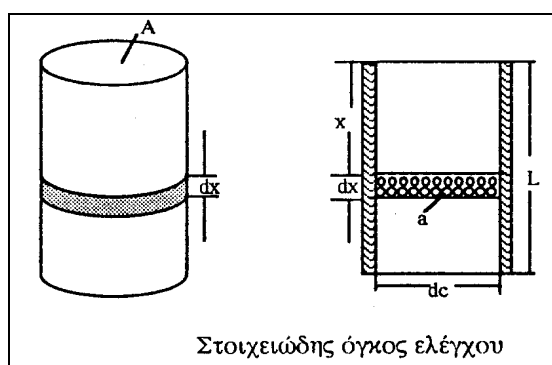
Το μοντέλο της θερμικής συμπεριφοράς της αποθήκης περιγράφεται από τρεις εξισώσεις, μια για τον αέρα, μια για το πληρωτικό υλικό σε κάθε μονοφασική κατάσταση (στερεά-υγρή) και μια για την περιοχή αλλαγής φάσης. Η λύση των εξισώσεων αυτών προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών.

Θα πραγματοποιήσουμε μια μονοδιάστατη ανάλυση του φαινομένου, θα θεωρήσουμε δηλαδή ότι υπάρχει μια ομοιόμορφη κατάσταση σε κάθε διατομή της στρωμάτωσης του υλικού στη δεξαμενή. Ακόμη, τα συσσωρευμένα υλικά και το ρευστό βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες και συνδέονται με έναν ογκομετρικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

## Μοντέλο για το ρευστό

### Παραδοχές

- Η δεξαμενή θεωρείται μια πολύ καλά μονωμένη κυλινδρική δεξαμενή. Επομένως, οι απώλειες των τοιχωμάτων της δεξαμενής προς το περιβάλλον θεωρούνται αμελητέες και για αυτό οι θερμοκρασιακές μεταβολές κατά την ακτινική διεύθυνση γίνονται ασήμαντες.
- Δεχόμαστε ότι σε κάθε διατομή της στρωμάτωσης δεν υπάρχουν διακυμάνσεις στην ταχύτητα της ροής και στην πτώση πίεσης κατά την ακτινική διεύθυνση.
- Όσον αφορά στη ροή του ρευστού θεωρούμε ότι είναι τύπου εμβόλου και ισχύουν τα φαινόμενα διασποράς του ρευστού διαμέσου των συσσωρευμένων υλικών
- Όσον αφορά το πληρωτικό υλικό θεωρούμε ότι υπάρχει αγωγή θερμότητας με ομοκεντρικό προφίλ θερμοκρασιών μέσα σε κάθε σφαίρα.



**Σχήμα 32: Κυλινδρική δεξαμενή αποθήκευσης ενέργειας, και στοιχειώδης όγκος αυτής με πληρωτικό υλικό,**

Το ενεργειακό ισοζύγιο που ισχύει για ένα στοιχειώδη όγκο μιας στήλης με πληρωτικό υλικό που διαρρέεται από αέρα είναι :

$$-A \cdot \frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot dxdt - m \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial x} dxdt - h \cdot a \cdot A \cdot dxdt \cdot (T - T_{sw}) = \rho_r \cdot \varepsilon \cdot C_p \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} dxdt \quad (84)$$

Όπου ο 1<sup>ος</sup> όρος στα αριστερά δίνει το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται με αγωγή διαμέσου των σφαιρών-αέρα, ο 2<sup>ος</sup> τη θερμότητα που μεταφέρεται (μεταβολή ενθαλπίας) από το ρευστό λόγω συναγωγής, ο 3<sup>ος</sup> το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από τον αέρα προς τις σφαίρες και ο όρος στα

δεξιά τη μεταβολή της ενέργειας που αποθηκεύεται στο ρευστό (τοπική μεταβολή εσωτερικής ενέργειας.)

Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\dot{m} = \rho_f \cdot u \cdot A = G_o \cdot A$ , διαιρούμε με  $\varepsilon \cdot \rho_f \cdot Cp_f$  και έχουμε :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_{ax} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{h \cdot a}{\varepsilon \cdot \rho_f \cdot Cp_f} (T - T_{sur}), \quad (85)$$

οι οριακές συνθήκες είναι:

$$x = 0 : T(0, t) = T_{in}(t)$$

$$x = L : \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

οι αρχικές συνθήκες είναι :

$$t = 0 : T(x, 0) = T_0(x)$$

Αν αγνοηθούν οι επιδράσεις της διασποράς στο ρευστό τότε η διαφορική εξίσωση του ρευστού γίνεται:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{h \cdot a}{\varepsilon \cdot \rho_f \cdot Cp_f} (T - T_{sur}) \quad (86)$$

Θεωρούμε ότι ο συντελεστής συναγωγής είναι σταθερός και κοινός κοντά ή μακριά στο τοίχωμα και δίνεται από τη σχέση

$$h = \frac{j_h \cdot Cp_f \cdot G_o}{Pr^{2/3}} \quad (87)$$

Όπου:

$$j = \frac{2}{Re_0 \cdot Pr^{1/3}} + \frac{2.031}{Re^{1/2}} + 0.049 \cdot Pr^{1/6} \quad (88)$$

### Μοντέλο για το πληρωτικό υλικό αλλαγής φάσης

Για τη μονοδιάστατη ανάλυση της συμπεριφοράς του PCM, θεωρούμε ότι:

- το μέτωπο τήξης / πήξης είναι οξύ, δηλαδή δεν υπάρχει διφασική περιοχή ανάμεσα στο υγρό-στερεό)
- αγνοούμε τις επιδράσεις φυσικής συναγωγής στην υγρή περιοχή του υλικού

- θεωρούμε σφαιρικά συμμετρική τήξη /πήξη
- η μεταβολή του όγκου του υλικού εξαιτίας της αλλαγής φάσης είναι αμελητέα

Η εξίσωση που περιγράφει το θερμοκρασιακό πεδίο σε μια σφαίρα, σαν συνάρτηση της θέσης και του χρόνου, σε σφαιρικές συντεταγμένες, για μεταβολή της θερμοκρασίας μόνο κατά την ακτινική διεύθυνση είναι :

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = a_i \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) \quad (89)$$

Όπου ο δείκτης  $i = s$  για τη στερεά φάση και  $i=l$  για την υγρή φάση, με οριακές συνθήκες :

$$r = 0 : \frac{\partial T_i}{\partial r} = 0$$

$$r = R : h \cdot (T - T_{sur}) = K_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial r}$$

Η οριακή συνθήκη στην κινούμενη επιφάνεια διαχωρισμού της υγρής/στερεάς φάσης είναι:

$$\rho \cdot \Delta h_f \cdot \left( \frac{dr_i}{dt} \right) = K_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) - K_l \left( \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) \quad (90)$$

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει κατά την τήξη στη διεπιφάνεια υγρού-στερεού για:

$$r = r_i : T_s = T_l = T_m$$

Οι παραπάνω εξισώσεις για την εύρεση των θερμοκρασιακών πεδίων του αέρα και του πληρωτικού υλικού στις δύο φάσεις, μπορούν να λυθούν κυρίως με αριθμητικές μεθόδους, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών.

**Συμβολισμοί:**

A: Μετωπική επιφάνεια σε  $m^2$

$\alpha$ : Διαθέσιμη επιφάνεια ροής ανά μονάδα όγκου =  $6(1-\epsilon)/d_p$

$d_p$ : Διάμετρος σφαίρας PCM σε m

$C_p$ : Ειδική θερμότητα, kJ/kgK

dr: Ακτινικό βήμα σε m

dt: Χρονικό βήμα σε sec

dx: Αξονικό βήμα σε m

$G_o$ : Παροχή μάζας ανά μονάδα μετωπικής επιφάνειας  $= \rho / u_o$ ,  $\text{kg/m}^2\text{h}$

$h$ : Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στο ρευστό (αέρα) και το PCM σε  $\text{W/m}^2\text{K}$

$K$ : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε  $\text{W/mK}$

$L$ : Μήκος δεξαμενής σε  $\text{m}$

$\dot{m}$ : Ροή μάζας αέρα σε  $\text{m}^3/\text{h}$

$Pr$ : Αριθμός Prandtl  $= \mu \cdot C_p / K_f$

$R$ : Ακτίνα σφαίρας PCM σε  $\text{m}$

$Re$ : Αριθμός Reynolds  $= d_p \cdot G_o / \mu$

$T$ : Θερμοκρασία ρευστού σε  $^\circ\text{C}$

$t$ : Χρόνος σε  $\text{sec}$

$T_m$ : Θερμοκρασία τήξης υλικού σε  $^\circ\text{C}$

$T_{\text{sur}}$ : Θερμοκρασία της επιφάνειας του PCM  $^\circ\text{C}$

$u_o$ : Μετωπική ταχύτητα αέρα  $= u \cdot \varepsilon$  σε  $\text{m/sec}$

$u$ : Ταχύτητα του αέρα σε  $\text{m/sec}$

$\alpha_{ax}$ : Πραγματικός συντελεστής διαχυτότητας του διαρρομένου υλικού στην αξονική διεύθυνση σε  $\text{m}^2/\text{s}$

$\Delta h_f$ : Λανθάνουσα θερμότητα υλικού σε  $\text{kJ/kgK}$

$\varepsilon$ : πορώδες

$\rho$ : πυκνότητα σε  $\text{kg/m}^3$

**Δείκτες**

$s$ : Στερεά φάση

$l$ : Υγρή φάση

$f$ : Αέρας

$i$ : Ανάλογα με τη φάση του υλικού παίρνει τιμές  $s, l$

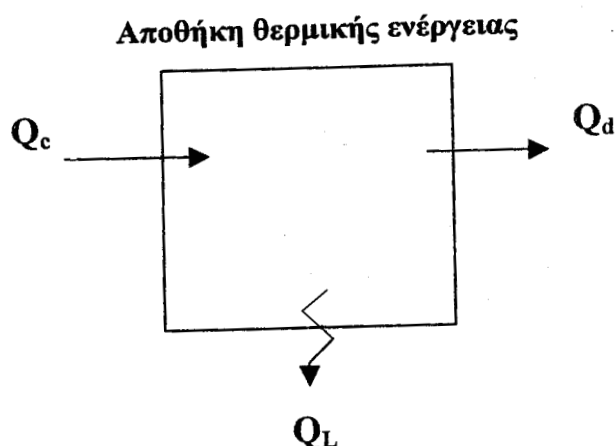
$o$ : Αρχική τιμή

## 7.6 Απόδοση κλειστών συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας<sup>[3]</sup>

Ως γνωστόν ένα σύστημα για να είναι αξιοποιήσιμο και εφαρμόσιμο θα πρέπει να έχει ένα μεγάλο βαθμό απόδοσης. Η απόδοση καθορίζεται σαν την ικανότητα ενός συστήματος να παράγει ένα επιθυμητό αποτέλεσμα χωρίς απώλειες ή τουλάχιστον με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, χρόνου, πηγών κλπ.

Η απόδοση ενός συστήματος μας δείχνει το πόσο κοντά στο ιδανικό σύστημα (όπου βαθμός απόδοσης ίσος με τη μονάδα) λειτουργεί το υπό εξέταση δικό μας σύστημα.

Μία διαδικασία σε ένα ενεργειακό σύστημα επιτυγχάνεται με τη μέγιστη απόδοση σύμφωνα με το 1<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα όταν η ενέργεια που εισάγεται σε αυτό ισούται με την ενέργεια που ανακτάται από αυτό με το πέρας της διαδικασίας.



**Σχήμα 33: Αναπαράσταση αποθήκης θερμικής ενέργειας**

Ο ενεργειακός ισολογισμός για την όλη αποθηκευτική διαδικασία μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$Q_c - [Q_d + Q_L] = \Delta E \quad (91)$$

Όπου:

$Q_c$ : Εισερχόμενη θερμική ενέργεια

$Q_d$ : Εξερχόμενη θερμική ενέργεια

$Q_L$ : Θερμικές απώλειες

Όταν η διαδικασία της αποθήκευσης θερμότητας γίνεται ιδανικά τότε για έναν πλήρη κύκλο φόρτισης-αναμονής-αποφόρτισης είναι  $\Delta E=0$ . Το μέγεθος  $\Delta E$  ορίζεται σαν το μέγεθος της ενεργειακής συσσώρευσης και συνήθως είναι διάφορο του μηδενός, αφού είναι σχεδόν πάντα αδύνατο να έχουμε τις ίδιες ενεργειακές αρχικές και τελικές συνθήκες.

Αν  $E'$  είναι το ενεργειακό περιεχόμενο της αποθήκης θερμότητας και  $E'_i$ ,  $E'_f$  το ενεργειακό περιεχόμενο της αποθήκης ενέργειας αρχικά και τελικά αντίστοιχα, τότε :

$$\Delta E = E'_f - E'_i \quad (92)$$

Γενικές εκφράσεις του βαθμού απόδοσης για το παραπάνω κλειστό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

- $\eta_A$  = Ενέργεια που ανακτάται / Ενέργεια εισαγωγής,

$$\eta_A = \frac{Q_d}{Q_c} = 1 - \frac{Q_L + \Delta E}{Q_c} \quad (93)$$

- $\eta_B$  = (Ενέργεια που ανακτάται + Ενεργειακή συσσώρευση) / Ενέργεια εισαγωγής

$$\eta_B = \frac{Q_d + \Delta E}{Q_c} = 1 - \frac{Q_L}{Q_c} \quad (94)$$

- $\eta_C$  = Ενέργεια που ανακτάται / (Ενέργεια εισαγωγής + Αρχική ενέργεια που βρίσκεται ήδη στην αποθήκη)

$$\eta_C = \frac{Q_d}{Q_c + E'_i} = 1 - \frac{Q_L + E'_f}{Q_c + E'_i} \quad (95)$$

- $\eta_D$  = (Ενέργεια που ανακτάται + Τελική ενέργεια στην αποθήκη) / (Ενέργεια εισαγωγής + Αρχική ενέργεια που βρίσκεται ήδη στην αποθήκη)

$$\eta_D = \frac{Q_d + E'_f}{Q_c + E'_i} = 1 - \frac{Q_L}{Q_c + E'_i} \quad (96)$$

Ας σημειώσουμε ότι  $\eta_A = \eta_B = \eta_C = \eta_D$  όταν  $E'_i = E'_f$  ενώ  $\eta_A = \eta_B$  όταν  $\Delta E = 0$ .

Ακόμη, αν  $\Delta E < 0$ , οι εκφράσεις A, δεν δίνουν κάποια λογικά αποτελέσματα. Οι πιο αξιόπιστες εκφράσεις φαίνονται να είναι οι εκφράσεις C, D.

Αν εξετάσουμε χωριστά τις περιόδους φόρτισης, αναμονής και αποφόρτισης της αποθήκης, τότε για την έκφραση D του βαθμού απόδοσης μπορούμε να γράψουμε τα εξής:

$$\eta_{D,1} = \frac{E'_{f,1}}{Q_c + E'_{i,1}} = 1 - \frac{Q_{L,1}}{Q_c + E'_{i,1}} \quad (97)$$

Ο δείκτης 1 αναφέρεται στο στάδιο της φόρτισης.

$$\eta_{D,2} = \frac{E'_{f,2}}{E'_{i,2}} = 1 - \frac{Q_{L,2}}{Q_c + E'_{i,2}} \quad (98)$$

Ο δείκτης 2 αναφέρεται στο στάδιο της αναμονής, όπου η θερμική ενέργεια διατηρείται στην αποθήκη.

$$\eta_{D,3} = \frac{Q_d + E'_{f,3}}{E'_{i,3}} = 1 - \frac{Q_{L,3}}{E'_{i,3}} \quad (99)$$

Ο δείκτης 3 αναφέρεται στο στάδιο της αποφόρτισης της αποθήκης.

Αν χρησιμοποιήσουμε τις παραπάνω εκφράσεις για κάθε στάδιο της αποθηκευτικής διαδικασίας ξεχωριστά, τότε ο συνολικός βαθμός απόδοσης δίνεται από τον πολλαπλασιασμό των επιμέρους βαθμών απόδοσης, δηλ.

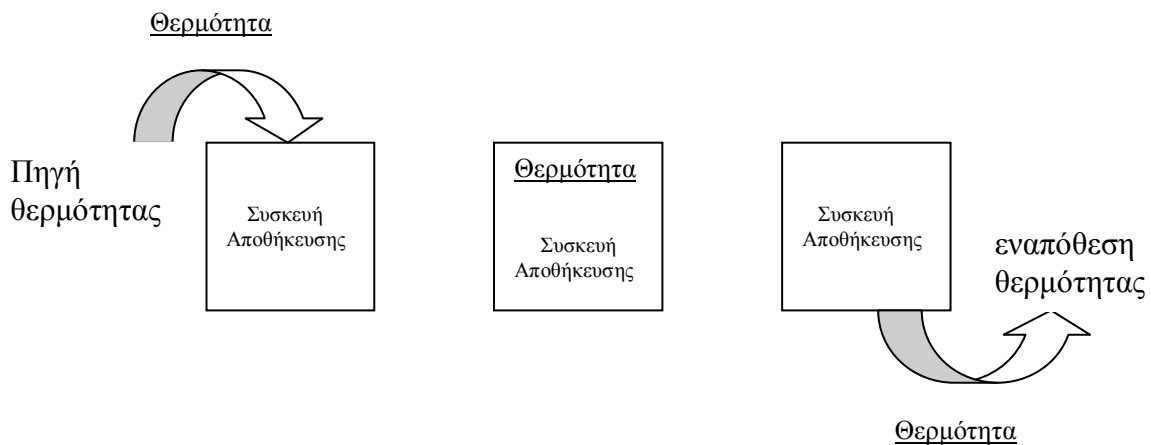
$$\eta_D = \eta_{D,1} \cdot \eta_{D,2} \cdot \eta_{D,3} \quad (100)$$



## 8 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΛΑΝΘΑΝΟΝΤΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο δείξαμε πως υπολογίζεται η θερμορροή και ο χρόνος ολοκλήρωσης της αλλαγής φάσης σε απλές γεωμετρίες. Εδώ χρησιμοποιούμε τα παραπάνω για τον σχεδιασμό ολοκληρωμένων συστημάτων θερμικής αποθήκευσης λανθάνοντος φορτίου. Η ποικιλία των σχεδιαστικών επιλογών είναι μεγάλη και ο λόγος είναι ότι εκτός του νερού γίνεται χρήση και υλικών αλλαγής φάσης ως μέσου αποθήκευσης με εντελώς διαφορετική συμπεριφορά από το νερό

### 8.1 Περιορισμοί στην αποθήκευση<sup>[2]</sup>



Σχήμα 34: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας συσκευής αποθήκευσης

Η αποθήκευσης θερμότητας σχετίζεται με την μεταφορά θερμότητας σε τρία σημεία:

- Μεταφορά θερμότητας από την πηγή στην συσκευή αποθήκευσης
- Μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό του μέσου αποθήκευσης
- Μεταφορά θερμότητας από το μέσο αποθήκευσης στο μέσο εναπόθεσης.

Κάθε εφαρμογή αποθήκευσης θέτει κάποιους περιορισμούς :

1. Περιορισμούς στην Θερμοκρασία:

Θερμοκρασία πρόσδωσης θερμότητας  $\geq$  Θερμοκρασία αποθήκευσης  $\geq$  Θερμοκρασία εναπόθεσης

2. Περιορισμούς στην Ισχύ
3. Περιορισμούς στο ρευστό που χρησιμοποιείται για την μεταφορά θερμότητας

Η θερμοκρασία στην πηγή της θερμότητας , πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με την θερμοκρασία στο μέσο αποθήκευσης και αντίστοιχα η θερμοκρασία του μέσου αποθήκευσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή του μέσου

εναπόθεσης της θερμότητας(Το αντίθετο ισχύει για την αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας). Αυτό είναι αναγκαίο ώστε η θερμότητα να ρέει προς την σωστή κατεύθυνση , όπως και αν πραγματοποιείται η μεταφορά θερμότητας.

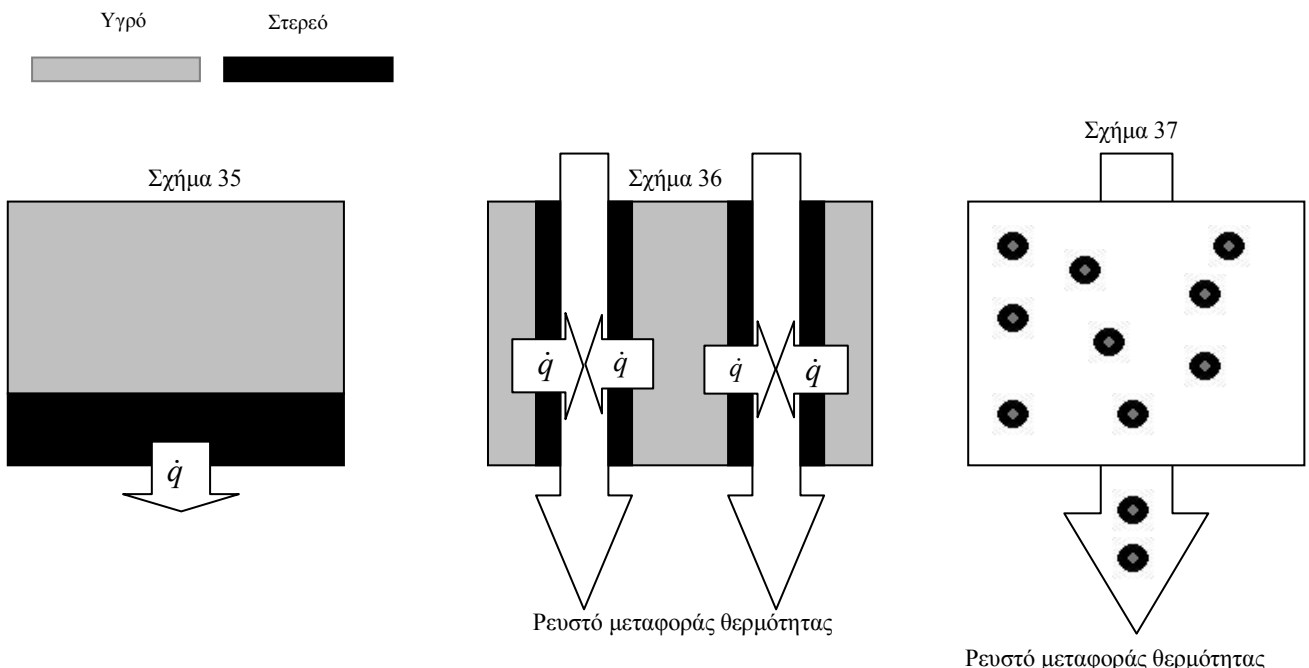
Σε πολλές εφαρμογές τίθεται υπό περιορισμούς το ποσό της θερμότητας που πρέπει να προσδίδεται στο σύστημα ή να αποδίδεται από το σύστημα σε κάποιο χρονικό διάστημα(Ισχύ). Τέλος ανάλογα με την εφαρμογή έχουμε περιορισμούς στο ρευστό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά θερμότητας καθώς και αν θα έχουμε ελεύθερη ή εξαναγκασμένη συναγωγή.

Κάνοντας χρήση ενός εναλλάκτη θερμότητας διαχωρίζουμε το ρευστό από το μέσο αποθήκευσης , καθώς και το ρευστό από το μέσο εναπόθεσης. Ένας τέτοιος διαχωρισμός μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε διάφορα μέσα, πιέσεις ή και καθαρότητα όπως σε ένα σύστημα ζεστού νερού για οικιακή χρήση.

## 8.2 Βασικές σχεδιαστικές επιλογές<sup>[2]</sup>

Το πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας από την πηγή στο μέσο αποθήκευσης και από το μέσο αποθήκευσης στο μέσο εναπόθεσης είναι ίδιο , οπότε θα αναλύσουμε το τελευταίο για την αποφυγή επαναλήψεων. Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ «πηγής - μέσου αποθήκευσης» και «μέσου αποθήκευσης - μέσου εναπόθεσης» πραγματοποιείται σε μία επιφάνεια συναλλαγής , τα μέσα για την αποθήκευση και την μεταφορά θερμότητας είναι σε πολλές περιπτώσεις διαφορετικά και όσον αφορά τα PCM τουλάχιστον στην υγρή τους φάση πρέπει να είναι εγκιβωτισμένα. Τα παραπάνω οδηγούν σε τρεις βασικές επιλογές:

1. Συναλλαγή θερμότητας στην επιφάνεια του μέσου αποθήκευσης (Σχήμα 35)
2. Συναλλαγή θερμότητας σε μεγάλες επιφάνειες μέσα στο μέσο αποθήκευσης (Σχήμα 36)
3. Συναλλαγή θερμότητας συναλλάσσοντας το μέσο αποθήκευσης (Σχήμα 37)



### 1. Συναλλαγή θερμότητας στην επιφάνεια του μέσου αποθήκευσης

Όσον αφορά την θερμική αντίσταση στην επιφάνεια ξεχωρίζουμε:

- Επαφή του στερεού με την πηγή ή την δεξαμενή εναπόθεσης ή με ένα ρευστό το οποίο παραμένει ακίνητο , σε αυτή την περίπτωση έχουμε μεταφορά θερμότητας με αγωγή
- Μεταφορά θερμότητας δια ελεύθερης η εξαναγκασμένης συναγωγής(Επαφή επιφάνειας με κινούμενο ρευστό)
- Ρευστό που είναι ατμοποιημένο ή συμπυκνωμένο

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας καθώς και η θερμική αντίσταση για κάθε περίπτωση διαφέρουν. Εάν η αντίσταση είναι σημαντική ή όχι , εξαρτάται από: την ενέργεια που χρειάζεται η εφαρμογή καθώς και τη διαφορά θερμοκρασίας που οδηγεί την θερμοροή και τον σχεδιασμό του μέσου αποθήκευσης όσων αφορά την γεωμετρία. Για την αύξηση της μεταφερόμενης θερμότητας , μπορούμε να αυξήσουμε τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ή την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας.

### 2.Συναλλαγή θερμότητας σε μεγάλες επιφάνειες μέσα στο μέσο αποθήκευσης

Όταν η εξωτερική επιφάνεια του μέσου αποθήκευσης δεν είναι αρκετή για την εκάστοτε εφαρμογή τότε μπορούμε να δημιουργήσουμε επιπλέον επιφάνειες μέσα στο μέσο αποθήκευσης. Αυτού του είδους η προσέγγιση περιλαμβάνει και πτερύγια τα οποία διευρύνουν ακόμα περισσότερο την επιφάνεια συναλλαγής. Οι μεγάλες επιφάνειες μέσα στο μέσο αποθήκευσης έχουν τρία πλεονεκτήματα:

- Η σημαντική αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής
- Μειώνεται το μέγιστο πάχος των στρωμάτων του PCM και συνεπώς το μήκος διεύθυνσης του μετώπου αλλαγής φάσης. Σαν αποτέλεσμα μειώνεται η συνολική θερμική αντίσταση και η θερμοκρασιακή πτώση κατά την διάρκεια φόρτισης ή αποφόρτισης
- Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται μία αντλία ή ένας ανεμιστήρας για την κίνηση του ρευστού με επακόλουθο την εξαναγκασμένη συναγωγή που αυξάνει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του ρευστού

### 3.Συναλλαγή θερμότητας συναλλάσσοντας το μέσο αποθήκευσης

Σε αυτή την περίπτωση το ίδιο το μέσο αποθήκευσης θερμότητας είναι και το μέσο συναλλαγής θερμότητας. Αυτού του είδους ο σχεδιασμός συναντάται στην αποθήκευση θερμότητας με θερμό νερό. Στην περίπτωση αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας η ανάγκη το μέσο μεταφοράς θερμότητας να είναι ρευστό επιβάλλει να αντλείται το PCM. Ένα παράδειγμα είναι η διασπορά PCM εγκιβωτισμένου σε μικροκάψουλες μέσα σε ρευστό.

Όσον αφορά την πρώτη επιλογή (συναλλαγή θερμότητας στην επιφάνεια του μέσου αποθήκευσης) η μεταφορά θερμότητας είναι συνήθως

εξολοκλήρου παθητική , στις επιλογές 2 και 3 η μεταφορά θερμότητας γίνεται κυρίως με εξαναγκασμένη συναγωγή έτσι ώστε η απόδοση ή η πρόσδοση θερμότητας γίνεται όποτε εμείς απαιτούμε. Μέσα αποθήκευσης για έλεγχο της θερμοκρασίας κατασκευάζονται συνήθως σύμφωνα με την επιλογή (1) ενώ συστήματα για την παροχή θερμότητας η ψύξης χρησιμοποιούν τις επιλογές (2) και (3).

### **8.3 Συστήματα αποθήκευσης με συναλλαγή θερμότητας στην επιφάνεια του μέσου αποθήκευσης<sup>[2]</sup>**

Τα συστήματα αποθήκευσης με συναλλαγή θερμότητας στην επιφάνεια του μέσου αποθήκευσης μπορούν να περιγραφούν απλοποιημένα με βάση το μοντέλο της μονοδιάστατης μεταφοράς θερμότητας στρώματος PCM με οριακές συνθήκες (ΚΕΦ 5 αναλυτικών μοντέλων).

Αυτού του είδους τα συστήματα έχουν συνήθως χαμηλή ισχύ, ειδικά όταν η θερμότητα μεταφέρεται σε αέριο όπου ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι σχετικά μικρός. Η μικρή ισχύ περιορίζει την αποθηκευμένη ενέργεια που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε, επομένως αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ελέγχου της θερμοκρασίας ,με την ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας να ορίζει στην ουσία τον χρόνο που μπορεί να κρατήσει αυτός ο έλεγχος.

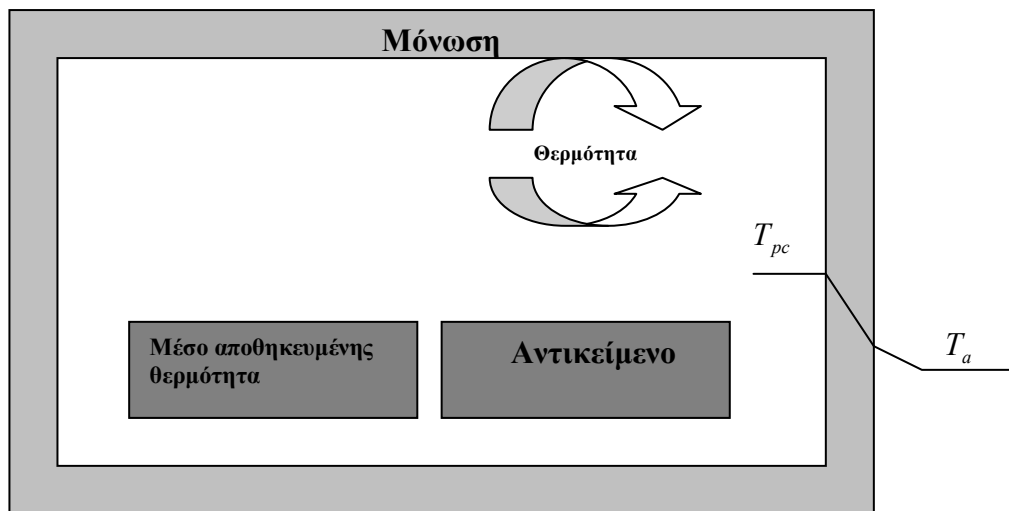
Στις περιπτώσεις που χρειάζεται βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας το υλικό αποθήκευσης, τότε καλή επιλογή είναι PCM από γραφίτη που βελτιώνει την μεταφορά θερμότητας και εγγυάται σταθερή θερμοκρασία στην επιφάνεια για το περισσότερο δυνατό.

#### **Παραδείγματα**

##### *Μονωμένο περιβάλλον*

Το πρόβλημα ενός αντικειμένου που ελαττώνει την θερμοκρασία του λόγω απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον αντιμετωπίζεται συνήθως με μόνωση , ελέγχοντας έτσι κατά ένα μέρος την θερμοκρασία(μικρότερες απώλειες θερμότητας)(Σχ. 38).

Το αντικείμενο από μόνο του έχει ανεπαρκή θερμοαποθηκευτική ικανότητα για αυτό και χρησιμοποιείται η μόνωση. Για να παρατείνουμε περισσότερο τον έλεγχο της θερμοκρασίας , μία αποθηκευμένη ποσότητα θερμότητας προστίθεται που προσδίδει μικρά ποσά θερμότητας έτσι ώστε να εξισορροπηθούν οι απώλειες από την μόνωση. Επειδή τα υλικά αλλαγής φάσης προσδίδουν την θερμότητα σε σταθερή θερμοκρασία , είναι η καλύτερη επιλογή για αυτόν το σκοπό.



$T_{pc}$  → θερμοκρασία τήξης του PCM       $T_a$  → θερμοκρασία περιβάλλοντος

**Σχήμα 38: Χρήση συστήματος συναλλαγής θερμότητας στην επιφάνεια του μέσου αποθήκευσης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας σε μονωμένο περιβάλλον**

### Υπολογισμοί

Αν η απαιτούμενη θερμότητα είναι μικρή η περίπτωση είναι παρόμοια με το μοντέλο που δόθηκε στο κεφάλαιο 5 (Αναλυτικά μοντέλα). Οι οριακές συνθήκες τώρα περιλαμβάνουν την μεταφορά θερμότητας εντός και εκτός της μόνωσης, καθώς και στην ίδια την μόνωση. Αν συμβουλευτούμε τον πίνακα ... βλέπουμε πως μπορούμε να αμελήσουμε την θερμική αντίσταση του PCM σαν μία πρώτη προσέγγιση. Έτσι το πρόβλημά μας απλοποιείται σημαντικά.

Τέλος αν αμελήσουμε την αποθηκευτική ικανότητα του αντικειμένου στο οποίο ελέγχουμε την θερμοκρασία μπορούμε να κάνουμε μία πρώτη εκτίμηση. Η θερμοκρασία θα μπορεί να ελέγχεται έως ότου η λανθάνουσα θερμότητα που είναι αποθηκευμένη στο PCM χαθεί στο περιβάλλον.

$$\Delta H = \frac{dQ}{dt} \Delta t \quad (101)$$

Η λανθάνουσα θερμότητα είναι  $m \cdot \Delta h$ , και ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $k_{eff}$  στο περιβάλλον, περιλαμβάνει την μόνωση καθώς και τα εσωτερικά και εξωτερικά όρια. Τέλος αν  $A$  είναι η επιφάνεια του μονωμένου δοχείου έχουμε:

$$\Delta H = m \cdot \Delta_{pc} h = \frac{dQ}{dt} \cdot \Delta t = A \cdot k_{eff} \cdot (T_{pc} - T_a) \cdot \Delta t \quad (102)$$

Με την λύση του προβλήματος να είναι:

$$\Delta t = \frac{m \cdot \Delta_{pc} h}{A \cdot k_{eff} \cdot (T_{pc} - T_a)} \quad (103)$$

Εύκολα τώρα μπορεί να υπολογιστεί πια είναι η βελτίωση χρησιμοποιώντας το PCM. Το αντικείμενο από μόνο του μπορεί να προσδώσει μόνο αυτό που αποθηκεύει (υπό μορφή αισθητής θερμότητας) μέσα στην θερμοκρασιακή διαφορά στην οποία βρίσκεται. Για παράδειγμα στην περίπτωση που το αντικείμενο έχει θερμοχωρητικότητα 4 kJ/KgK, η θερμοκρασιακή διαφορά είναι 5K και αποθηκεύει 20 kJ. Υποθέτοντας ότι το υλικό αλλαγής φάσης και το αντικείμενο έχουν την ίδια μάζα και ότι η ενθαλπία αλλαγής φάσης είναι 200 kJ/Kg, η αναλογία της επιπλέον συνεισφοράς του PCM στην αρχικά αποθηκευμένη θερμότητα στο αντικείμενο είναι:

$$\frac{m_{pcm} \cdot \Delta_{pc} h}{m_{αντικειμένου} \cdot C_{p,αντικειμένου} \cdot \Delta T} = 10 \quad (105)$$

Η ενέργεια που αποθηκεύεται για την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας μέσα στο εύρος των 5K είναι δέκα φορές μεγαλύτερη, με συνέπεια και η θερμοκρασία να σταθεροποιείται για δέκα φορές μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

#### **8.4 Βελτιωμένη θερμική επαφή μεταξύ μέσου αποθήκευσης και μέσου εναπόθεσης, καθόλου μόνωση<sup>[2]</sup>**

Σε αυτή την περίπτωση δεν έχουμε μόνωση και το αντικείμενό μας έρχεται σε άμεση επαφή με το περιβάλλον, με συνέπεια να αλλάζει η θερμοκρασία του με ανεπιθύμητο τρόπο. Για την ρύθμιση της θερμοκρασίας προτίθεται ένα μέσο με αποθηκευμένη ενέργεια, η θερμική επαφή μεταξύ της δεξαμενής αποθηκευμένης ενέργειας και του αντικειμένου είναι καλή για την εξασφάλιση επαρκούς μεταφοράς θερμότητας.

Υπάρχουν αρκετά παραδείγματα για την παραπάνω εφαρμογή, όπως η χρήση πάγου στο δέρμα για την ψύξη ενός τραύματος, η χρήση φορητών θερμαντών (rocket heaters) ή η χρήση μέσου με αποθηκευμένη ενέργεια για την αποφυγή υπερθέρμανσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

#### **Υπολογισμοί**

Σε αυτή την περίπτωση η θερμοκρασιακή διαφορά που προσδιορίζει την μεταφορά θερμότητας συνήθως δεν είναι σταθερή. Ο λόγος είναι πως μπορεί να υπάρχουν σημαντικές αυξομειώσεις της θερμοκρασίας που θα απαιτείται να έχει το αντικείμενό μας (ζήτηση). Οι υπολογισμοί είναι περισσότερο πολύπλοκοι λόγω της αυξομείωσης της θερμοκρασίας. Πρέπει να

εφαρμοστούν υπολογιστικά μοντέλα για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα για την μεταφορά θερμότητας και την μεταβολή της θερμοκρασίας με τον χρόνο. Μία εξαίρεση είναι όταν η θερμική αντίσταση μεταξύ PCM και αντικειμένου καθώς και η θερμική αντίσταση του PCM και του αντικειμένου ξεχωριστά, είναι πολύ μικρότερη από αυτήν προς το περιβάλλον.

### **8.5 Συναλλαγή θερμότητας με επιφάνειες μέσα στο μέσο αποθήκευσης<sup>[2]</sup>**

Γενικά η μεταφορά θερμότητας εξαρτάται από την επιφάνεια συναλλαγής, το είδος μεταφοράς (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία), την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο μέσων και τον αντίστοιχο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Όταν λοιπόν προσπαθούμε να βελτιώσουμε την μεταφορά θερμότητας είναι εύλογο να επιχειρούμε να αυξήσουμε την επιφάνεια συναλλαγής.

Για τα συστήματα που συζητήθηκαν παραπάνω αυτό μπορεί να γίνει προσθέτοντας πτερύγια στην εξωτερική επιφάνεια. Ωστόσο είναι πιο αποτελεσματική η χρήση τέτοιων επιφανειών στο εσωτερικό. Οι «αποθήκες θερμότητας» που μεταφέρουν την θερμότητα σε επιφάνειες στο εσωτερικό τους χρησιμοποιούν κάποιο ρευστό για να μεταφέρει την θερμότητα μέσα και έξω από αυτές. Τέτοια συστήματα μπορούν να μεταφέρουν την θερμότητα πιο γρήγορα στην θέση που την χρειαζόμαστε.

Σε αντίθεση με τα συστήματα αποθήκευσης με μεταφορά θερμότητας στην (εξωτερική) επιφάνεια η πρόσδοση θερμότητας ή ψύχους στην μεριά της ζήτησης γίνεται συνήθως στο προσκήνιο της εφαρμογής. Αυτό σημαίνει:

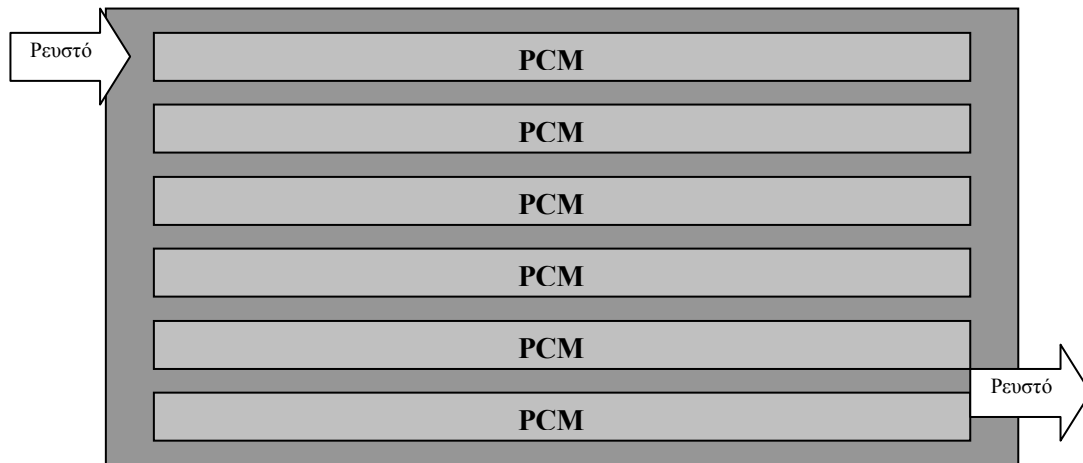
- Η θερμότητα αποθηκεύεται για κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα μέχρι την απελευθέρωση της
- Ο χρόνος αποθήκευσης και η Ισχύ εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή ξεχωριστά

Υπάρχουν αρκετές επιλογές για την κατασκευή συστημάτων αποθήκευσης με εσωτερικές επιφάνειες συναλλαγής

#### **Παραδείγματα**

##### *Εναλλάκτης*

Ο ποιο διαδεδομένος τρόπος σχεδιασμού συστήματος αποθήκευσης με εσωτερικές επιφάνειες συναλλαγής είναι τύπου εναλλάκτη. Ο σχεδιασμός προέρχεται από τις κατασκευαστικές αρχές οποιοδήποτε είδους εναλλάκτη μεταφοράς θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών. Για την κατασκευή ενός μέσου αποθήκευσης στο ένα μέρος του εναλλάκτη το ρευστό αντικαθίσταται από ένα υλικό αλλαγής φάσης.



Σχήμα 39: Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας τύπου εναλλάκτη

Παραπάνω (Σχ.39) βλέπουμε το σχεδιάγραμμα ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας τύπου εναλλάκτη, αποτελείται από δοχεία(σωλήνες) που περιέχουν το μέσο αποθήκευσης και έναν εσωτερικό εναλλάκτη. Το ρευστό που μεταφέρει την θερμότητα ,π.χ νερό , ρέει διαμέσου του εναλλάκτη και συναλλάσει θερμότητα με το μέσο αποθήκευσης (εδώ PCM) .

Αυτού του είδους τα συστήματα έχουν συνήθως:

- Υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας (έως και 95% κατόγκο PCM)
- Υψηλή ισχύ στην αρχή της αποφόρτισης διότι τα κανάλια του εναλλάκτη είναι γεμάτα με ρευστό (το οποίο έχει αποθηκεύσει και αυτό αισθητή θερμότητα) το οποίο απελευθερώνεται στην αρχή αποδίδοντας την ισχύ του.
- Υψηλή-Μέτρια ισχύ αργότερα (εξαρτάται πολύ από τον σωστό σχεδιασμό του εναλλάκτη)

Όσον αφορά την υψηλή πυκνότητα αποθηκευμένης θερμότητας οφείλεται στην μεγάλη ποσότητα του υλικού αλλαγής φάσης. Ωστόσο όσον αφορά την ισχύ ενός συστήματος αποθήκευσης τέτοιου τύπου, αυτή είναι ανάλογη της αποθηκευτικής ικανότητας , της παροχής όγκου και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου του ρευστού μεταφοράς.

$$P = \frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = C_p \cdot \frac{dV}{dt} \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (106)$$

Υποθέτοντας ότι η παροχή όγκου και το  $C_p$  είναι σταθερά η ισχύ είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου. Το ολοκλήρωμα της ισχύος ως προς τον χρόνο δίνει την θερμότητα που αποδίδεται, και σαν αποτέλεσμα την ενέργεια που είχε αποθηκευτεί (αν θεωρήσουμε ότι οι απώλειες θερμότητας είναι πάρα πολύ μικρές).



Κατά την αποφόρτιση του συστήματος είναι καλύτερο να γίνει χρήση της ιδανικής περίπτωσης όπου όλη η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας που αποτελείται από το υλικό αποθήκευσης και το ρευστό έχει προθερμανθεί αρχικά σε μία σταθερή θερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία αλλαγής φάσης.

Όταν αρχίζει η αποφόρτιση, ψυχρό ρευστό έρχεται στην είσοδο και ζεστό ρευστό που είχε προθερμανθεί εξέρχεται. Το προθερμασμένο ρευστό δημιουργεί ένα μέγιστο στην θερμοκρασία εξόδου στην αρχή η οποία είναι ίση με την θερμοκρασία προθέρμανσης.

Αφού όλο το προθερμασμένο ρευστό έχει εξέλθει, εξέρχεται και το μη προθερμασμένο ρευστό το οποίο έχει θερμανθεί μόνο από την αποθηκευμένη θερμότητα. Το αποτέλεσμα είναι ότι τώρα η θερμοκρασία εξόδου πέφτει αρκετά γρήγορα.

Μόλις αποσπαστεί η αισθητή θερμότητα που έχει αποθηκευτεί σε θερμοκρασία πάνω από την αλλαγή φάσης η θερμοκρασία εξόδου πέφτει κάτω από την θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Η θερμοκρασία στην έξοδο μειώνεται με πιο αργό ρυθμό, ο οποίος εξαρτάται από τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μέσα στην δεξαμενή αποθήκευσης.

Υπάρχουν δύο βασικές θερμικές αντιστάσεις: η θερμική αντίσταση στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας και στο τοίχωμα του εναλλάκτη, η οποία είναι σταθερή και η θερμική αντίσταση στο PCM, η οποία αυξάνεται με τον χρόνο.

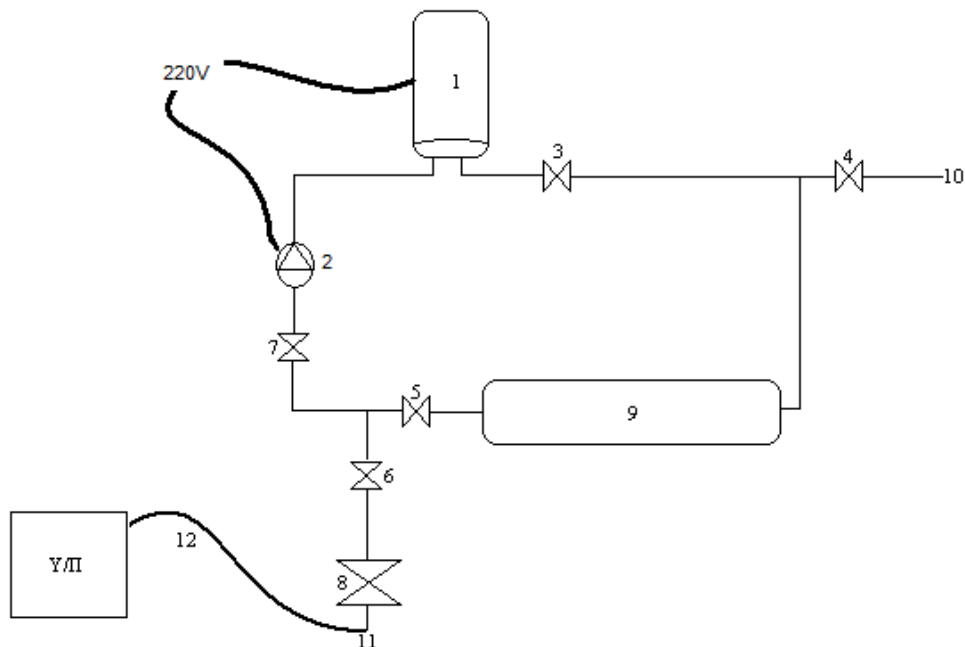
Ακόμη είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η θερμοκρασία του ρευστού δεν παραμένει σταθερή αλλά αυξάνεται από την είσοδο στην έξοδο εξαιτίας της αποθηκευμένης θερμότητας. Για αυτό τον λόγο η ισχύς και η θερμοκρασία στην έξοδο εξαρτώνται άμεσα από τον σχεδιασμό του εκάστοτε εναλλάκτη. Αν ο σχεδιασμός είναι τέτοιος ώστε η θερμική αντίσταση στο PCM που αυξάνεται με τον χρόνο να είναι μικρή, η σταθερή θερμική αντίσταση στο ρευστό-τοίχωμα του εναλλάκτη

## 9 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο μέρος αυτό θα γίνει παρουσίαση της πειραματικής διάταξης καθώς και της κατασκευής. Επιπλέον θα δοθούν αναλυτικά οι μετρήσεις και τα διαγράμματα που προκύπτουν από αυτές, θα γίνει σύγκριση της συμπεριφοράς των δοχείων με PCM με αυτής των δοχείων με νερό ,ενώ τέλος θα προσπαθήσουμε να βρούμε μία σχέση ομοιότητας μεταξύ των δοχείων, η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της συνάρτησης της θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο αποφόρτισης για δοχεία μεγαλύτερων διαστάσεων.

### 9.1 Πειραματική διάταξη

Σχήμα 40: Διάγραμμα Πειραματικής διάταξης



- 1 : Ηλεκτρικός Θερμοσίφωνας
- 2 : Κυκλοφορητής
- 3,4,5,6,7 : Βάνες on/off
- 8 : Βελονοειδής βάνα
- 9 : Δοχείο PCM
- 10 : Είσοδος (νερό δικτύου)
- 11 : Έξοδος (Μέτρηση θερμοκρασίας)
- 12 : Θερμοστοιχείο Τύπου T



Σχήμα 41: Πειραματική διάταξη στο εργαστήριο κλιματισμού του Ε.Μ.Π.

### 9.1.1 Κυκλοφορητής

Οι κυκλοφορητές χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο σωληνώσεων. Έχουν εφαρμογή στα καλοριφέρ και στην κυκλοφορία του ζεστού νερού τουαλέτας και τοποθετούνται στο σωλήνα προσαγωγής ή στο σωλήνα επιστροφής ενός δικτύου κεντρικής θερμάνσεως, και συνήθως κοντά στο λέβητα.

Ένας κυκλοφορητής είναι στην ουσία μία αντλία που έχει σαν σκοπό έχει μόνο την εξασφάλιση της ανακυκλοφορίας του υγρού (στην προκειμένη περίπτωση νερό) για αυτό και ονομάζεται αντλία ανακυκλοφορίας ή απλά κυκλοφορητής.

Στοιχεία του κυκλοφορητή (Κυκλοφορητής υγρού ρότωρα με βιδωτή σύνδεση) της πειραματικής διάταξης:

- Τάση λειτουργίας : 1-230 Volt
- Συχνότητα περιστροφής πτερωτής : 50Hz
- Ισχύ : 22 Watt
- Μέγιστη ένταση ρεύματος λειτουργίας : 0,25 A
- Μέγιστη θερμοκρασία κυκλοφορούμενου νερού : 95°C
- Μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την λειτουργία : 40 °C
- Μέγιστη πίεση λειτουργίας : 10bar
- Μοντέλο : WILO Star-Z-15

Σχήμα 42



Σχήμα 43



Σχήμα 42,43:Κυκλοφορητής της πειραματικής διάταξης ,Στοιχεία του κυκλοφορητή όπως φαίνονται πάνω σε αυτόν

### 9.1.2 Βελονοειδής βάνα 1/4''

Μία βελονοειδής βάνα αποτελείτε από ένα σχετικά μικρό στόμιο το οποίο έχει κωνικό σχήμα. Στο εσωτερικό υπάρχει βίδα που στο τέλος της βρίσκεται ένα έμβολο σε σχήμα βελόνας το οποίο ταιριάζει απόλυτα στην βάση της βάνας .

#### Λειτουργία:

Καθώς γυρνάμε την βίδα μέσω ενός εξωτερικού μοχλού το μικρό έμβολο ανυψώνεται και είναι δυνατή η ροή διαμέσου της βάνας. Παρολαυτά μέχρι το έμβολο να ανυψωθεί πλήρως η ροή εμποδίζεται σε σημαντικό βαθμό . Δεδομένου ότι χρειάζονται πολλές στροφές του εξωτερικού μοχλού για να ανυψωθεί πλήρως το έμβολο ή ρύθμιση της παροχής σε μία πολύ μικρή τιμή είναι πολύ εύκολη.

### 9.1.3 Ηλεκτρικός Θερμοσίφωνας

Ο θερμοσίφωνας είναι μια κλειστή συσκευή μέσα στην οποία κυκλοφορεί ένα υγρό με την επίδραση θερμάνσεων και αποψύξεων. Συνήθως η συσκευή αυτή είναι τοποθετημένη στα σπίτια και χρησιμοποιείται για να θερμαίνει το νερό.

Αποτελείται από κυλινδρικό δοχείο, του οποίου η χωρητικότητα ποικίλει, τα τοιχώματα είναι διπλά και θερμομονωμένα. Στο κέντρο του δοχείου υπάρχει θερμαντικό στοιχείο που θερμαίνεται με ηλεκτρική ενέργεια. Η συσκευή συνδέεται με το δίκτυο παροχής νερού και κάθε ποσότητα ζεστού νερού που αφαιρείται από το δοχείο του αναπληρώνεται αυτόματα με αντίστοιχη ποσότητα ψυχρού νερού. Υπάρχουν ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες κατακόρυφοι και οριζόντιοι, ταχείας και αργής θέρμανσης, καθώς και θερμοσίφωνες θέρμανσης του νερού τη στιγμή της ροής του (ταχυθερμοσίφωνες). Υπάρχουν επίσης και θερμοσίφωνες αερίου που λειτουργούν με την καύση φωταερίου ή άλλων υγρών.

Στοιχεία του θερμοσίφωνα της πειραματικής διάταξης :

- Χωρητικότητα : 5 λίτρα
- Ισχύ : 1500 Watt
- Τρόπος τοποθέτησης : Κάθετος
- $\Delta T$  Θερμοστάτη : 25°C



Σχήμα 44: Θερμοσίφωνα πειραματικής διάταξης

#### 9.1.4 Θερμοστοιχείο Τύπου T (Θερμοζεύγος)

Τα θερμοστοιχεία είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο είδος αισθητήρα για την μέτρηση και τον έλεγχο της θερμοκρασίας ενώ επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα θερμοζεύγος είναι η ένωση δύο διαφορετικών μετάλλων στα οποία παράγεται τάση λόγω διαφοράς θερμοκρασίας, μετρώντας λοιπόν την τάση κάθε φορά μπορούμε να βρούμε και την αντίστοιχη θερμοκρασία.

Τα θερμοστοιχεία είναι φθηνά , μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα και έχουν την δυνατότητα να μετρήσουν ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Τα θερμοζεύγιοι Τύπου T (60%Νικέλιο 40% Χαλκός) είναι κατάλληλα για μετρήσεις στην περιοχή  $-200^{\circ}\text{C}$  με  $350^{\circ}\text{C}$ . Δεδομένου ότι οι δύο αγωγοί είναι μη μαγνητικά υλικά, δεν υπάρχει σημείο Curie και ως εκ τούτου δεν γίνεται απότομη αλλαγή στα χαρακτηριστικά τους. Τα θερμοστοιχεία τύπου T έχουν ευαισθησία περίπου  $43 \mu\text{V} / ^{\circ}\text{C}$ .

## **9.2 Δοχεία PCM**

Τα δοχεία αποτελούνται από ένα κυλινδρικό ορειχάλκινο σωλήνα διαμέτρου  $\Phi_{\xi}=80\text{mm}$  ,  $\Phi_{\sigma}=78\text{mm}$  και ύψους  $H_1=150\text{mm}$   $H_2=300\text{mm}$   $H_3=450\text{mm}$  οι οποίοι είναι σφραγισμένοι (με συγκόλληση) πάνω και κάτω με ροζέτες ( $\Phi=82\text{mm}$ ) στις οποίες έχει διανοιχτεί τρύπα για την τοποθέτηση σπειρώματος 1/2''

Όταν γίνονται μετρήσεις με PCM , τοποθετούνται μέσα στα δοχεία είκοσι ορειχάλκινα σωληνάκια διαμέτρου  $\Phi_{\xi}=10\text{mm}$ ,  $\Phi_{\sigma}=8\text{mm}$  και ύψους  $H_1=145\text{mm}$   $H_2=295\text{mm}$   $H_3=445\text{mm}$  τα οποία είναι γεμισμένα με παραφίνη και σφραγίζονται πάνω και κάτω με τάπες ( $\Phi=12\text{mm}$  και πάχος τοιχώματος 2mm)

Όταν γίνονται μετρήσεις χωρίς PCM τα σωληνάκια αφαιρούνται.

Οι σύνδεση της πειραματικής διάταξης γίνεται με 8 σωληνάκια "flexible" 1/2''

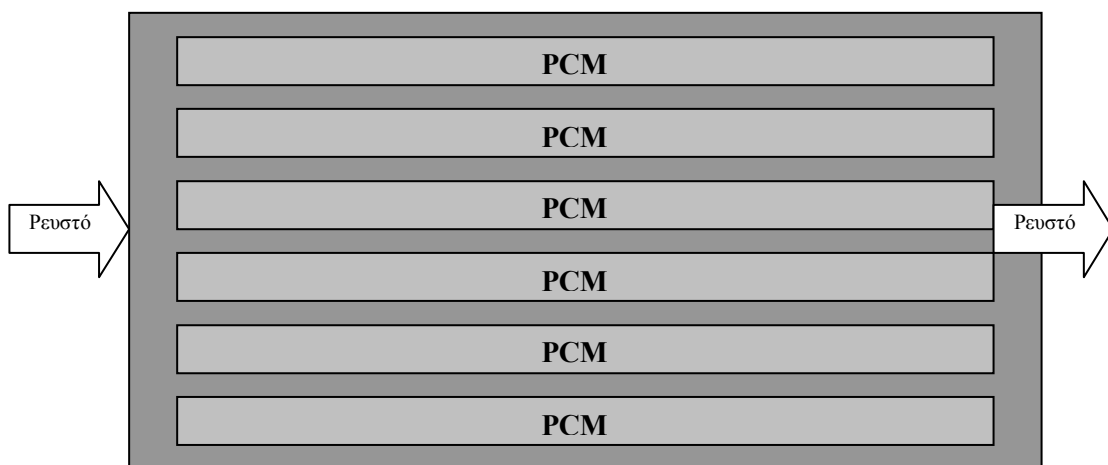
Παρακάτω δίνονται τα βήματα που γίνονται κατά την διάρκεια της μέτρησης

### **Φόρτιση**

1. Βάνες 3,7,6,8 πλήρως ανοιχτές βάνα 5,4 κλειστή
2. Βάνα 4 ανοιχτή
3. Γέμισμα θερμοσίφωνα με κρύο νερό από το δίκτυο και αφαίρεση αέρα μέσα από την κλειστή διάταξη (θερμοσίφωνα , κυκλοφορητή )
4. Βάνες 3,7,4 κλειστές , βάνες 5,6,8 πλήρως ανοιχτές
5. Βάνα 4 ανοιχτή
6. Γέμισμα του δοχείου με νερό από το δίκτυο και αφαίρεση του αέρα μέσα από την κλειστή διάταξη (Κλάδος δοχείου)
7. Μέτρηση θερμοκρασίας νερού δικτύου στην έξοδο
8. Βάνες 6,4,8 κλειστές , βάνες 3,7,5 πλήρως ανοιχτές
9. Θέτουμε σε λειτουργία τον κυκλοφορητή και τον θερμοσίφωνα
10. Περιμένουμε να φτάσει η θερμοκρασία στους 80 °C και αφήνουμε σε λειτουργία τον κυκλοφορητή και τον θερμοσίφωνα μέχρι να υγροποιηθεί η παραφίνη , ή μέχρι να φορτιστή το δοχείο (αν δεν έχουμε παραφίνη)

### **Αποφόρτιση**

1. Διακοπή λειτουργίας του κυκλοφορητή και του θερμοσίφωνα
2. Βάνες 3,7 κλειστές , βάνες 5,6 πλήρως ανοιχτές
3. Βάνα 4 ανοιχτή
4. Ρύθμιση βελονοειδούς βάνας 8
5. Μέτρηση παροχής νερού στην έξοδο
6. Μέτρηση θερμοκρασίας νερού στην έξοδο



**Σχήμα 45: Σχηματική απεικόνιση δοχείου κατασκευής**



**Σχήμα 46: Σωληνάκια που βρίσκονται εντός των δοχείων**

### 9.3 Πίνακες εύρεσης διαγραμμάτων και μετρήσεων

Ακολουθούν πίνακες εύρεσης των διαφόρων μετρήσεων και των διαγραμμάτων τους

<b>Πίνακας 11 : Διαγράμματα Μετρήσεων Δοχείο 1<sup>ο</sup> Με PCM</b>			
Μέτρηση	Παροχή (ml/5min)	Στοιχεία Μέτρησης	Διάγραμμα T-t
1 <sup>η</sup>	362.5	Σελ 129	Σελ 143
2 <sup>η</sup>	350	Σελ 129	Σελ 144
3 <sup>η</sup>	103,47	Σελ 129	Σελ 145
4 <sup>η</sup>	257	Σελ 130	Σελ 146
5 <sup>η</sup>	265,83	Σελ 130	Σελ 147
6 <sup>η</sup>	86	Σελ 130	Σελ 148
7 <sup>η</sup>	410	Σελ 131	Σελ 149
8 <sup>η</sup>	342,5	Σελ 131	Σελ 150
9 <sup>η</sup>	126	Σελ 131	Σελ 151

<b>Πίνακας 12 : Διαγράμματα Μετρήσεων Δοχείο 1<sup>ο</sup> Χωρίς PCM</b>			
Μέτρηση	Παροχή (ml/5min)	Στοιχεία Μέτρησης	Διάγραμμα T-t
1 <sup>η</sup>	150	Σελ 132	Σελ 152
2 <sup>η</sup>	161.25	Σελ 132	Σελ 153
3 <sup>η</sup>	315	Σελ 133	Σελ 154
4 <sup>η</sup>	82.14	Σελ 133	Σελ 155
5 <sup>η</sup>	93.75	Σελ 133	Σελ 156
6 <sup>η</sup>	508.33	Σελ 134	Σελ 157
7 <sup>η</sup>	328.75	Σελ 134	Σελ 158
8 <sup>η</sup>	244	Σελ 134	Σελ 159
9 <sup>η</sup>	308.33	Σελ 135	Σελ 160

<b>Πίνακας 13 : Διαγράμματα Μετρήσεων Δοχείο 2<sup>ο</sup> Με PCM</b>			
Μέτρηση	Παροχή (ml/5min)	Στοιχεία Μέτρησης	Διάγραμμα T-t
1 <sup>η</sup>	972.5	Σελ 135	Σελ 161
2 <sup>η</sup>	408	Σελ 135	Σελ 162
3 <sup>η</sup>	153.33	Σελ 135	Σελ 163
4 <sup>η</sup>	367	Σελ 136	Σελ 164
5 <sup>η</sup>	335	Σελ 136	Σελ 165
6 <sup>η</sup>	169	Σελ 136	Σελ 166
7 <sup>η</sup>	220	Σελ 137	Σελ 167
8 <sup>η</sup>	578.33	Σελ 137	Σελ 168
9 <sup>η</sup>	767.5	Σελ 137	Σελ 169



<b>Πίνακας 14 : Διαγράμματα Μετρήσεων Δοχείο 2<sup>ο</sup> Χωρίς PCM</b>			
Μέτρηση	Παροχή (ml/5min)	Στοιχεία Μέτρησης	Διάγραμμα T-t
1 <sup>η</sup>	369	Σελ 138	Σελ 170
2 <sup>η</sup>	274.16	Σελ 138	Σελ 171
3 <sup>η</sup>	329	Σελ 138	Σελ 172
4 <sup>η</sup>	438	Σελ 138	Σελ 173
5 <sup>η</sup>	492	Σελ 139	Σελ 174
6 <sup>η</sup>	224.16	Σελ 139	Σελ 175
7 <sup>η</sup>	136.5	Σελ 139	Σελ 176
8 <sup>η</sup>	277	Σελ 139	Σελ 177
9 <sup>η</sup>	325	Σελ 140	Σελ 178

<b>Πίνακας 15 : Διαγράμματα Μετρήσεων Δοχείο 3<sup>ο</sup> Με PCM</b>			
Μέτρηση	Παροχή (ml/5min)	Στοιχεία Μέτρησης	Διάγραμμα T-t
1 <sup>η</sup>	972.92	Σελ 140	Σελ 179
2 <sup>η</sup>	1020.83	Σελ 140	Σελ 180
3 <sup>η</sup>	829.17	Σελ 140	Σελ 181
4 <sup>η</sup>	535.42	Σελ 141	Σελ 182
5 <sup>η</sup>	455.9	Σελ 141	Σελ 183
6 <sup>η</sup>	814.58	Σελ 141	Σελ 184
7 <sup>η</sup>	448.33	Σελ 141	Σελ 185
8 <sup>η</sup>	485.42	Σελ 142	Σελ 186
9 <sup>η</sup>	450	Σελ 142	Σελ 187

## 9.4 Αποτελέσματα μετρήσεων

### Δοχείο 1<sup>ο</sup> Μέτρηση με Παραφίνη

<b>Μέτρηση 1η</b>					
Παροχή=362,5 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	78,57	360	59,36	720	45,37
120	75,99	480	52,68	840	43,09
240	66,32	600	49,16	960	41,1

<b>Μέτρηση 2η</b>					
Παροχή=350 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	79,2	960	40,45	1920	29,03
120	76,98	1080	38,05	2040	28,36
240	68,54	1200	36,18	2160	27,8
360	59,83	1320	34,43	2280	27,33
480	53,92	1440	32,99	2400	26,98
600	49,33	1560	31,72	2520	26,63
720	45,73	1680	30,69		
840	42,81	1800	29,77		

<b>Μέτρηση 3<sup>η</sup></b>					
Παροχή=103,47 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	70,11	2280	46,38	4560	33,94
120	70,8	2400	45,51	4680	33,56
240	70,24	2520	44,69	4800	33,16
360	69,16	2640	43,82	4920	32,82
480	67,49	2760	42,87	5040	32,47
600	65,51	2880	42,05	5160	32,13
720	63,3	3000	41,43	5280	31,81
840	61,22	3120	40,67	5400	31,47
960	59,17	3240	39,83	5520	31,21
1080	57,38	3360	39,28	5640	30,89
1200	55,64	3480	38,62	5760	30,6
1320	54,12	3600	38,02	5880	30,37
1440	52,93	3720	37,3	6000	30,14
1560	51,82	3840	36,87	6120	29,74
1680	50,75	3960	36,35	6240	29,77
1800	49,69	4080	35,69	6360	29,62
1920	48,93	4200	35,32	6480	29,47
2040	48,12	4320	34,86	6600	29,35
2160	47,22	4440	34,4	6720	29,24

<b>Μέτρηση 4<sup>η</sup></b>					
Παροχή=257 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	82,15	840	46,66	1680	35,2
120	77,51	960	44,41	1800	34,08
240	70,03	1080	42,42	1920	33,05
360	62,41	1200	40,84	2040	32,13
480	56,82	1320	39,14	2160	31,32
600	52,62	1440	37,84	2280	30,55
720	49,38	1560	36,47	2400	29,91

<b>Μέτρηση 5<sup>η</sup></b>					
Παροχή=265,83 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	78,14	840	44,72	1680	34,05
120	72,55	960	42,78	1800	33,05
240	64,65	1080	41,04	1920	32,16
360	58,59	1200	39,43	2040	31,41
480	53,51	1320	37,82	2160	30,66
600	50,17	1440	36,35	2280	30,03
720	47,16	1560	35,17		

<b>Μέτρηση 6<sup>η</sup></b>					
Παροχή 86 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	78,41	1920	50,03	3840	38,88
120	77,48	2040	49,21	3960	38,3
240	75,94	2160	48,34	4080	37,76
360	73,98	2280	47,67	4200	37,24
480	71,56	2400	46,91	4320	36,81
600	69	2520	46,18	4440	36,21
720	66,35	2640	45,53	4560	35,95
840	63,89	2760	44,8	4680	35,52
960	61,57	2880	44,1	4800	35,11
1080	59,48	3000	43,4	4920	34,54
1200	57,54	3120	42,72	5040	34,37
1320	55,8	3240	41,99	5160	33,99
1440	54,2	3360	41,32	5280	33,36
1560	53,01	3480	40,62	5400	32,39
1680	51,88	3600	39,89	5520	31,18
1800	50,91	3720	39,25		

<b>Μέτρηση 7<sup>η</sup></b>					
Παροχή=410 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	76,66	600	43,96	1200	33,07
120	70,45	720	41,12	1320	31,75
240	60,59	840	38,62	1440	30,63
360	52,98	960	36,55	1560	29,65
480	47,89	1080	34,57	1680	28,91

<b>Μέτρηση 8<sup>η</sup></b>					
Παροχή=342,5 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	80,45	840	40,79	1680	31,55
120	71,75	960	39,11	1800	30,78
240	61,59	1080	37,3	1920	29,94
360	54,17	1200	36,03	2040	29,3
480	49,44	1320	34,66	2160	28,89
600	45,81	1440	33,51	2280	28,42
720	43,23	1560	32,5	2400	28,06

<b>Μέτρηση 9<sup>η</sup></b>					
Παροχή=126 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	75,84	2400	43,54	4800	31,81
120	74,64	2520	42,5	4920	31,44
240	73,34	2640	41,77	5040	31,09
360	71,75	2760	40,96	5160	30,78
480	69,51	2880	40,06	5280	30,49
600	66,86	3000	39,45	5400	30,17
720	63,97	3120	38,74	5520	29,85
840	61,41	3240	38,1	5640	29,59
960	58,9	3360	37,47	5760	29,35
1080	56,69	3480	36,9	5880	29,15
1200	54,86	3600	36,32	6000	28,94
1320	53,29	3720	35,8	6120	28,77
1440	51,85	3840	35,26	6240	28,5
1560	50,64	3960	34,63	6360	28,33
1680	49,49	4080	34,11	6480	28,12
1800	48,4	4200	33,82	6600	28,01
1920	47,33	4320	33,36	6720	27,83
2040	46,35	4440	32,99	6840	27,68
2160	45,37	4560	32,56	6960	27,6
2280	44,47	4680	32,18	7080	27,48

### Δοχείο 1<sup>ο</sup> Μέτρηση μόνο με νερό

<b>Μέτρηση 1<sup>η</sup></b>			Παροχή=150 ml/5min		
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	80,73	3120	36,78	6240	29,12
120	79,44	3240	36,21	6360	28,97
240	76,34	3360	35,55	6480	28,83
360	72,15	3480	35,06	6600	28,56
480	67,92	3600	34,77	6720	28,56
600	63,97	3720	34,37	6840	28,42
720	60,81	3840	33,97	6960	28,33
840	57,98	3960	33,56	7080	28,18
960	55,72	4080	33,22	7200	28,06
1080	53,54	4200	32,87	7320	27,95
1200	51,93	4320	32,56	7440	27,21
1320	50,17	4440	32,24	7560	27,16
1440	48,9	4560	31,93	7680	27,1
1560	47,36	4680	31,7	7800	27,04
1680	46,35	4800	31,44	7920	26,92
1800	45,17	4920	31,15	8040	26,89
1920	44,19	5040	30,95	8160	26,8
2040	43,2	5160	30,72	8280	26,36
2160	42,3	5280	30,52	8400	26,28
2280	41,46	5400	30,32	8520	26,25
2400	40,7	5520	30,17	8640	26,19
2520	39,91	5640	29,94	8760	26,16
2640	39,25	5760	29,62	8880	26,1
2760	38,56	5880	29,44	9000	26,01
2880	37,79	6000	29,41		
3000	37,33	6120	29,3		

<b>Μέτρηση 2<sup>η</sup></b>			Παροχή=161,25 ml/5min		
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	79,44	2400	40,93	4800	30,52
120	78,59	2520	40,11	4920	30,26
240	76,76	2640	39,28	5040	29,97
360	74,06	2760	38,53	5160	29,74
480	70,82	2880	37,82	5280	29,47
600	67,59	3000	37,16	5400	29,06
720	64,65	3120	36,52	5520	29,03
840	62	3240	35,92	5640	28,83
960	59,23	3360	35,32	5760	28,56
1080	56,88	3480	34,66	5880	28,39
1200	54,53	3600	34,31	6000	28,21
1320	52,62	3720	33,82	6120	27,86
1440	50,75	3840	33,36	6240	27,8
1560	49,02	3960	32,79	6360	27,68
1680	47,64	4080	32,36	6480	27,48
1800	46,32	4200	32,18	6600	27,33

1920	45,03	4320	31,81	6720	27,16
2040	43,96	4440	31,47	6840	26,86
<b>Χρόνος</b>	<b>Θερμοκρασία</b>	<b>Χρόνος</b>	<b>Θερμοκρασία</b>		
<b>(sec)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(°C)</b>		
2160	42,81	4560	31,12		
2280	41,71	4680	30,8		

		<b>Μέτρηση 3<sup>η</sup></b>		Παροχή=315 ml/5min	
<b>Χρόνος</b>	<b>Θερμοκρασία</b>	<b>Χρόνος</b>	<b>Θερμοκρασία</b>	<b>Χρόνος</b>	<b>Θερμοκρασία</b>
<b>(sec)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(°C)</b>
0	80,55	1080	40,37	2160	29,03
120	78,25	1200	38,3	2280	28,36
240	72,15	1320	36,58	2400	27,8
360	65,3	1440	35	2520	27,27
480	58,65	1560	33,65	2640	26,77
600	53,12	1680	32,47	2760	26,33
720	48,71	1800	31,49	2880	26,04
840	45,31	1920	30,6		
960	42,61	2040	29,79		

		<b>Μέτρηση 4<sup>η</sup></b>		Παροχή=82,14 ml/5min	
<b>Χρόνος</b>	<b>Θερμοκρασία</b>	<b>Χρόνος</b>	<b>Θερμοκρασία</b>	<b>Χρόνος</b>	<b>Θερμοκρασία</b>
<b>(sec)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(°C)</b>
0	77,45	840	64,81	1680	49,55
120	76,45	960	62,54	1800	47,78
240	75,01	1080	60,3	1920	46,07
360	73,45	1200	57,85	2040	44,41
480	71,64	1320	55,77	2160	42,78
600	69,27	1440	53,65		
720	67,27	1560	51,6		

		<b>Μέτρηση 5<sup>η</sup></b>		Παροχή=93,75 ml/5min	
<b>Χρόνος</b>	<b>Θερμοκρασία</b>	<b>Χρόνος</b>	<b>Θερμοκρασία</b>	<b>Χρόνος</b>	<b>Θερμοκρασία</b>
<b>(sec)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(sec)</b>	<b>(°C)</b>
0	77,11	2520	43,31	5040	30,23
120	76,79	2640	42,25	5160	29,88
240	75,36	2760	41,29	5280	29,56
360	73,61	2880	40,37	5400	29,27
480	71,67	3000	39,51	5520	28,97
600	69,68	3120	38,65	5640	28,74
720	67,51	3240	37,9	5760	28,5
840	65,43	3360	37,13	5880	28,24
960	63,27	3480	36,41	6000	28,04
1080	61,35	3600	35,8	6120	27,83
1200	59,36	3720	35,17	6240	27,6
1320	57,51	3840	34,54	6360	27,42
1440	55,72	3960	33,99	6480	27,21
1560	54,01	4080	33,48	6600	27,04

1680	52,4	4200	32,99	6720	26,86
1800	50,91	4320	32,56	6840	26,69
1920	49,44	4440	32,1	6960	26,54
2040	48,09	4560	31,7	7080	26,39
2160	46,8	4680	31,29	7200	26,25
2280	45,56	4800	30,89		
2400	44,38	4920	30,55		

<b><u>Μέτρηση 6<sup>η</sup></u></b>		Παροχή=508,33 ml/5min			
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	79,6	480	42,95	960	31,09
120	75,12	600	38,39	1080	29,74
240	60,27	720	35,09		
360	50,06	840	32,84		

<b><u>Μέτρηση 7<sup>η</sup></u></b>		Παροχή=328,75 ml/5min			
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	77,75	1440	31,67	2880	26,04
120	72,07	1560	30,8	3000	25,84
240	63,97	1680	30,06	3120	25,63
360	56,27	1800	29,38	3240	25,45
480	50,39	1920	28,83	3360	25,28
600	45,79	2040	28,33	3480	25,16
720	42,33	2160	27,86	3600	25,01
840	39,51	2280	27,48	3720	24,87
960	37,24	2400	27,16	3840	24,72
1080	35,34	2520	26,8	3960	24,63
1200	33,91	2640	26,57	4080	24,52
1320	32,67	2760	26,28	4200	24,4

<b><u>Μέτρηση 8<sup>η</sup></u></b>		Παροχή=244 ml/5min			
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	80,24	840	42,22	1680	32,59
120	74,64	960	40,14	1800	31,72
240	66,41	1080	38,28	1920	31,01
360	58,7	1200	36,75	2040	30,29
480	52,9	1320	35,46	2160	29,77
600	48,17	1440	34,43	2280	29,21
720	44,89	1560	33,45		

<b>Μέτρηση 9<sup>η</sup></b>					
Παροχή=308,33 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	77,11	600	47,05	1200	35,03
120	74,46	720	43,79	1320	33,45
240	67,03	840	41,18	1440	32,3
360	57,96	960	39,02	1560	31,24
480	51,69	1080	36,72	1680	30,43

### Δοχείο 2<sup>ο</sup> Μέτρηση με παραφίνη

<b>Μέτρηση 1<sup>η</sup></b>					
Παροχή=972,5 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	71,19	360	41,99	720	32,9
120	54,78	480	38,59	840	30,57
240	46,97	600	35,66	960	28,8

<b>Μέτρηση 2<sup>η</sup></b>					
Παροχή=408 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	74,85	840	44,94	1680	34,8
120	72,79	960	43,15	1800	33,74
240	64,51	1080	41,43	1920	32,87
360	57,49	1200	39,97	2040	32,1
480	52,85	1320	38,59	2160	31,38
600	49,49	1440	37,3	2280	30,75
720	47,05	1560	35,98	2400	30,09

<b>Μέτρηση 3<sup>η</sup></b>					
Παροχή=153,33 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	78,51	2280	47,33	4560	35,66
120	77,72	2400	46,63	4680	35,29
240	75,94	2520	45,93	4800	34,8
360	73,42	2640	45,22	4920	34,45
480	70,66	2760	44,52	5040	33,99
600	67,49	2880	43,79	5160	33,68
720	64,59	3000	43,09	5280	33,22
840	61,89	3120	42,44	5400	32,99
960	59,59	3240	41,77	5520	32,7
1080	57,4	3360	41,12	5640	32,24
1200	55,66	3480	40,48	5760	31,95
1320	54,14	3600	39,83	5880	31,64
1440	52,93	3720	39,25	6000	31,32
1560	51,85	3840	38,68	6120	31,03
1680	50,94	3960	38,1	6240	30,8
1800	50,14	4080	37,61	6360	30,49
1920	49,44	4200	37,13	6480	30,23



2040	48,71	4320	36,58	6600	30,03
2160	48,06	4440	36,15	6720	29,77

<b>Μέτρηση 4<sup>η</sup></b>					
Παροχή=367 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	76,47	1080	45,42	2160	34,02
120	77,03	1200	43,79	2280	33,13
240	71,7	1320	42,19	2400	32,3
360	65,03	1440	40,79	2520	31,55
480	59,39	1560	39,43	2640	30,86
600	55,19	1680	38,28	2760	30,23
720	52,02	1800	37,04	2880	29,71
840	49,38	1920	35,95		
960	47,33	2040	34,94		

<b>Μέτρηση 5<sup>η</sup></b>					
Παροχή=335 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	76,87	1080	45,7	2160	35,09
120	72,94	1200	44,19	2280	34,22
240	66,73	1320	42,78	2400	33,45
360	61,43	1440	41,46	2520	32,7
480	57,13	1560	40,25	2640	31,98
600	53,84	1680	39,08	2760	31,29
720	51,27	1800	38,02	2880	30,72
840	49,21	1920	36,98	3000	30,17
960	47,33	2040	36,01	3120	29,62

<b>Μέτρηση 6<sup>η</sup></b>					
Παροχή=169 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	75,54	2520	45,45	5040	36,15
120	74,75	2640	44,94	5160	35,8
240	72,97	2760	44,38	5280	35,52
360	70,56	2880	43,85	5400	35,17
480	67,65	3000	43,31	5520	34,83
600	64,76	3120	42,75	5640	34,51
720	61,95	3240	42,22	5760	34,2
840	59,5	3360	41,71	5880	33,88
960	57,29	3480	41,15	6000	33,53
1080	55,5	3600	40,67	6120	33,22
1200	54,03	3720	40,17	6240	32,9
1320	52,76	3840	39,66	6360	32,61
1440	51,63	3960	39,2	6480	32,3
1560	50,8	4080	38,68	6600	32,04
1680	49,92	4200	38,33	6720	31,72
1800	49,19	4320	37,96	6840	31,44
1920	48,43	4440	37,64	6960	31,12
2040	47,81	4560	37,39	7080	30,83

2160	47,16	4680	37,1	7200	30,52
2280	46,63	4800	36,72	7320	30,17
2400	46,01	4920	36,47	7440	29,85

<b>Μέτρηση 7<sup>η</sup></b>					
			Παροχή=220 ml/5min		
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	76,37	1920	45,53	3840	34,71
120	76,21	2040	44,58	3960	34,25
240	74,24	2160	43,68	4080	33,91
360	70,77	2280	42,78	4200	33,48
480	66,89	2400	41,97	4320	33,16
600	63,11	2520	41,12	4440	32,79
720	59,83	2640	40,39	4560	32,47
840	57,07	2760	39,66	4680	32,13
960	54,92	2880	38,97	4800	31,84
1080	53,09	3000	38,33	4920	31,49
1200	51,66	3120	37,73	5040	31,24
1320	50,44	3240	37,1	5160	30,95
1440	49,38	3360	36,58	5280	30,63
1560	48,29	3480	36,06	5400	30,34
1680	47,42	3600	35,6	5520	30,06
1800	46,46	3720	35,2	5640	29,82

<b>Μέτρηση 8<sup>η</sup></b>					
			Παροχή=578,33 ml/5min		
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	78,73	720	44,13	1440	33,79
120	71,83	840	41,97	1560	32,44
240	61,73	960	40,08	1680	31,24
360	54,75	1080	38,25	1800	30,09
480	50,25	1200	36,72	1920	29,06
600	46,77	1320	35,17		

<b>Μέτρηση 9<sup>η</sup></b>					
			Παροχή=767,5 ml/5min		
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	71,56	480	43,15	960	33,85
120	60,54	600	40,37	1080	32,13
240	52,07	720	37,9	1200	30,57
360	46,88	840	35,8	1320	29,24

## Δοχείο 2<sup>ο</sup> Μέτρηση μόνο με νερό

<b>Μέτρηση 1<sup>η</sup></b>					
Παροχή=369 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	75,6	600	53,9	1200	37,41
120	75,12	720	49,16	1320	35,55
240	71,01	840	45,28	1440	34,08
360	65,19	960	42,11		
480	59,01	1080	39,68		

<b>Μέτρηση 2<sup>η</sup></b>					
Παροχή=274,16 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	78,01	960	48,88	1920	35,43
120	75,99	1080	46,35	2040	34,43
240	71,99	1200	44,1	2160	33,48
360	67,38	1320	42,16	2280	32,64
480	62,59	1440	40,48	2400	31,84
600	58,4	1560	38,99	2520	31,15
720	54,75	1680	37,73	2640	30,49
840	51,74	1800	36,61	2760	29,85

<b>Μέτρηση 3<sup>η</sup></b>					
Παροχή=329 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	79,44	960	46,15	1920	34,17
120	78,91	1080	43,6	2040	33,39
240	74,91	1200	41,54	2160	32,61
360	68,49	1320	39,94	2280	32,04
480	62,08	1440	38,42	2400	31,47
600	56,63	1560	37,16	2520	30,92
720	52,35	1680	36,01	2640	30,32
840	49,27	1800	35,06	2760	29,82

<b>Μέτρηση 4<sup>η</sup></b>					
Παροχή=438 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	80,68	600	45,65	1200	34,54
120	73,05	720	42,44	1320	32,87
240	63,57	840	39,77	1440	31,52
360	55,97	960	37,79	1560	30,52
480	50,66	1080	36,03	1680	29,62

<b>Μέτρηση 5<sup>η</sup></b>					
Παροχή=492 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	77,61	480	46,8	960	34,34
120	71,3	600	42,3	1080	32,82
240	60,76	720	39,48	1200	31,29
360	52,79	840	36,78	1320	29,68

<b>Μέτρηση 6<sup>η</sup></b>					
Παροχή=224,16 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	74,64	1200	47,08	2400	34,6
120	73,63	1320	45,14	2520	33,79
240	70,82	1440	43,54	2640	33,07
360	67,46	1560	42,05	2760	32,39
480	64,08	1680	40,79	2880	31,7
600	60,41	1800	39,48	3000	31,06
720	57,1	1920	38,33	3120	30,55
840	54,14	2040	37,27	3240	30
960	51,6	2160	36,29	3360	29,5
1080	49,13	2280	35,37		

<b>Μέτρηση 7<sup>η</sup></b>					
Παροχή=136,5 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	75,2	1680	47,13	3360	35,49
120	74,67	1800	45,93	3480	34,91
240	73	1920	44,75	3600	34,37
360	70,74	2040	43,68	3720	33,76
480	68,24	2160	42,7	3840	33,19
600	65,38	2280	41,77	3960	32,59
720	62,62	2400	40,93	4080	32,07
840	60	2520	40,08	4200	31,55
960	57,68	2640	39,34	4320	31,06
1080	55,41	2760	38,62	4440	30,55
1200	53,4	2880	37,96	4560	30,11
1320	51,55	3000	37,33	4680	29,65
1440	49,97	3120	36,7		
1560	48,48	3240	36,03		

<b>Μέτρηση 8<sup>η</sup></b>					
Παροχή=277 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	78,22	960	46,29	1920	34,68
120	76,26	1080	44,21	2040	33,74
240	71,3	1200	42,47	2160	32,87
360	66,11	1320	40,96	2280	32,16
480	60,84	1440	39,43	2400	31,49

600	56,33	1560	38,13	2520	30,89
720	52,21	1680	36,87	2640	30,26
840	49,02	1800	35,78	2760	29,77

<b>Μέτρηση 9<sup>η</sup></b>					
Παροχή=325 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	77,27	840	44,61	1680	33,82
120	73,05	960	42,25	1800	32,9
240	67,16	1080	40,28	1920	32,16
360	60,95	1200	38,59	2040	31,41
480	55,97	1320	37,16	2160	30,8
600	51,57	1440	35,89	2280	30,23
720	47,78	1560	34,74	2400	29,77

### Δοχείο 3<sup>ο</sup> Μέτρηση με Παραφίνη

<b>Μέτρηση 1η</b>					
Παροχή=972,92 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	78,83	600	44,8	1200	34,63
120	68,92	720	42,33	1320	33,1
240	59,01	840	40,06	1440	31,72
360	52,51	960	38,13	1560	30,52
480	48,26	1080	36,29	1680	29,41

<b>Μέτρηση 2η</b>					
Παροχή=1020,83 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	75,44	720	42,11	1440	32,24
120	71,33	840	39,91	1560	31,24
240	59,86	960	37,93	1680	30,32
360	52,96	1080	36,26	1800	29,5
480	48,12	1200	34,74		
600	44,8	1320	33,48		

<b>Μέτρηση 3η</b>					
Παροχή=829,17 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	75,92	840	42,08	1680	32,9
120	66,43	960	40,31	1800	32,1
240	58,45	1080	38,68	1920	31,41
360	53,07	1200	37,24	2040	30,75
480	49,47	1320	35,86	2160	30,11
600	46,46	1440	34,77	2280	29,59
720	44,16	1560	33,76		

<b><u>Μέτρηση 4η</u></b>			Παροχή=535,42 ml/5min		
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	77,60	1080	46,62	2160	35,66
120	76,66	1200	45,06	2280	34,71
240	69,52	1320	43,68	2400	33,76
360	62,77	1440	42,30	2520	32,90
480	58,11	1560	41,21	2640	32,06
600	54,83	1680	39,97	2760	31,31
720	52,26	1800	38,94	2880	30,55
840	50,18	1920	37,76	3000	29,81
960	48,28	2040	36,71		

<b><u>Μέτρηση 5η</u></b>			Παροχή=455,9ml/5min		
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	78,76	1440	43,39	2880	33,74
120	73,21	1560	42,28	3000	33,19
240	66,62	1680	41,34	3120	32,75
360	61,26	1800	40,34	3240	32,30
480	57,56	1920	39,43	3360	31,90
600	54,66	2040	38,52	3480	31,45
720	52,45	2160	37,49	3600	30,99
840	50,54	2280	36,88	3720	30,69
960	48,87	2400	36,19	3840	30,33
1080	47,33	2520	35,48	3960	30,00
1200	45,90	2640	34,83	4080	29,61
1320	44,52	2760	34,20		

<b><u>Μέτρηση 6η</u></b>			Παροχή=814,58 ml/5min		
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	77,47	720	43,77	1440	34,76
120	68,84	840	41,85	1560	33,65
240	58,77	960	40,30	1680	32,49
360	53,16	1080	38,87	1800	31,50
480	49,20	1200	37,38	1920	30,52
600	46,25	1320	36,08	2040	29,64

<b><u>Μέτρηση 7η</u></b>			Παροχή=418,33 ml/5min		
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	77,27	1200	46,11	2400	35,57
120	71,83	1320	44,82	2520	34,73
240	65,99	1440	43,71	2640	33,94
360	61,02	1560	42,59	2760	33,12
480	57,45	1680	41,49	2880	32,40
600	54,64	1800	40,38	3000	31,66
720	52,53	1920	39,36	3120	31,03

840	50,64	2040	38,29	3240	30,36
960	49,05	2160	37,33	3360	29,80
1080	47,50	2280	36,40		

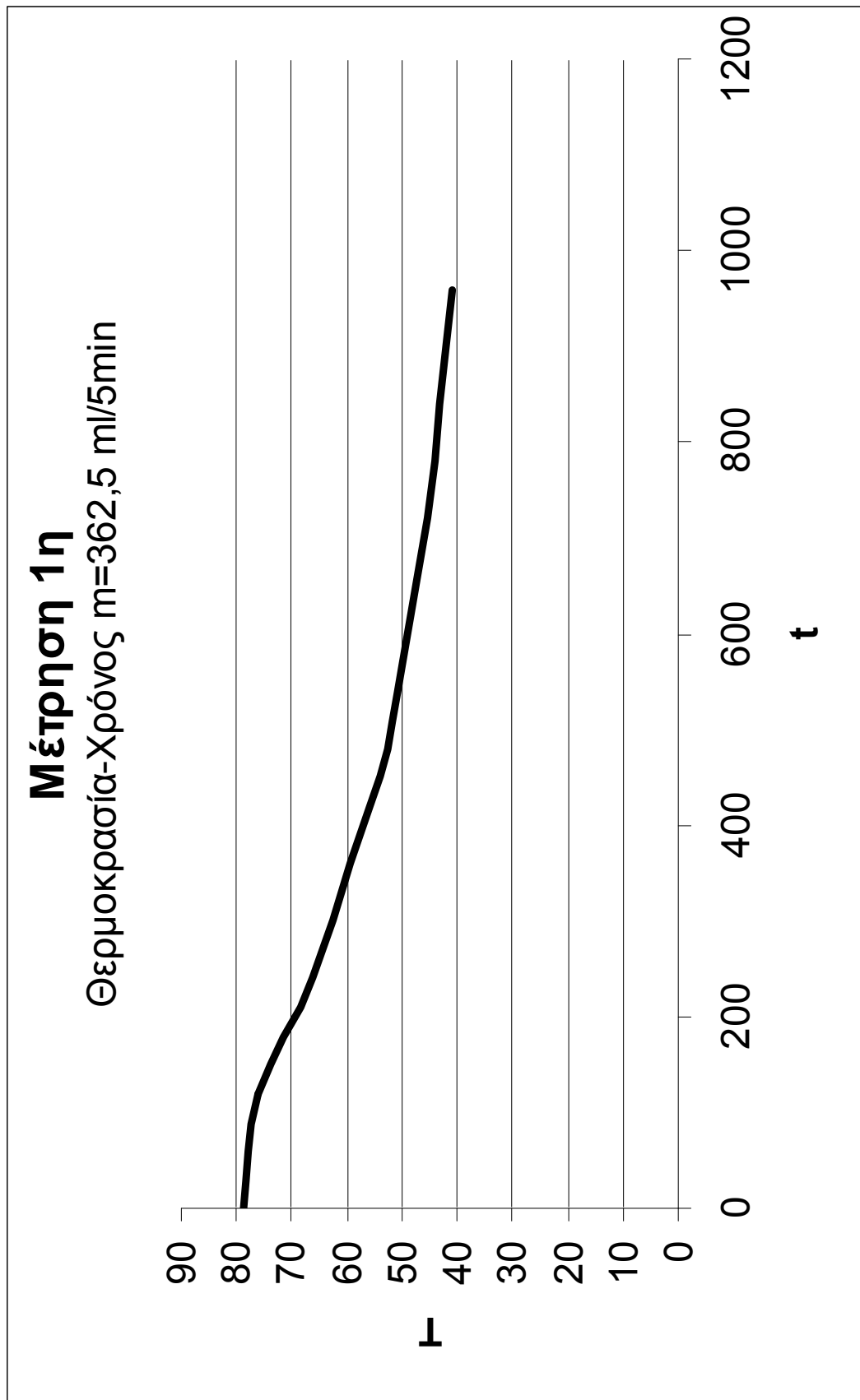
<b><u>Μέτρηση 8η</u></b>					
Παροχή=485,42 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	78,12	1200	45,06	2400	34,83
120	73,66	1320	43,79	2520	34,16
240	66,69	1440	42,60	2640	33,52
360	61,10	1560	41,51	2760	32,89
480	57,40	1680	40,38	2880	32,33
600	54,44	1800	39,21	3000	31,78
720	52,07	1920	38,16	3120	31,25
840	49,96	2040	37,20	3240	30,78
960	48,22	2160	36,32	3360	30,29
1080	46,57	2280	35,54	3480	29,84

<b><u>Μέτρηση 9η</u></b>					
Παροχή=450 ml/5min					
Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία	Χρόνος	Θερμοκρασία
(sec)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	(°C)
0	77,92	1320	45,22	2640	34,51
120	75,14	1440	43,99	2760	33,82
240	69,14	1560	42,83	2880	33,24
360	63,01	1680	41,77	3000	32,66
480	58,91	1800	40,68	3120	32,15
600	55,76	1920	39,67	3240	31,61
720	53,44	2040	38,70	3360	31,14
840	51,49	2160	37,78	3480	30,71
960	49,75	2280	36,86	3600	30,36
1080	48,12	2400	36,02	3720	30,00
1200	46,63	2520	35,19	3840	29,70

**Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των μετρήσεων**

## 9.5 Διαγράμματα Μετρήσεων

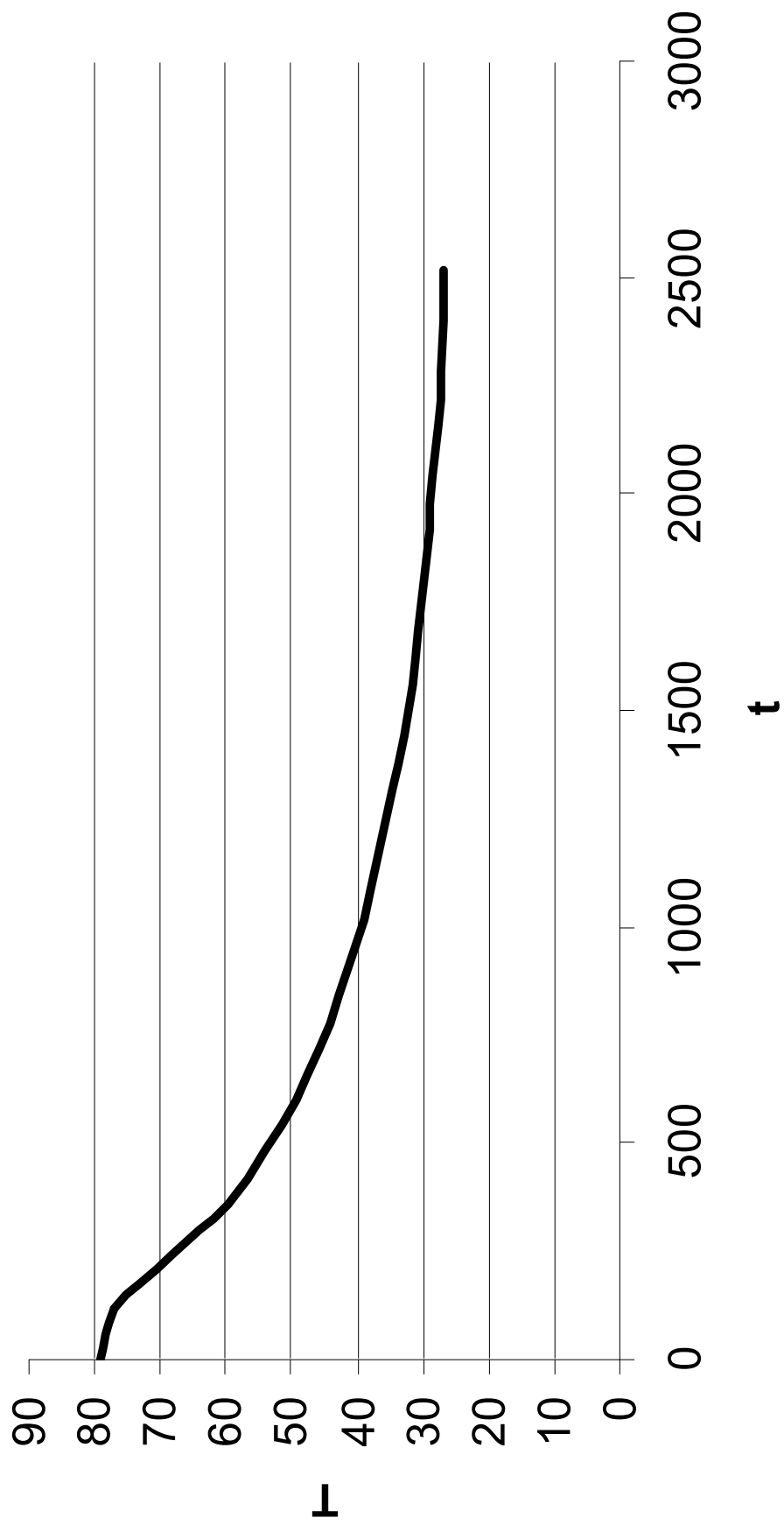
### 9.5.1 Δοχείο 1<sup>ο</sup> με PCM





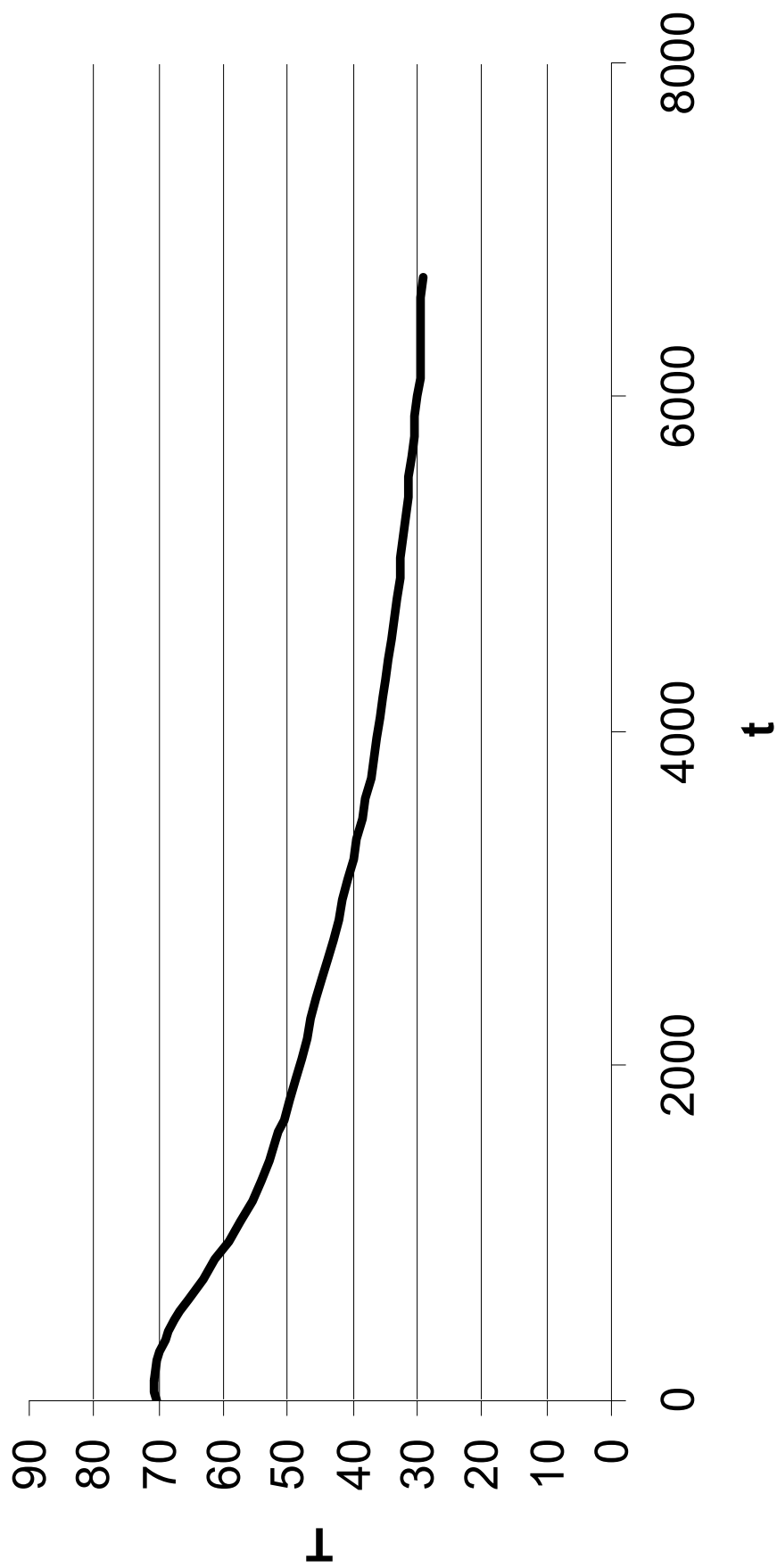
## Μέτρηση 2η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=350 \text{ ml/5min}$



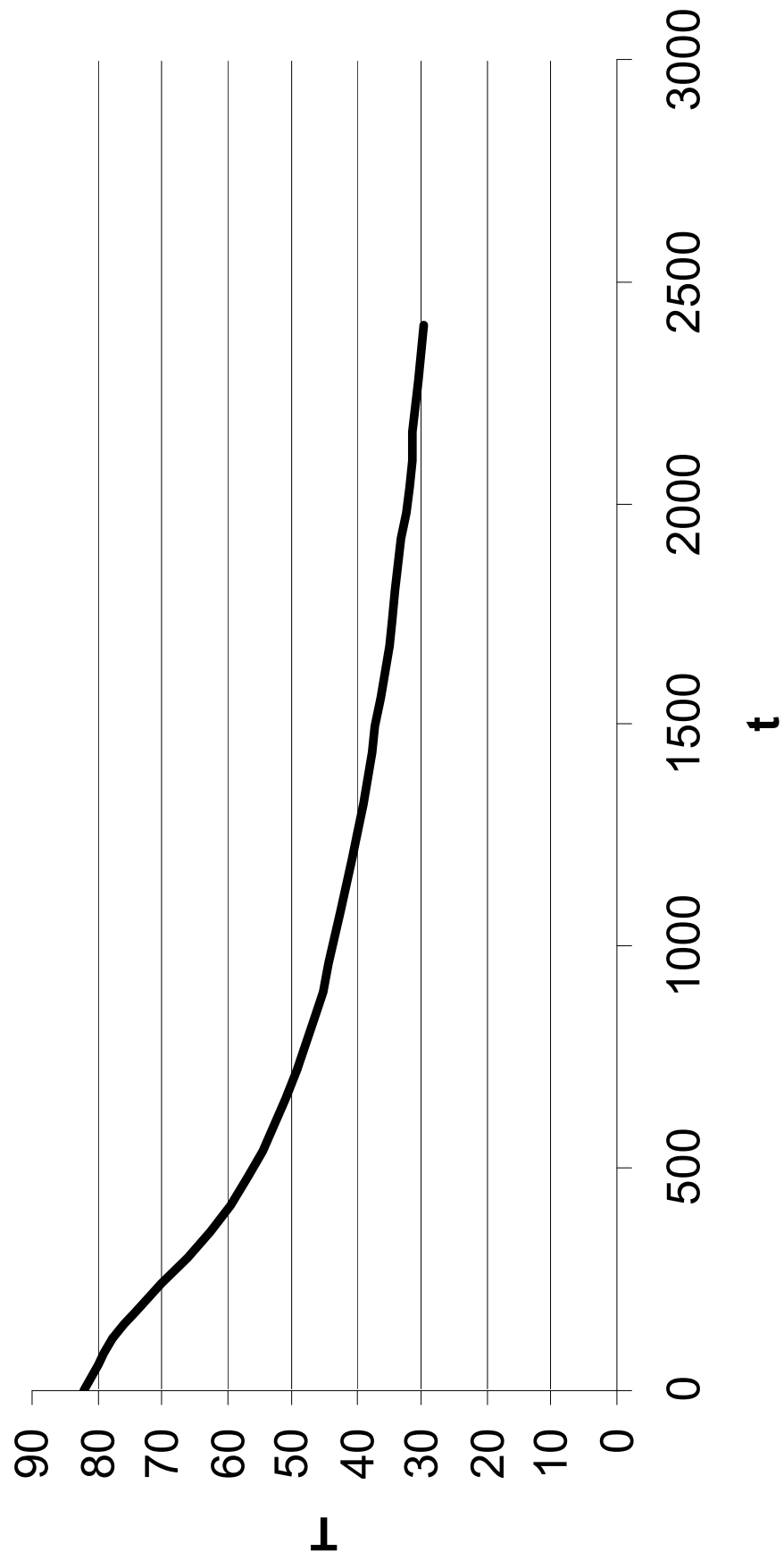
## Μέτρηση 3η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=103,47 \text{ ml/5min}$



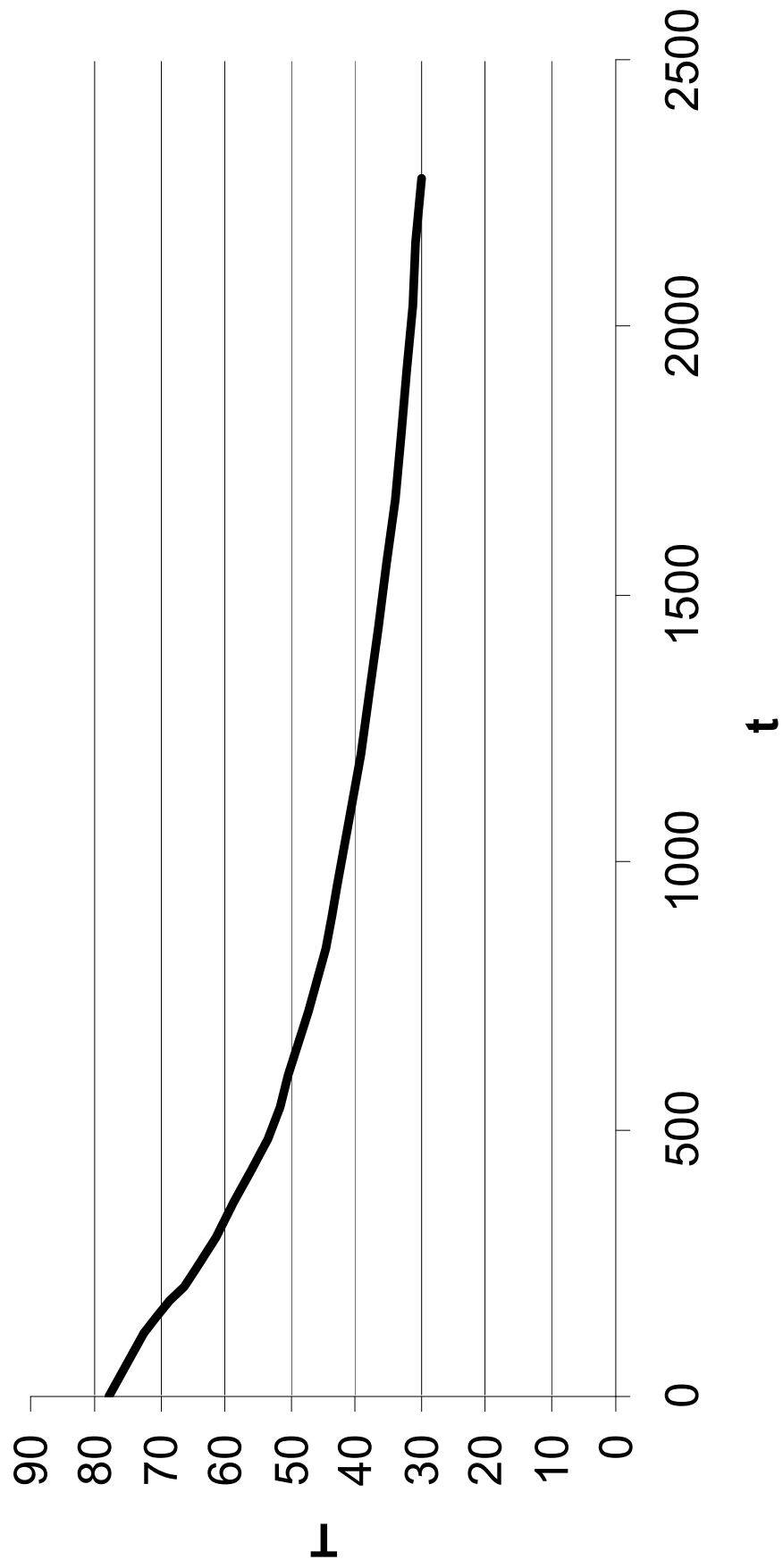
## Μέτρηση 4η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=257 \text{ ml/5min}$



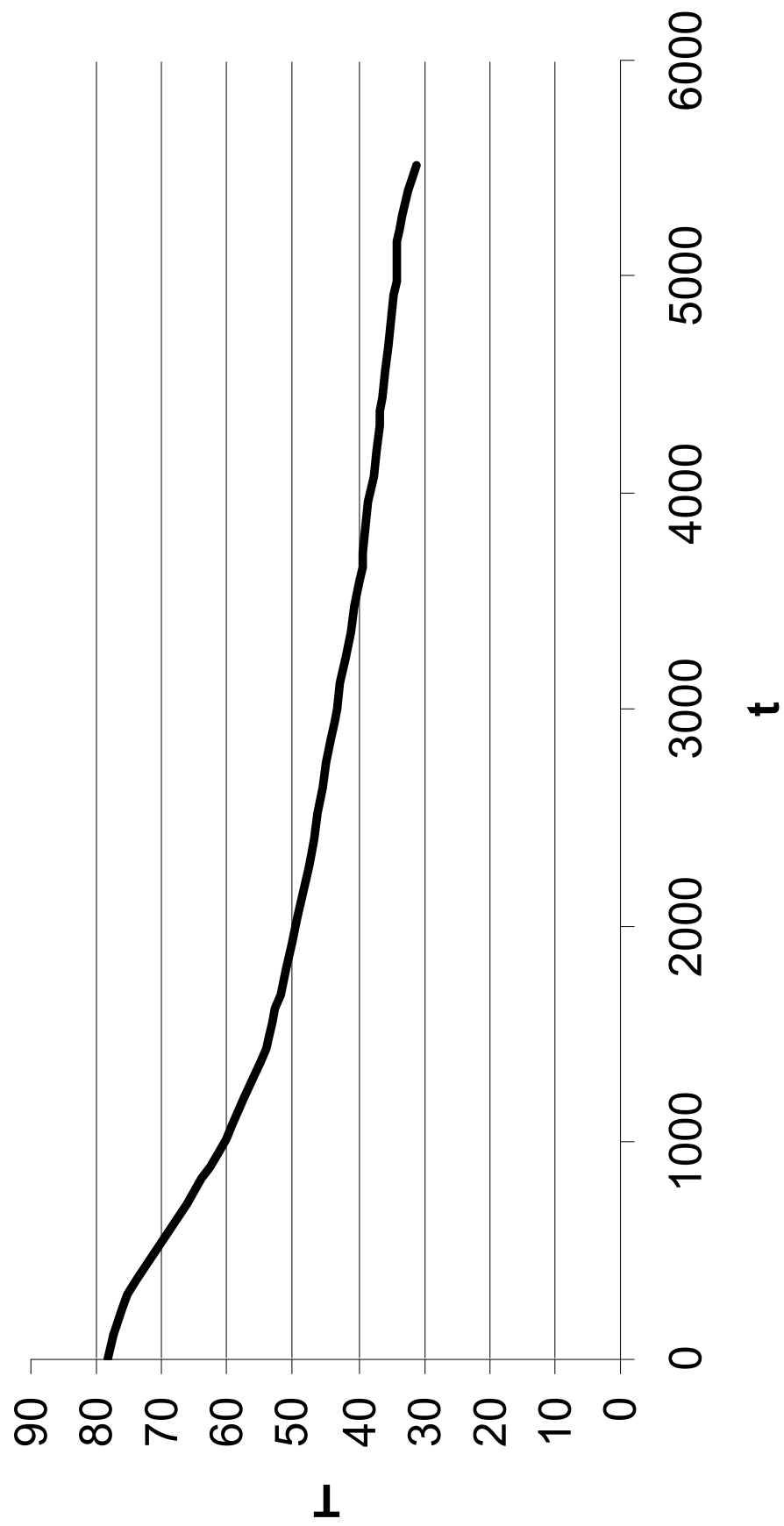
## Μέτρηση 5η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=265,83 \text{ ml/5min}$



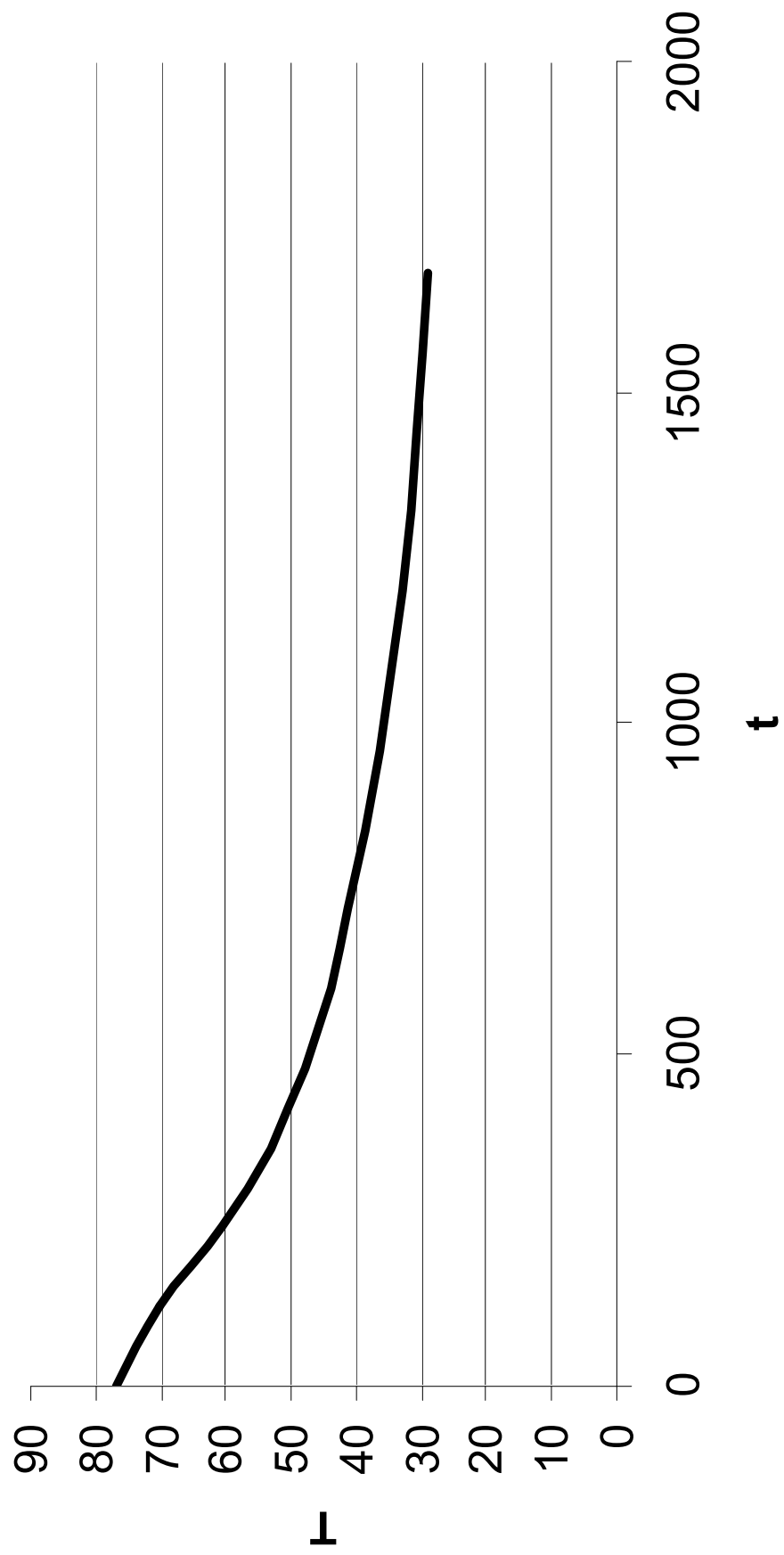
## Μέτρηση 6η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=86 \text{ ml/5min}$



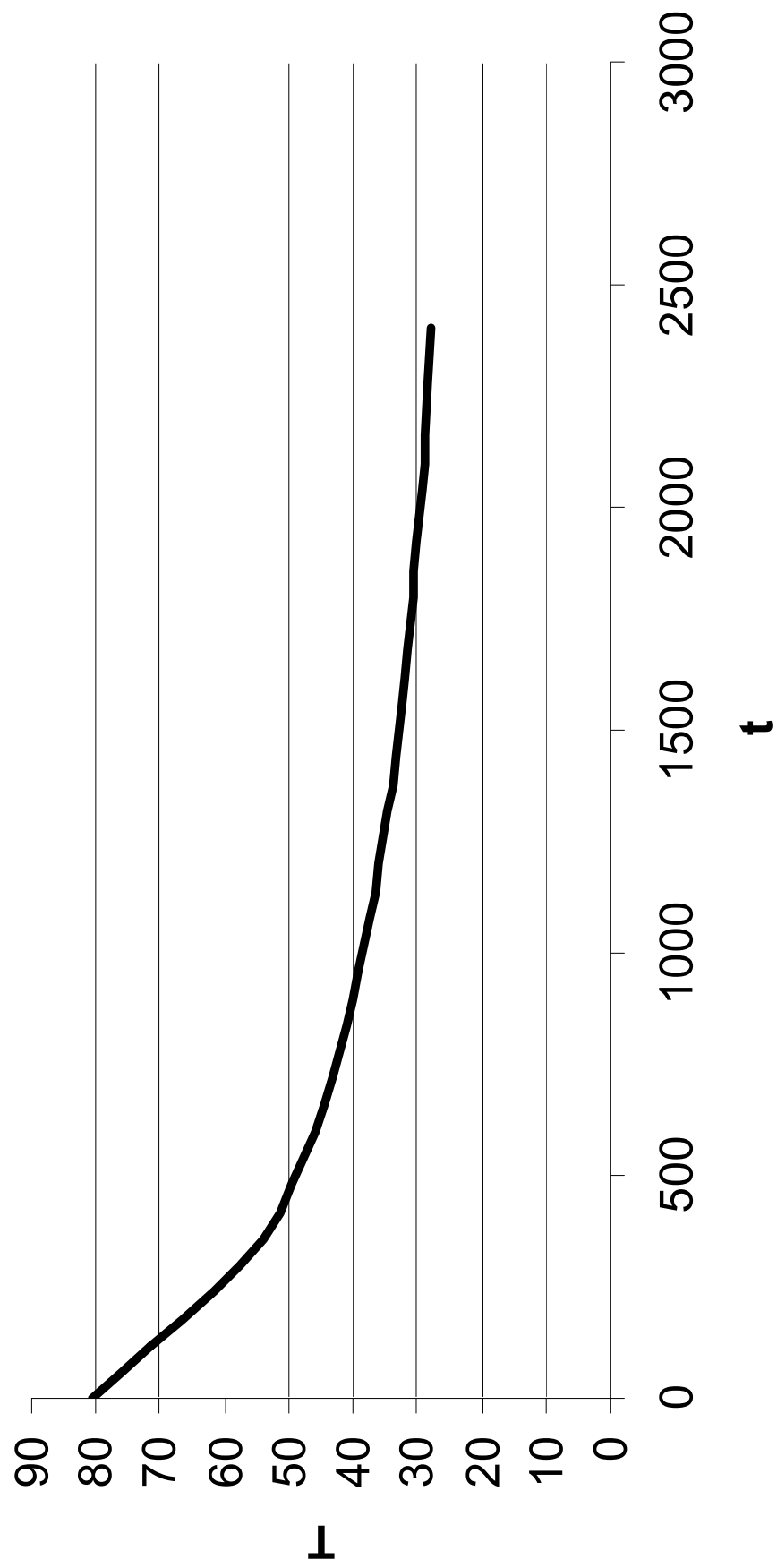
## Μέτρηση 7η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=410 \text{ ml/5min}$



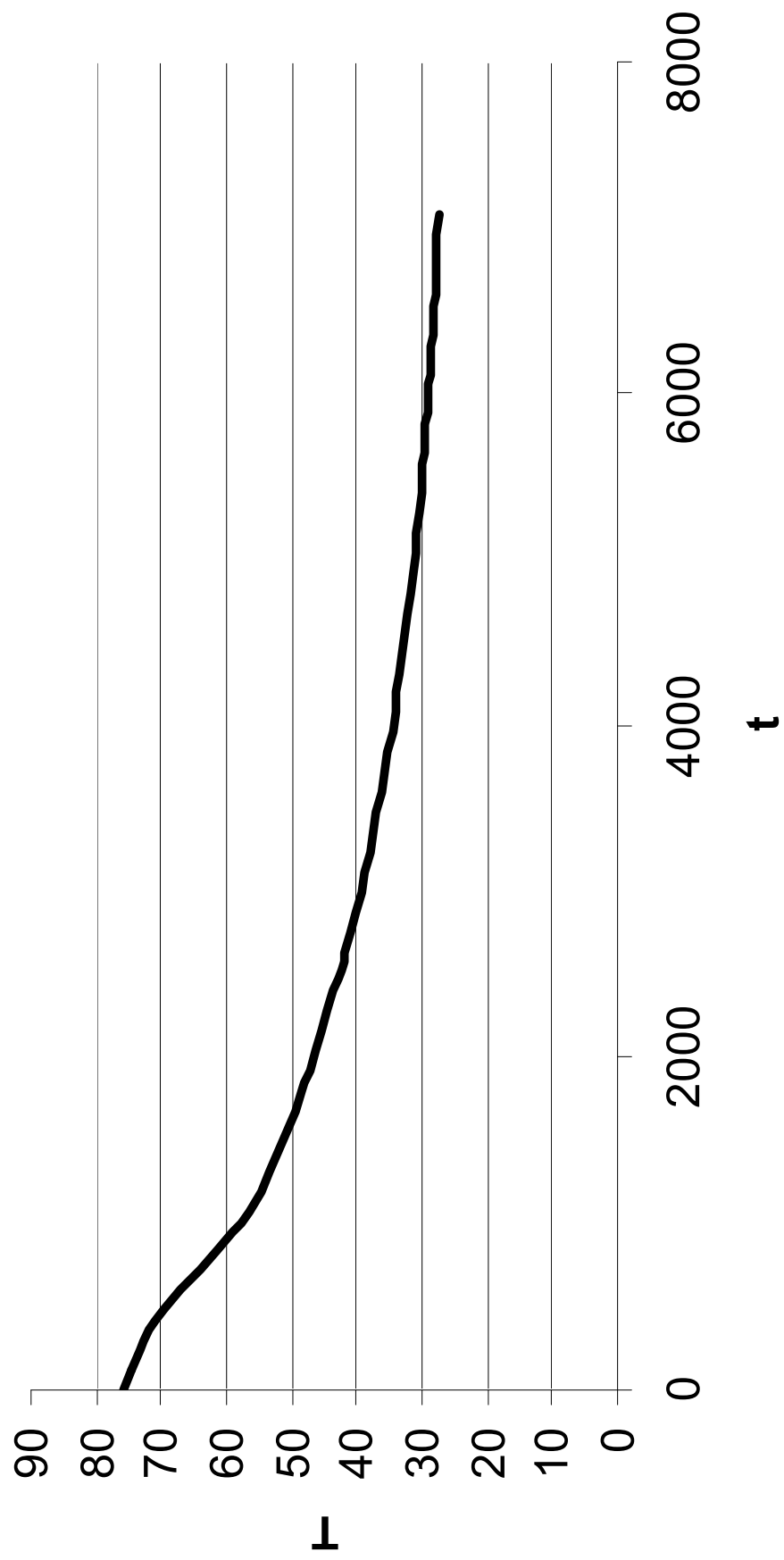
## Μέτρηση 8η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=342,5 \text{ ml/5min}$



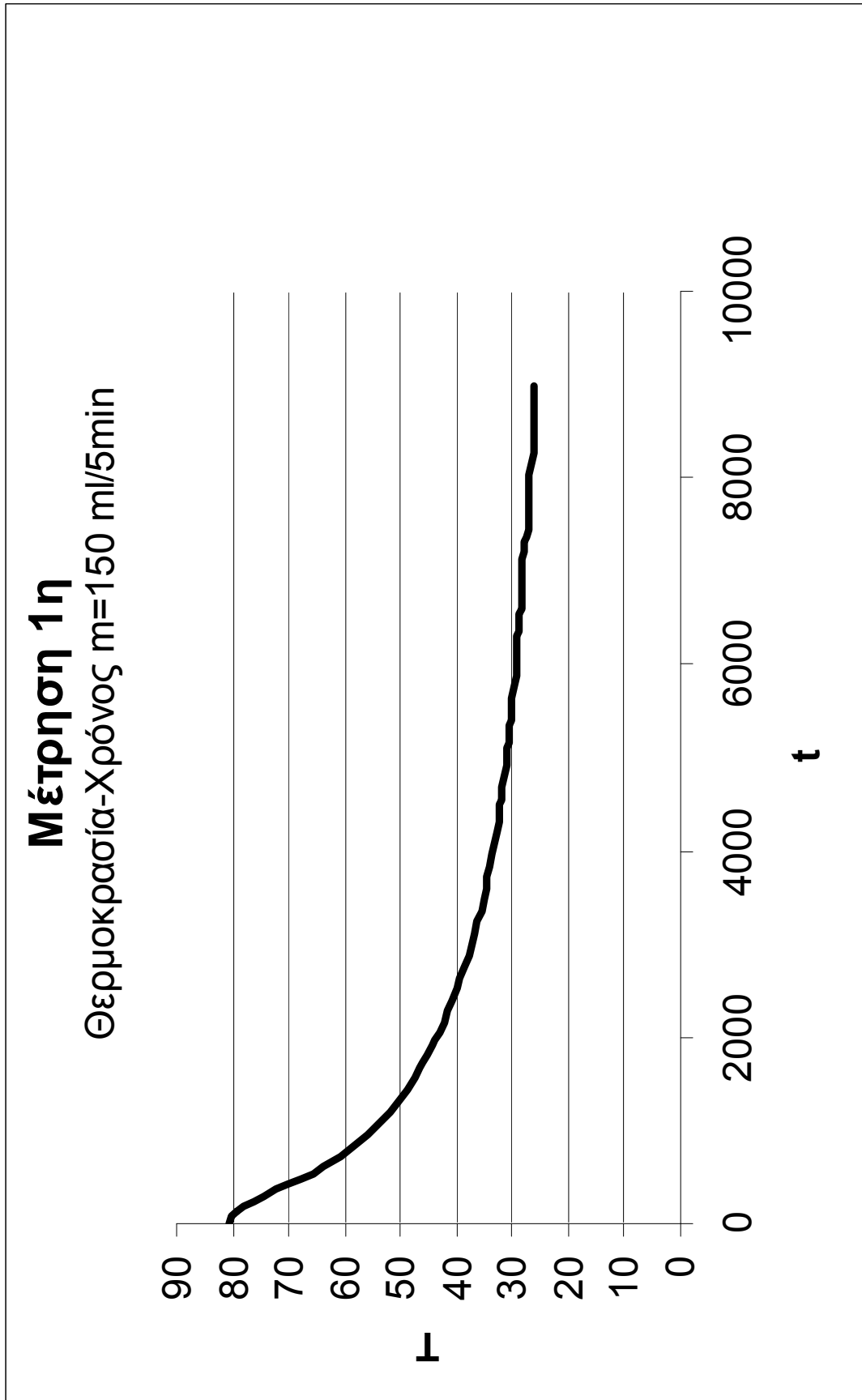
## Μέτρηση 9η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=126 \text{ ml/5min}$



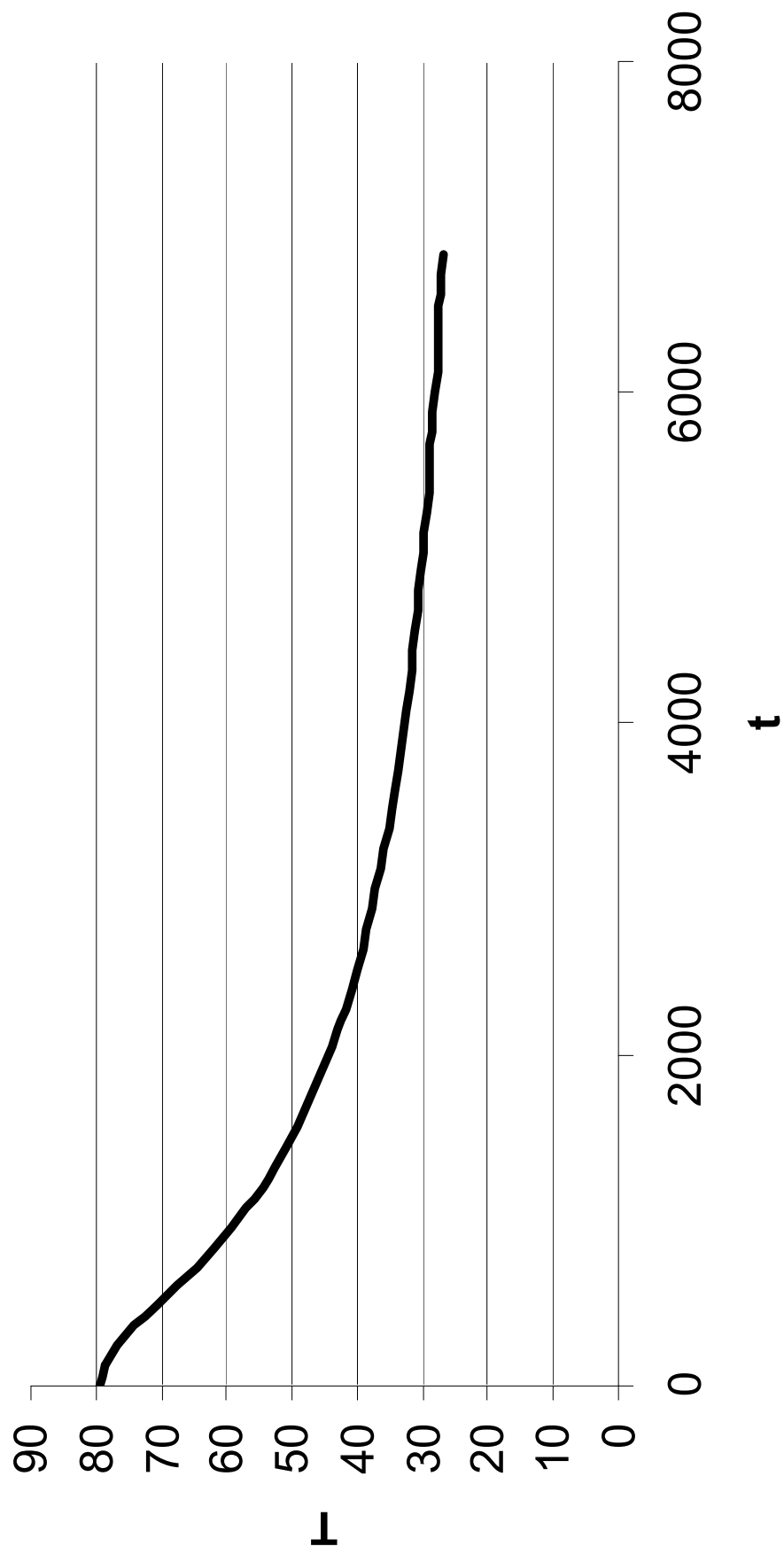


9.5.2 Δοχείο 1<sup>ο</sup> με Νερό



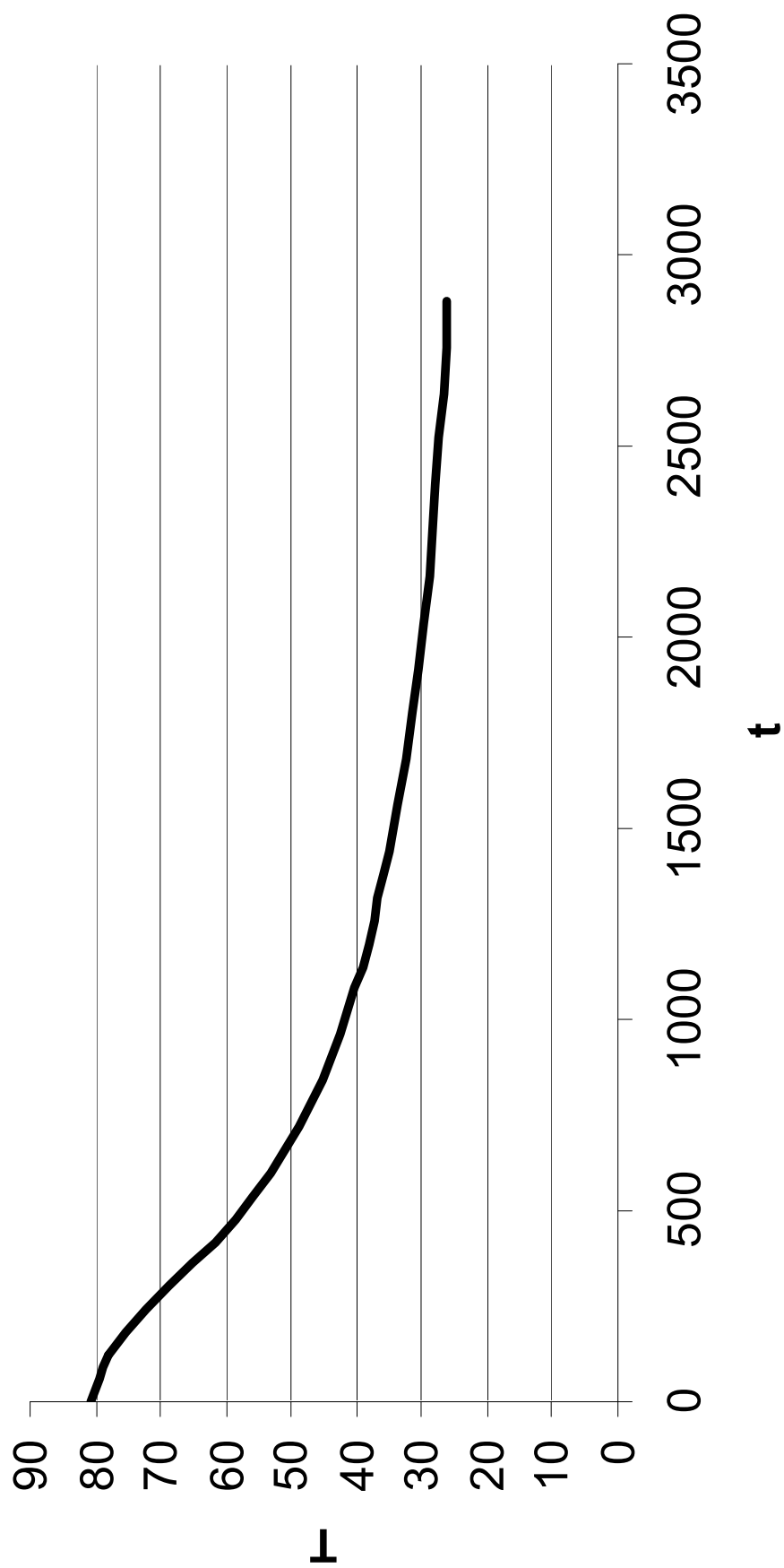
## Μέτρηση 2η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=161,25 \text{ ml/5min}$



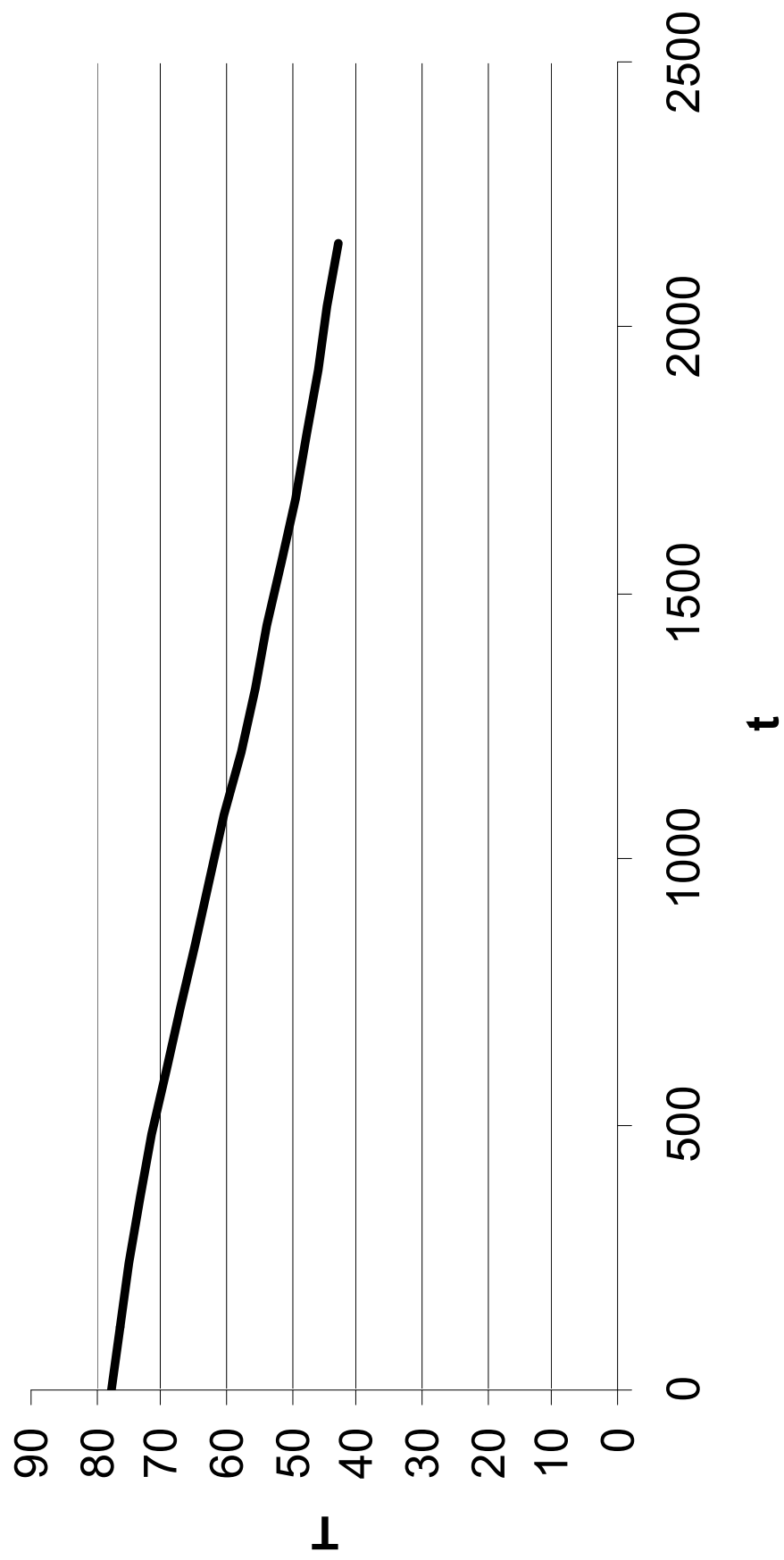
## Μέτρηση 3η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=315 \text{ ml/5min}$



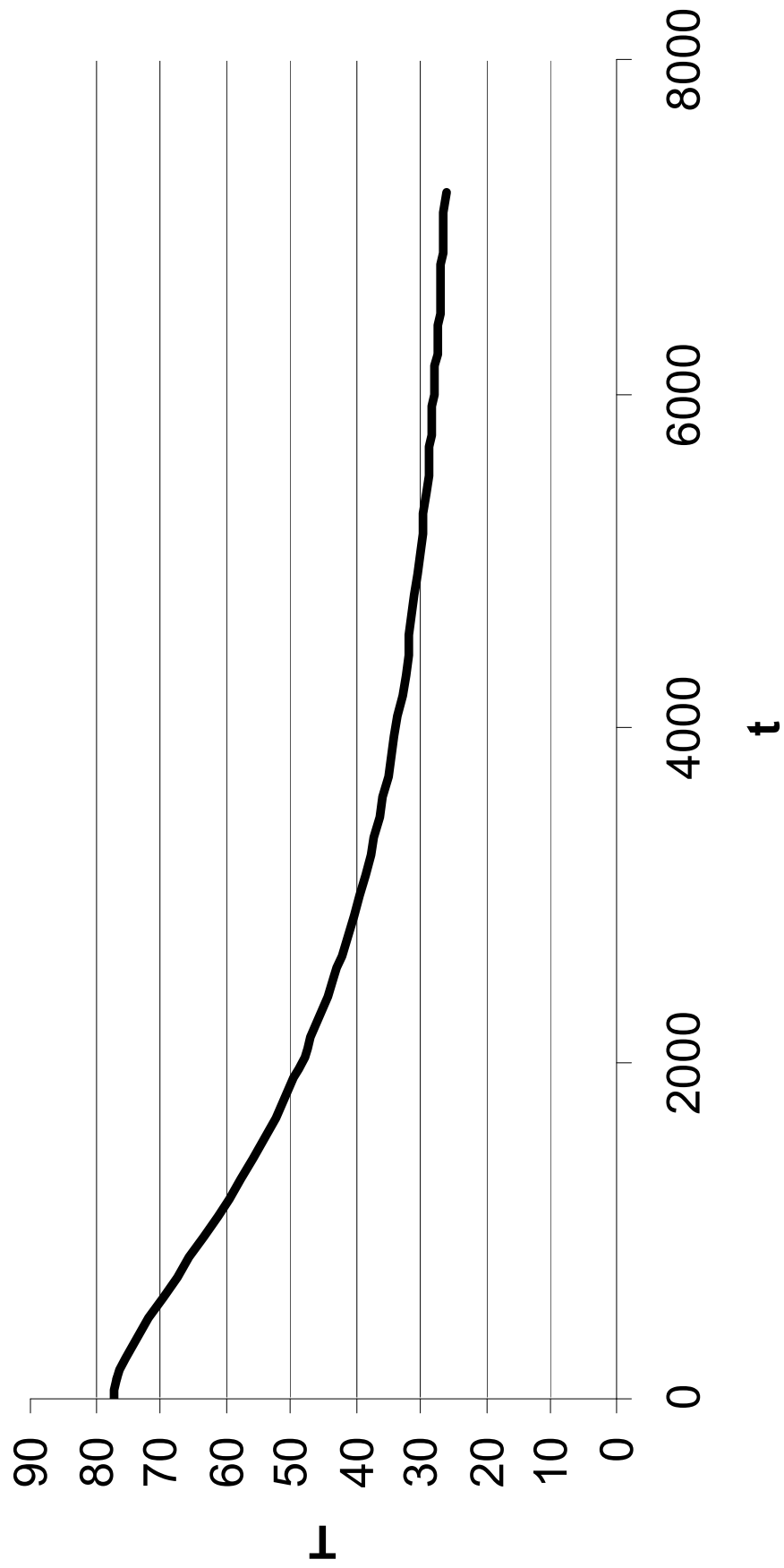
## Μέτρηση 4η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=82,14 \text{ ml/5min}$



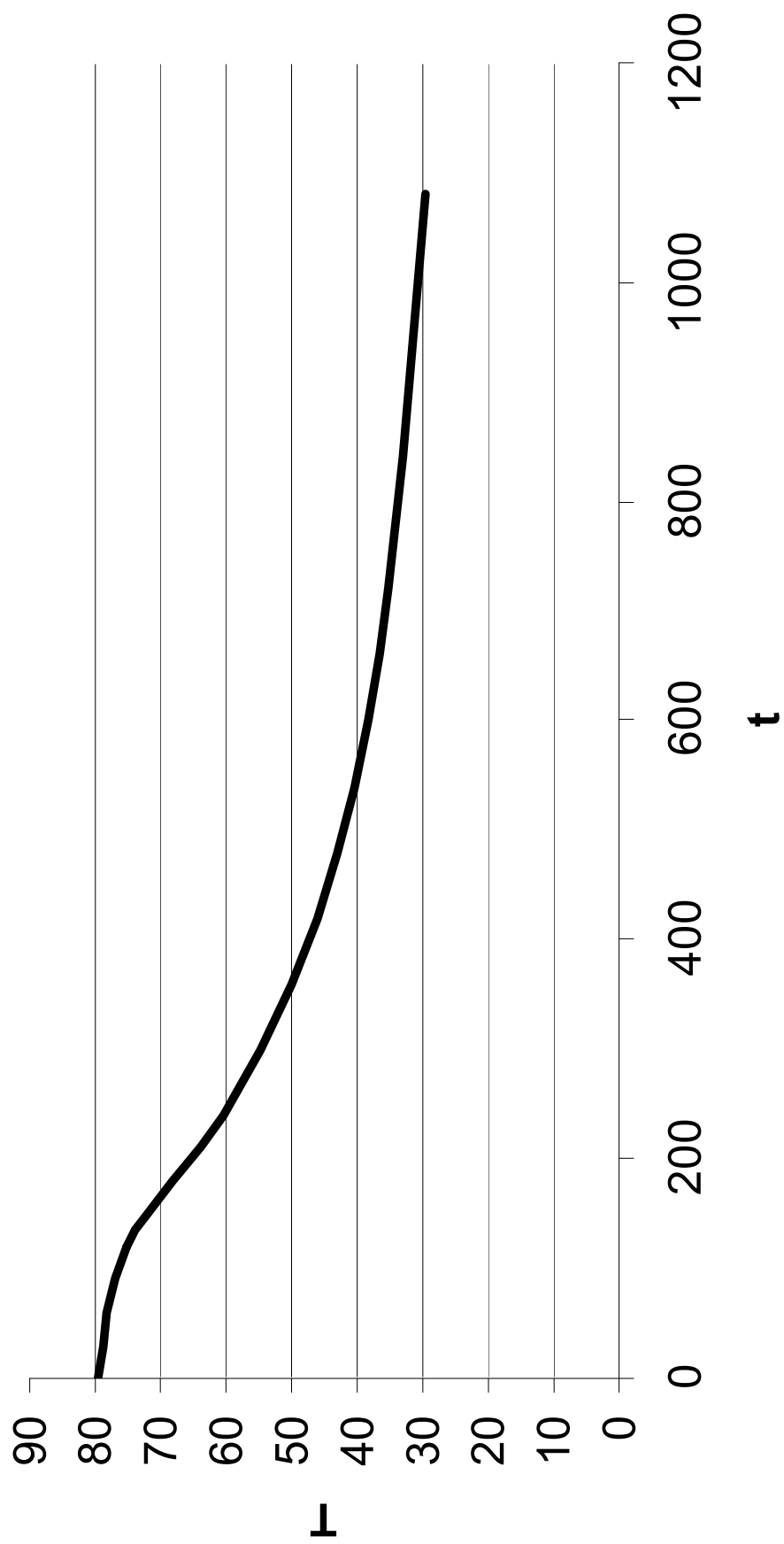
## Μέτρηση 5η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=93,75 \text{ ml/5min}$



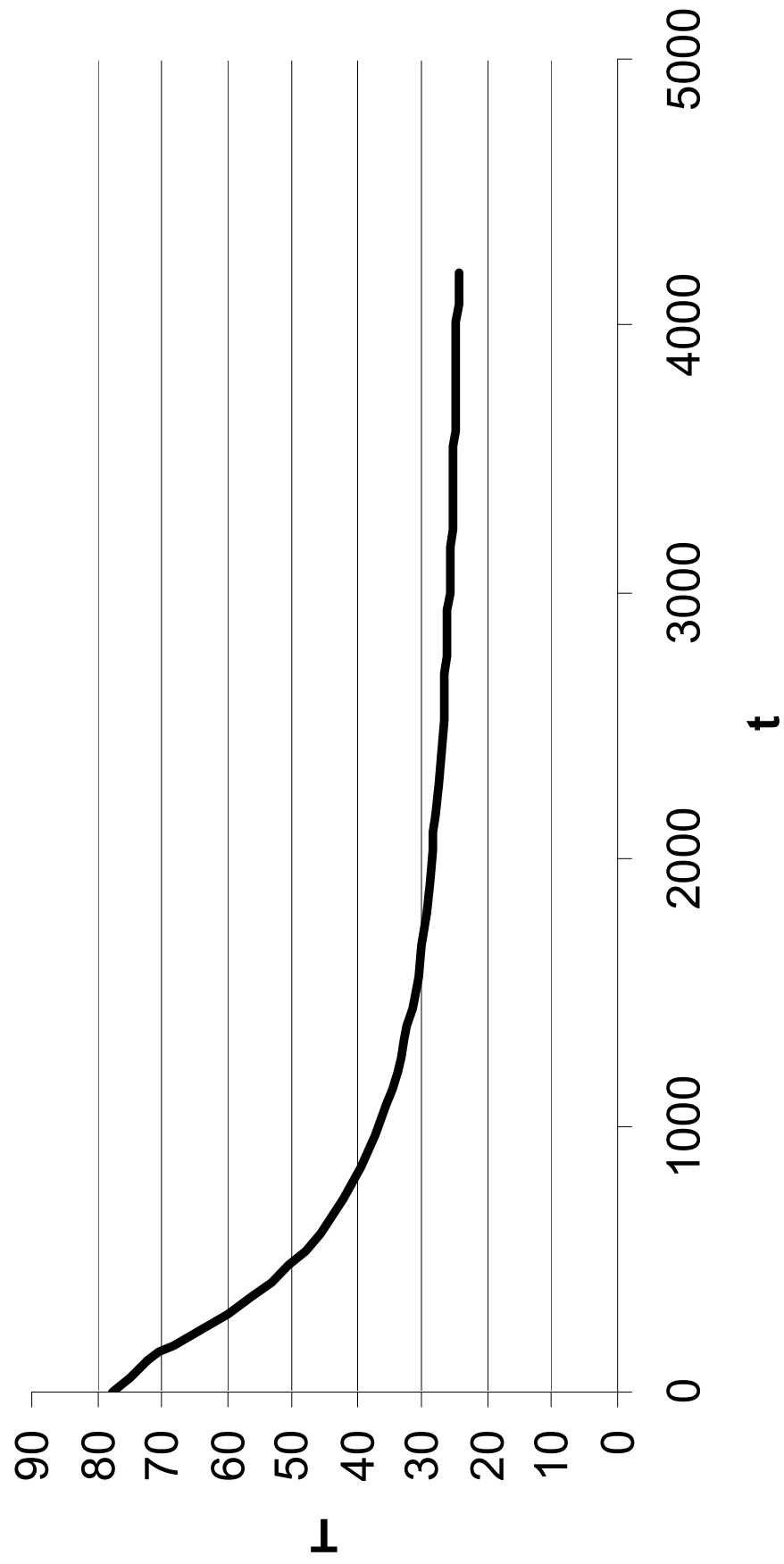
## Μέτρηση 6η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=508,33 \text{ ml/5min}$



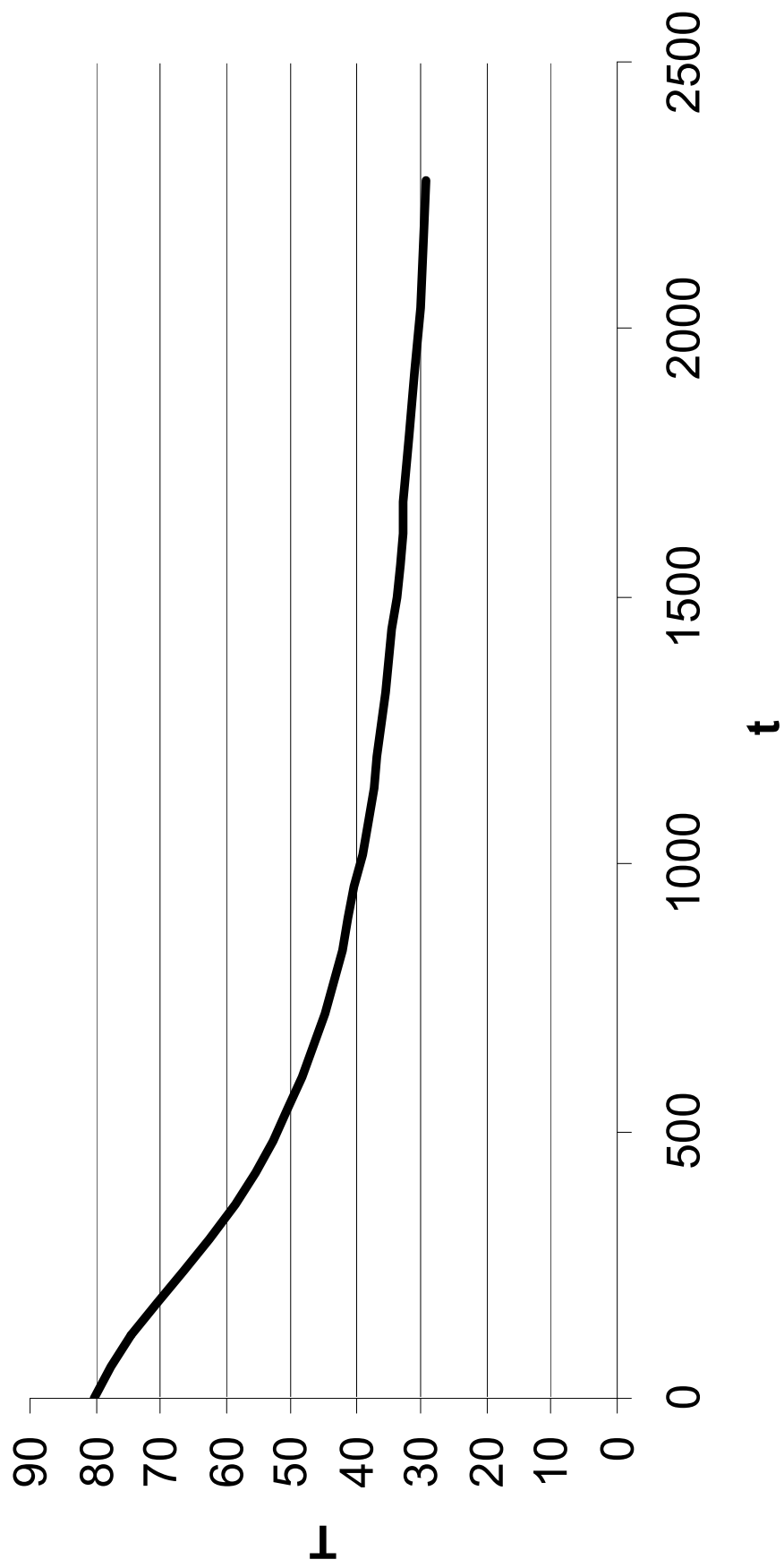
## Μέτρηση 7η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=328,75 \text{ ml/5min}$



## Μέτρηση 8η

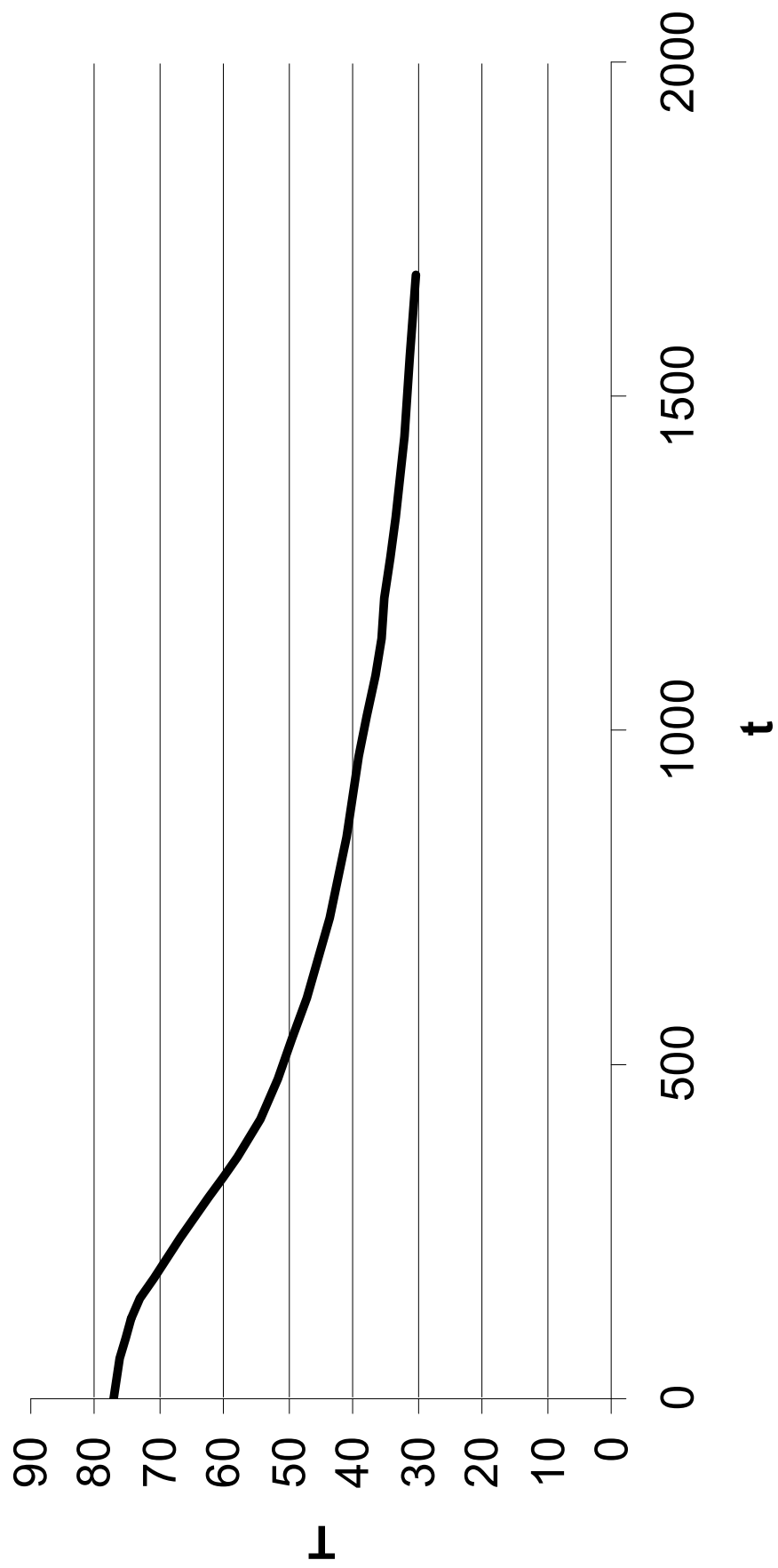
Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=244 \text{ ml/5min}$



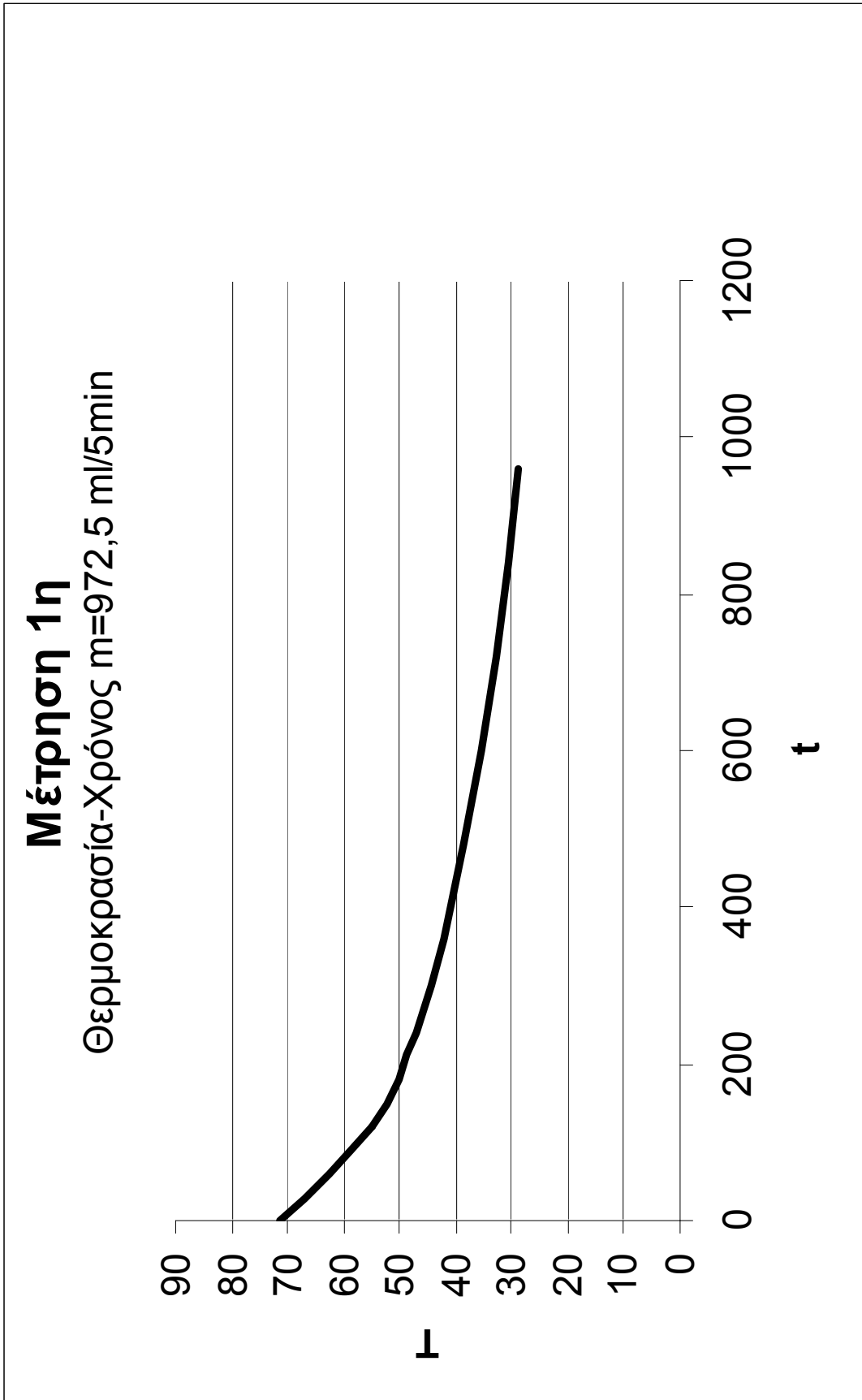


## Μέτρηση 9η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=308,33 \text{ ml/5min}$

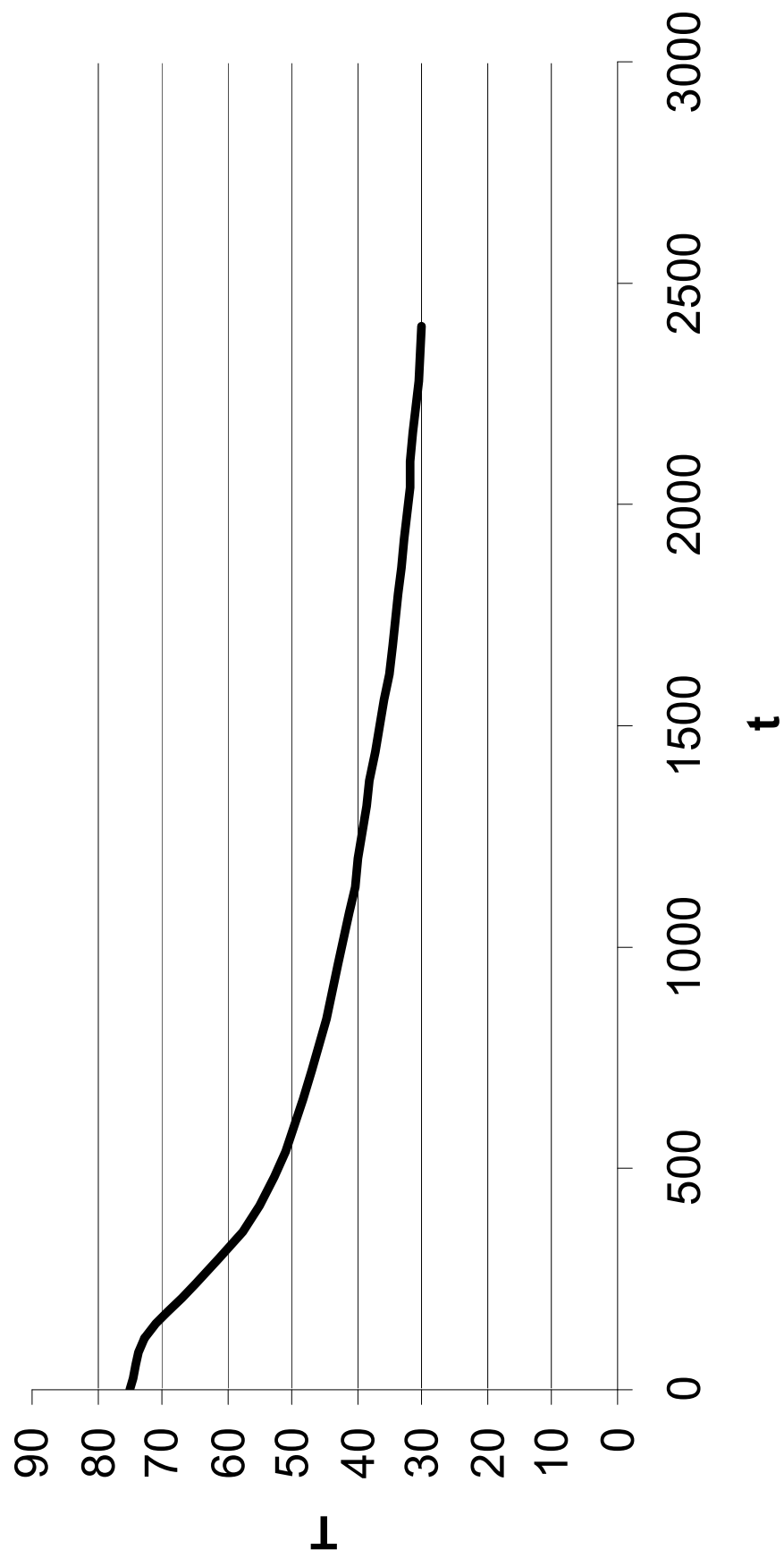


9.5.3 Δοχείο 2° με PCM



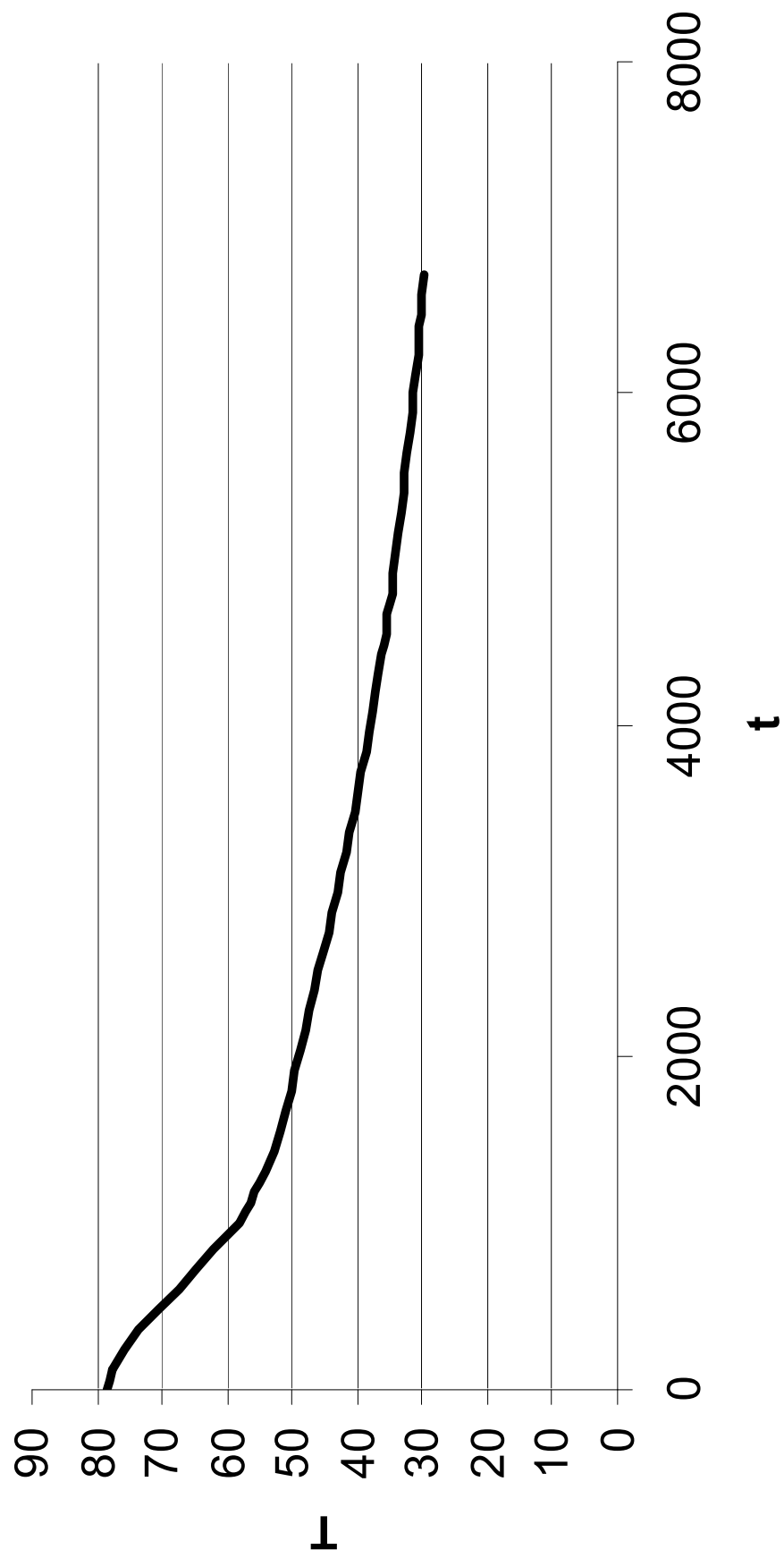
## Μέτρηση 2η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=408 \text{ ml/5min}$



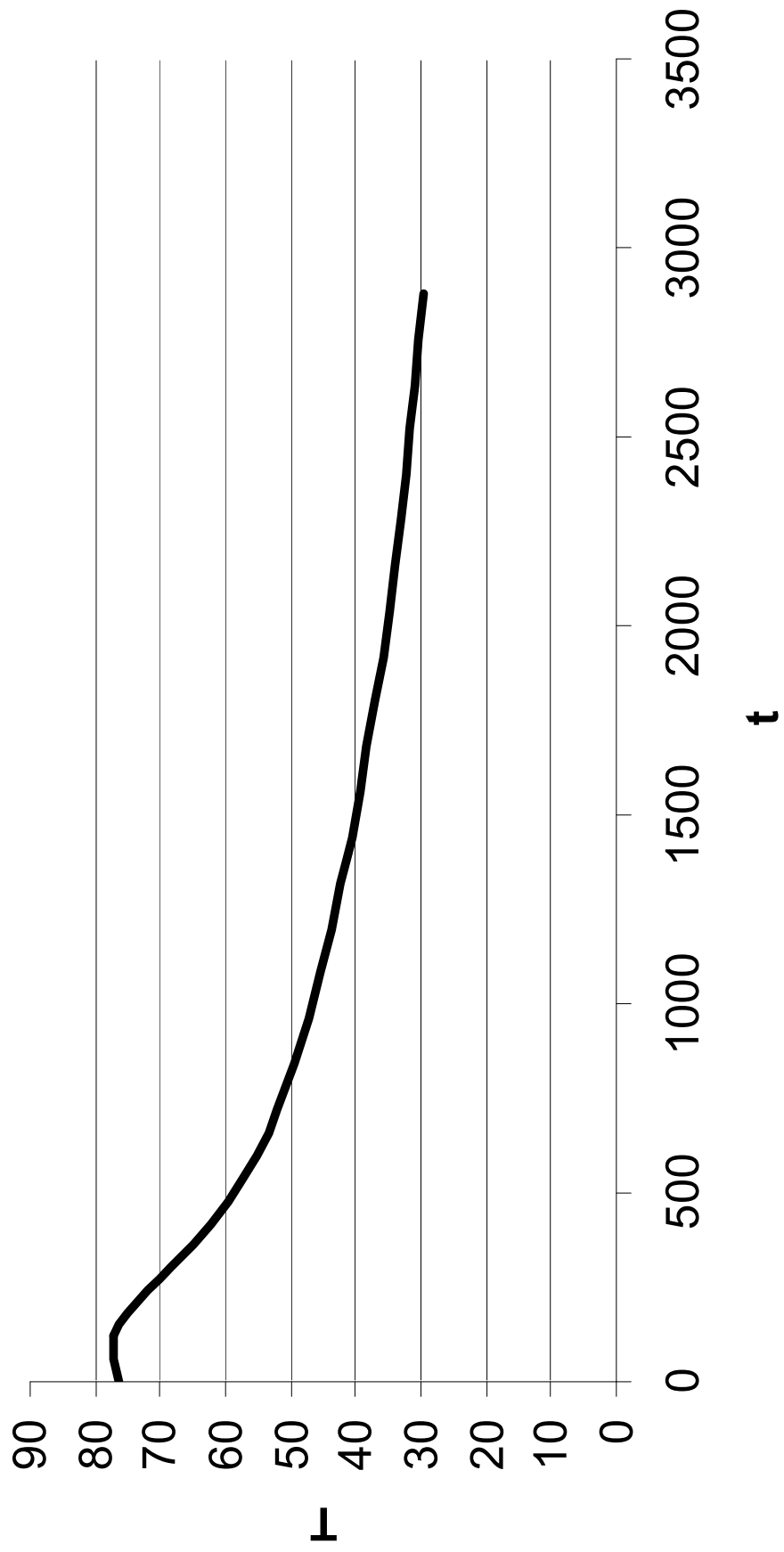
## Μέτρηση 3η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=153,33 \text{ ml/5min}$



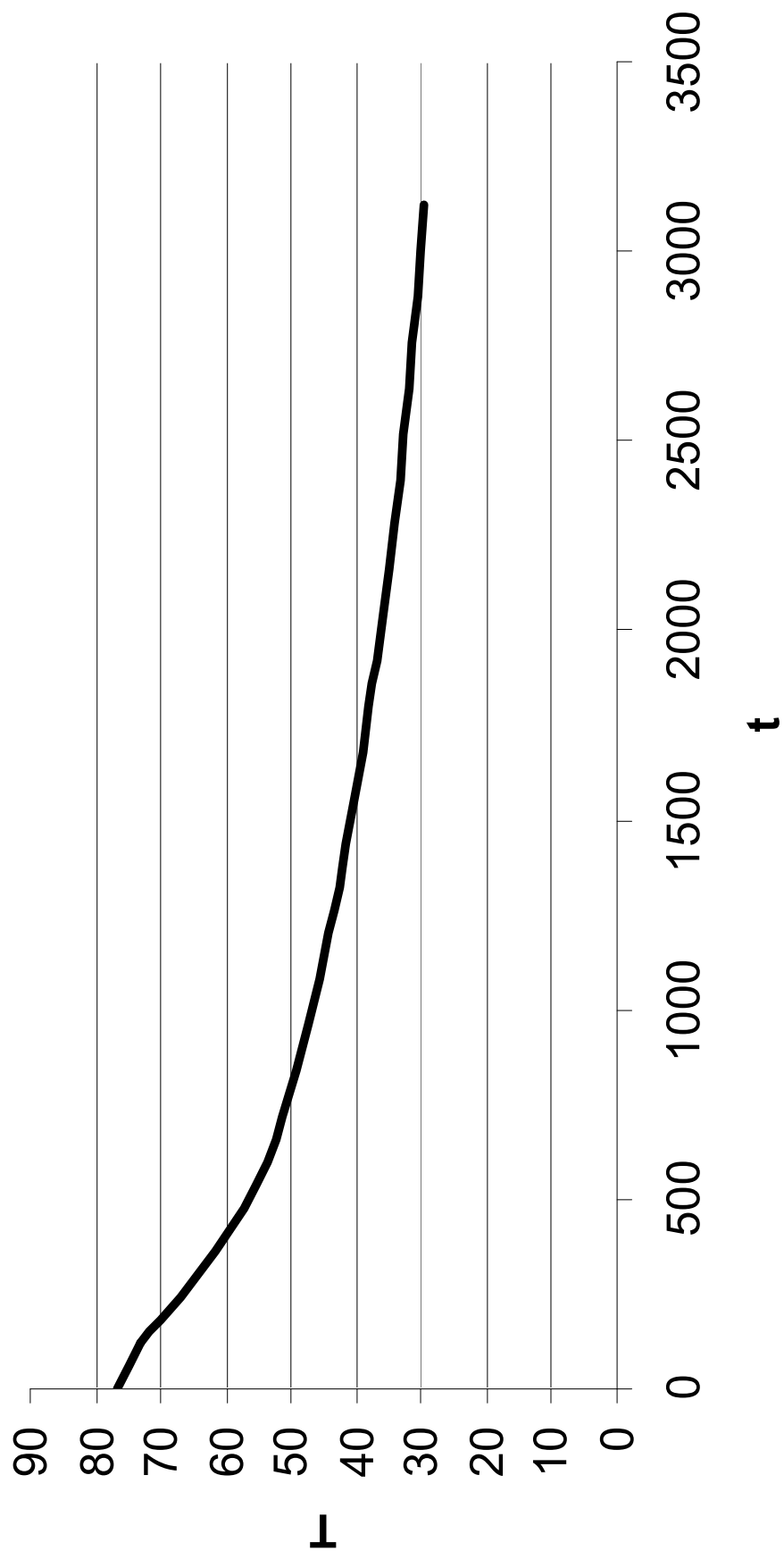
## Μέτρηση 4η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=367 \text{ ml/5min}$



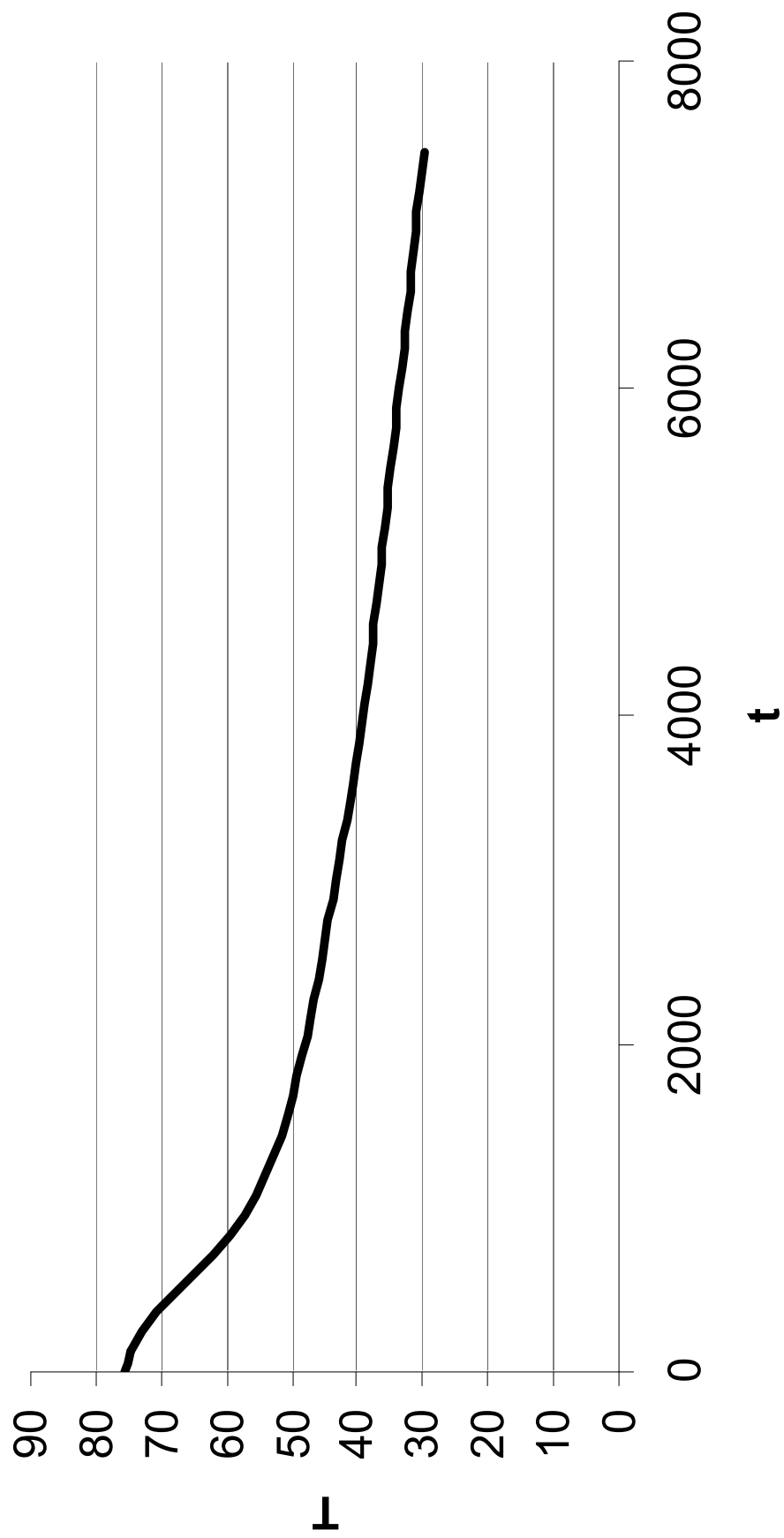
## Μέτρηση 5η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=335 \text{ ml/5min}$



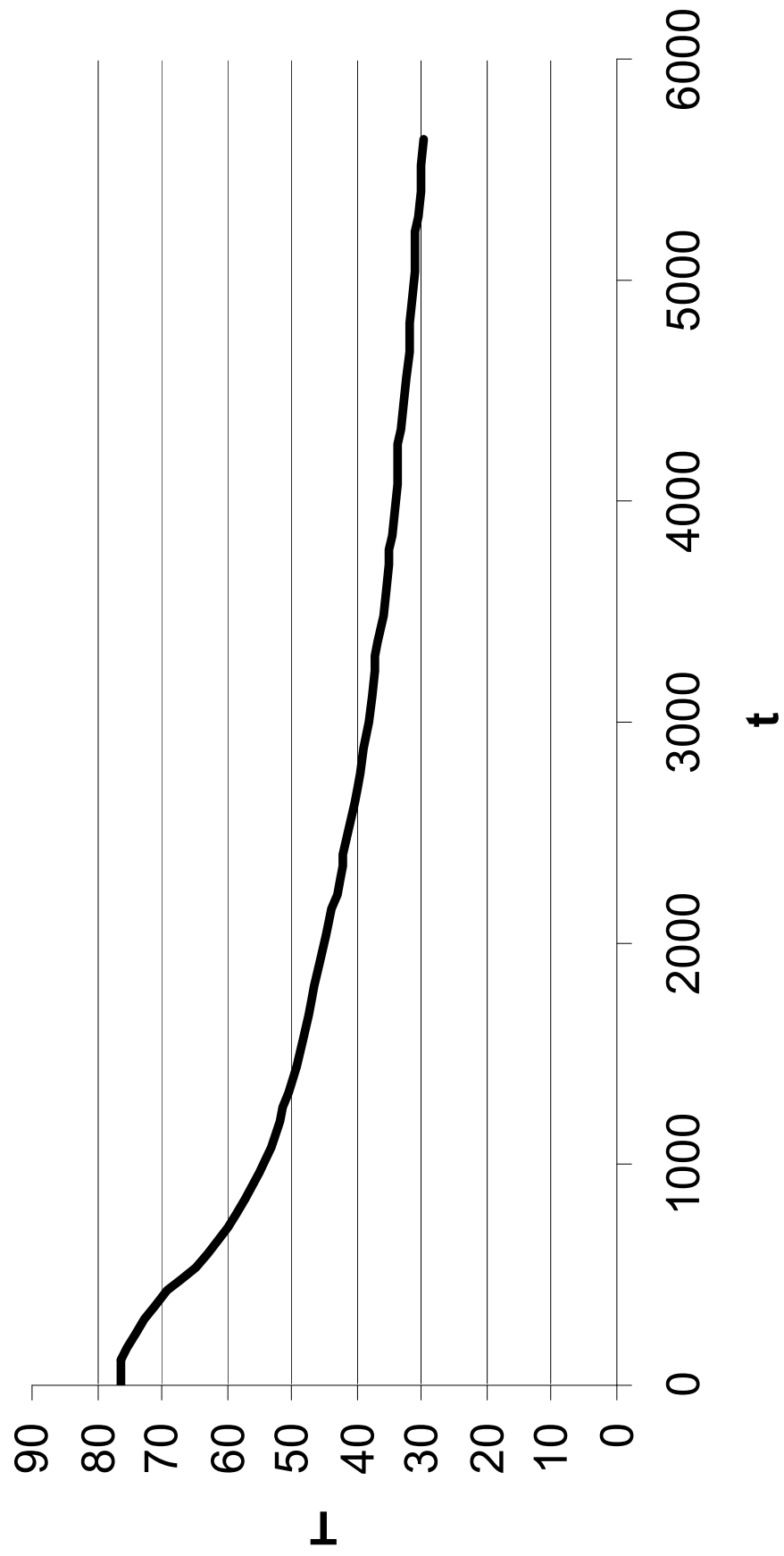
## Μέτρηση 6η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=169 \text{ ml/5min}$



## Μέτρηση 7η

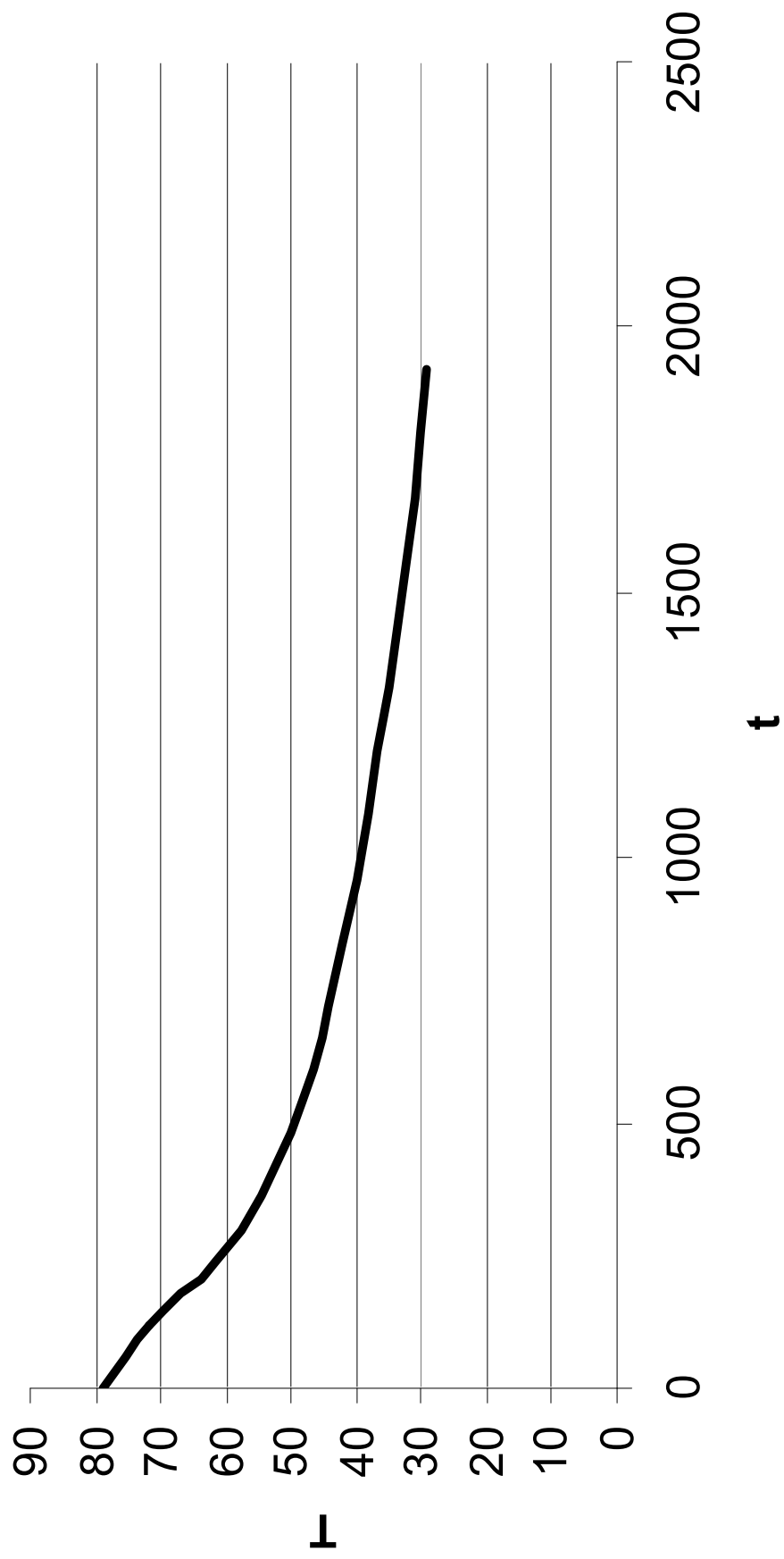
Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=220 \text{ ml/5min}$





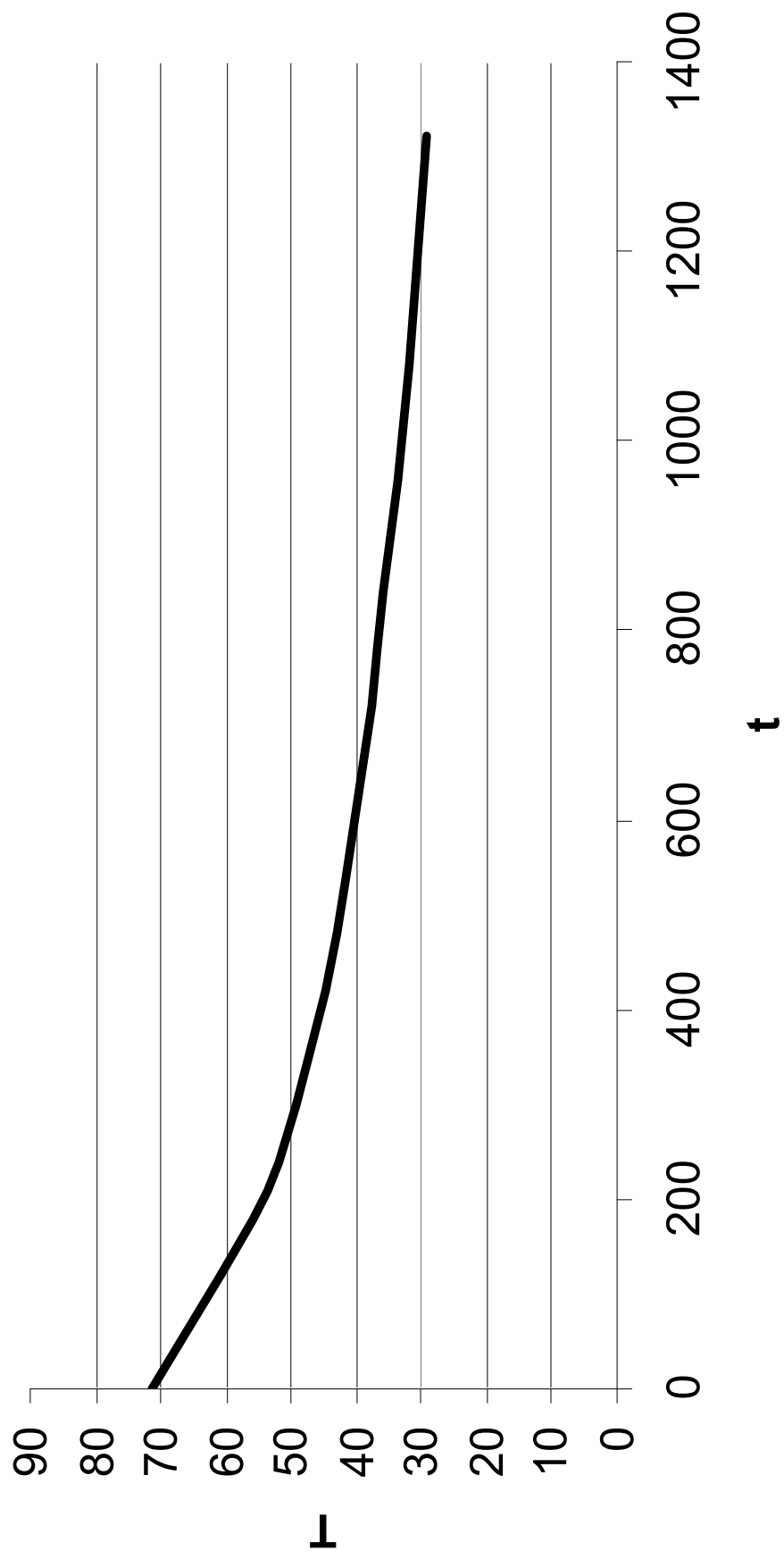
## Μέτρηση 8η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=578,33 \text{ ml/5min}$

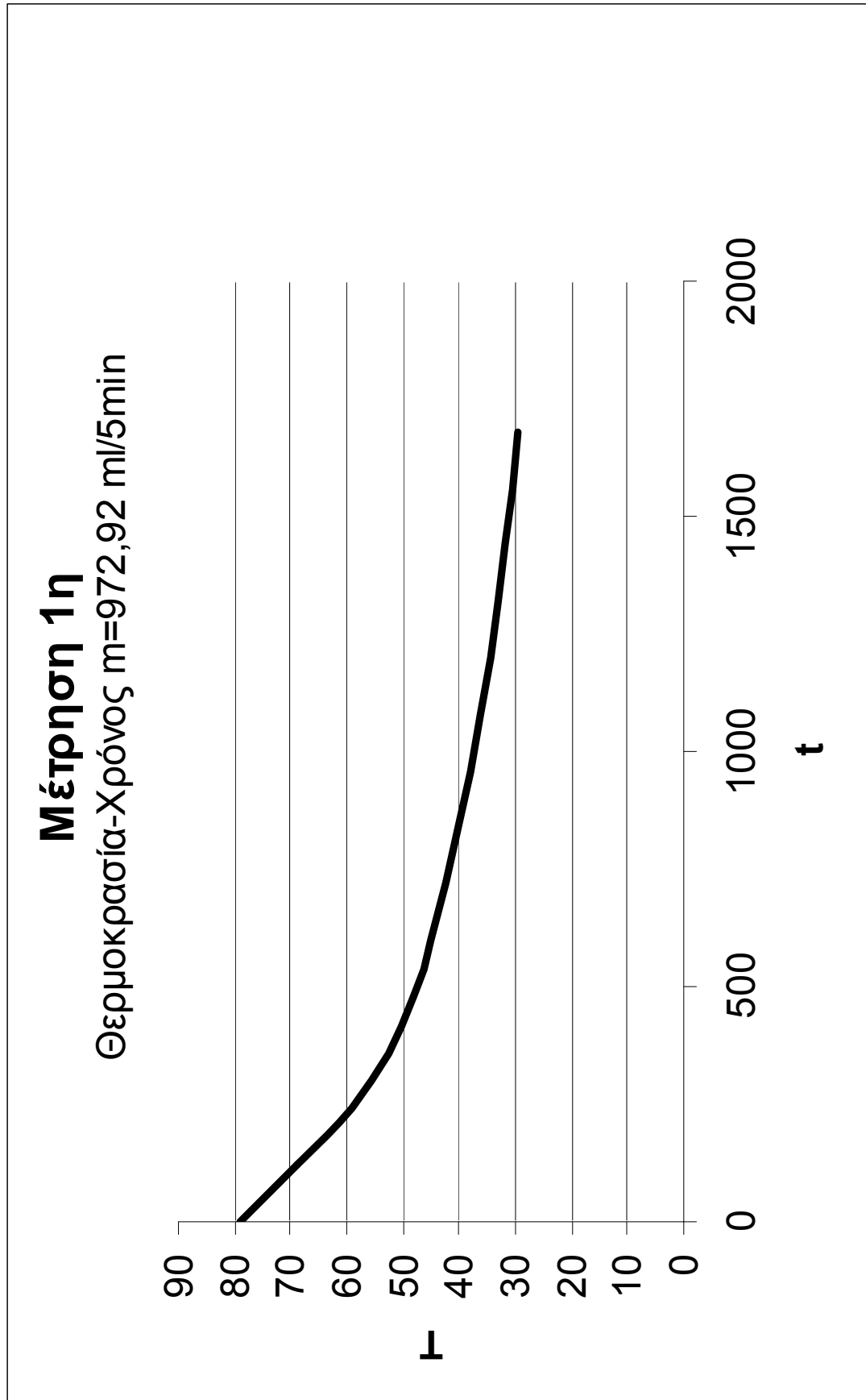


## Μέτρηση 9η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=767,5 \text{ ml/5min}$

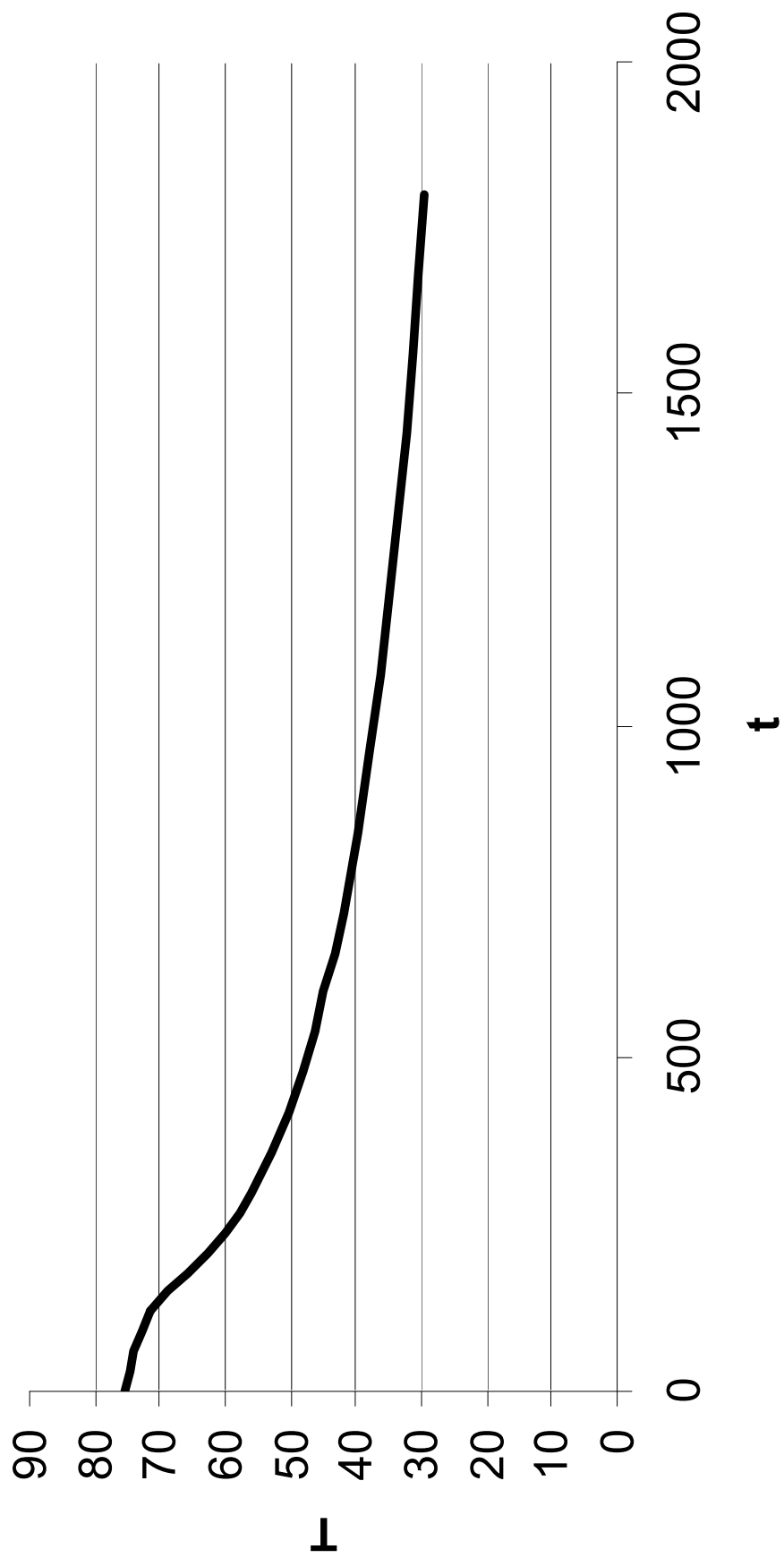


9.5.4 Δοχείο 2° με Νερό



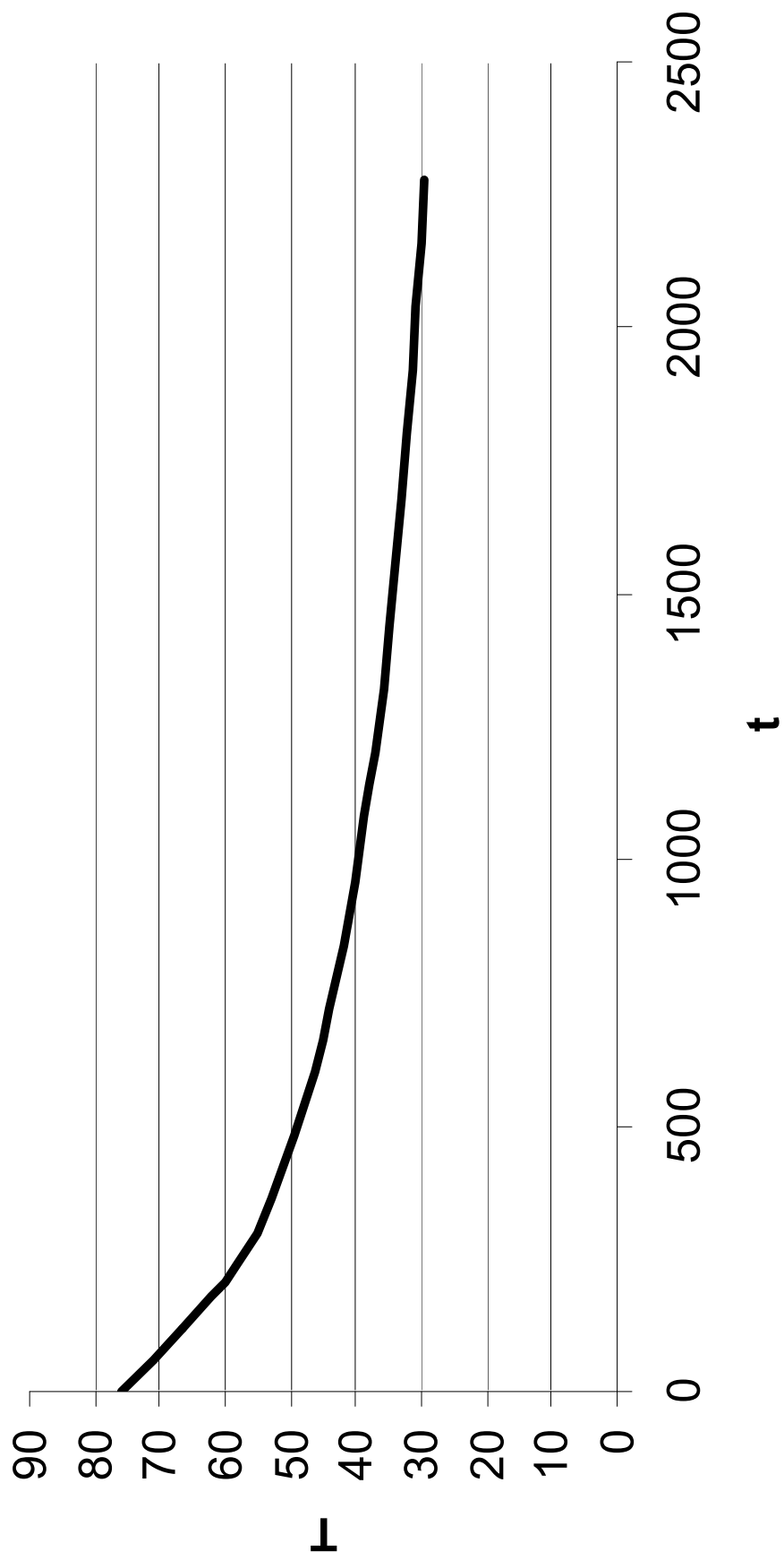
## Μέτρηση 2η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=1020,83 \text{ ml/5min}$



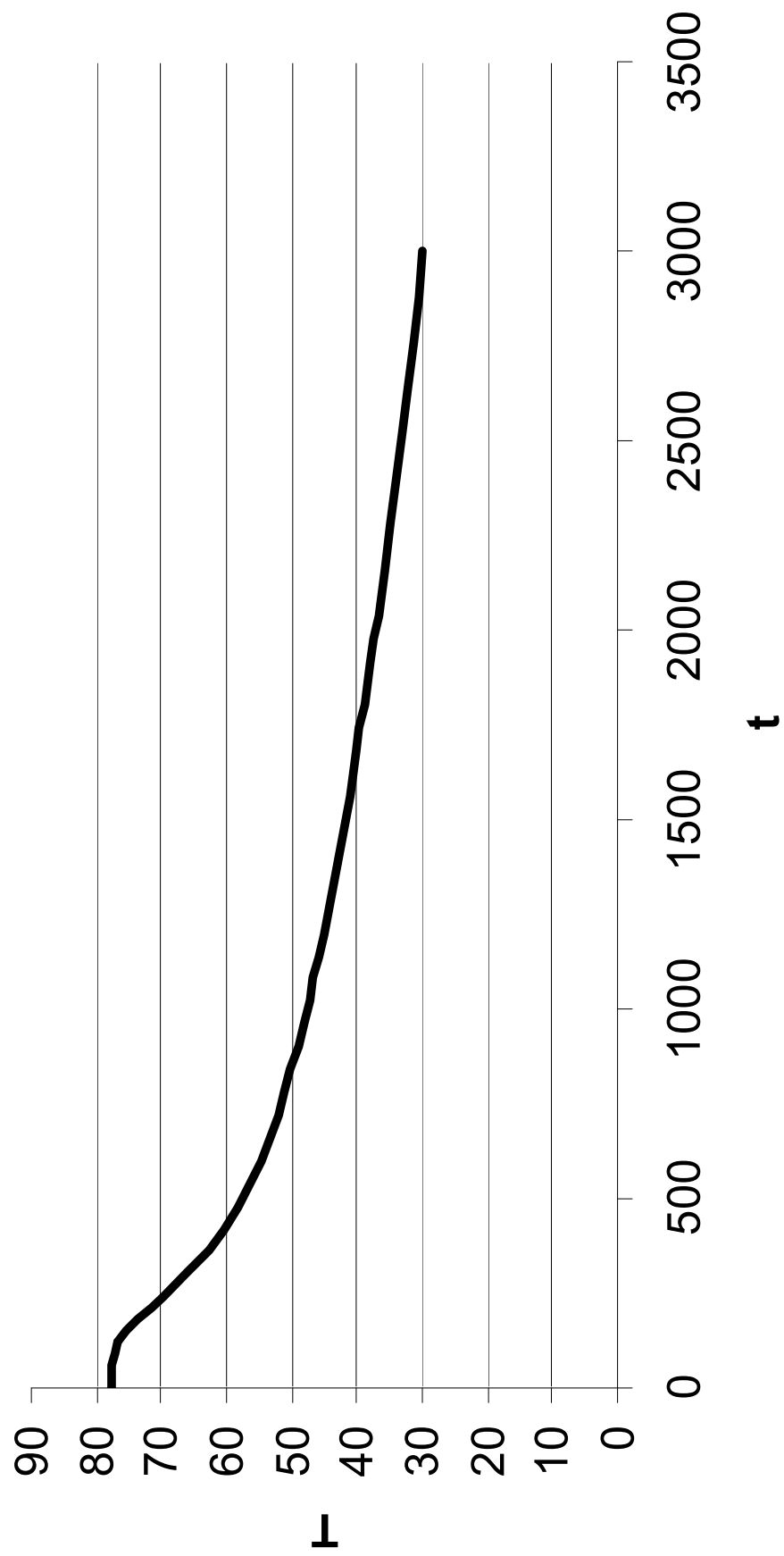
## Μέτρηση 3η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=829,17 \text{ ml/5min}$



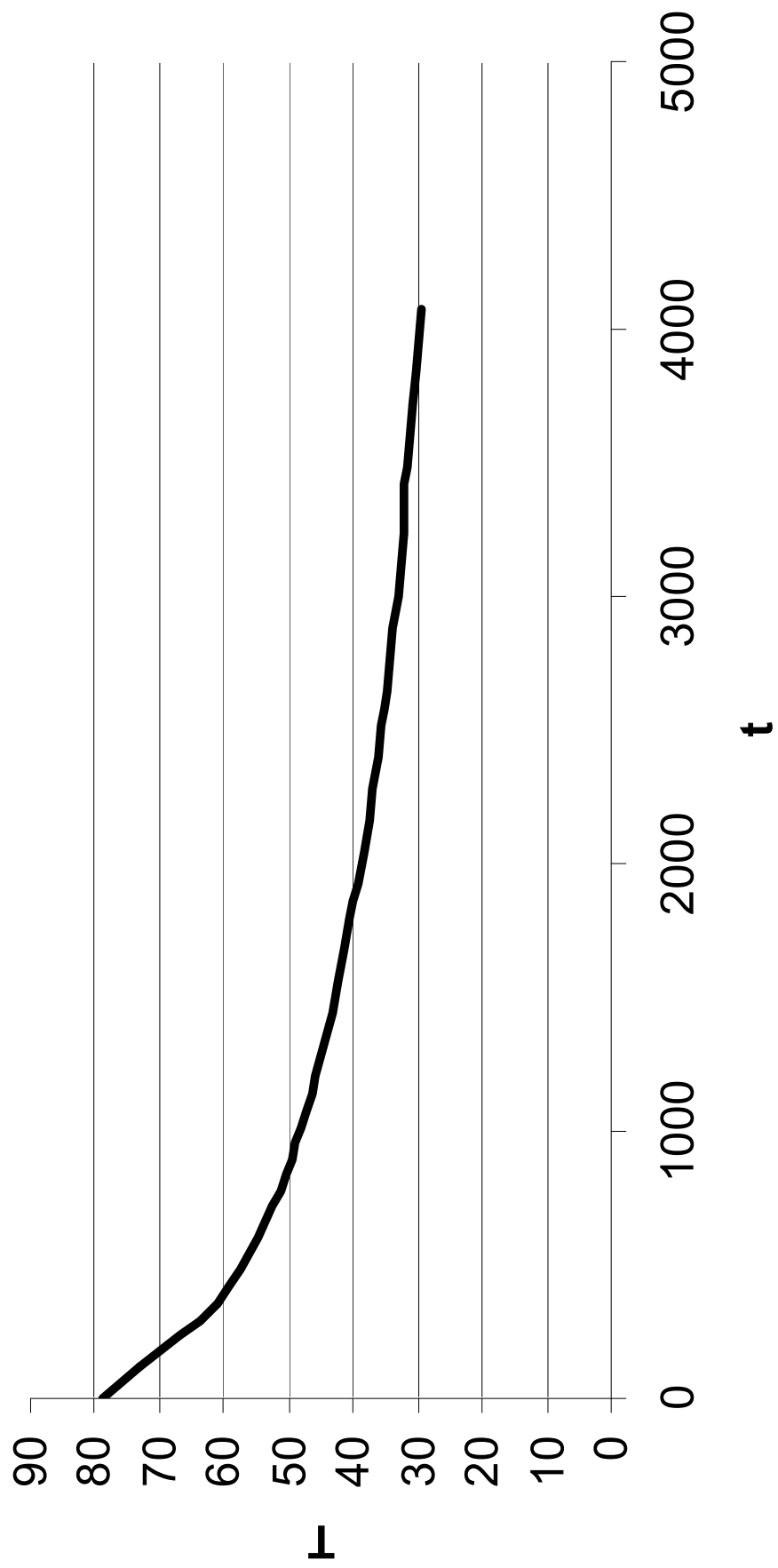
## Μέτρηση 4η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=535,42 \text{ ml/5min}$



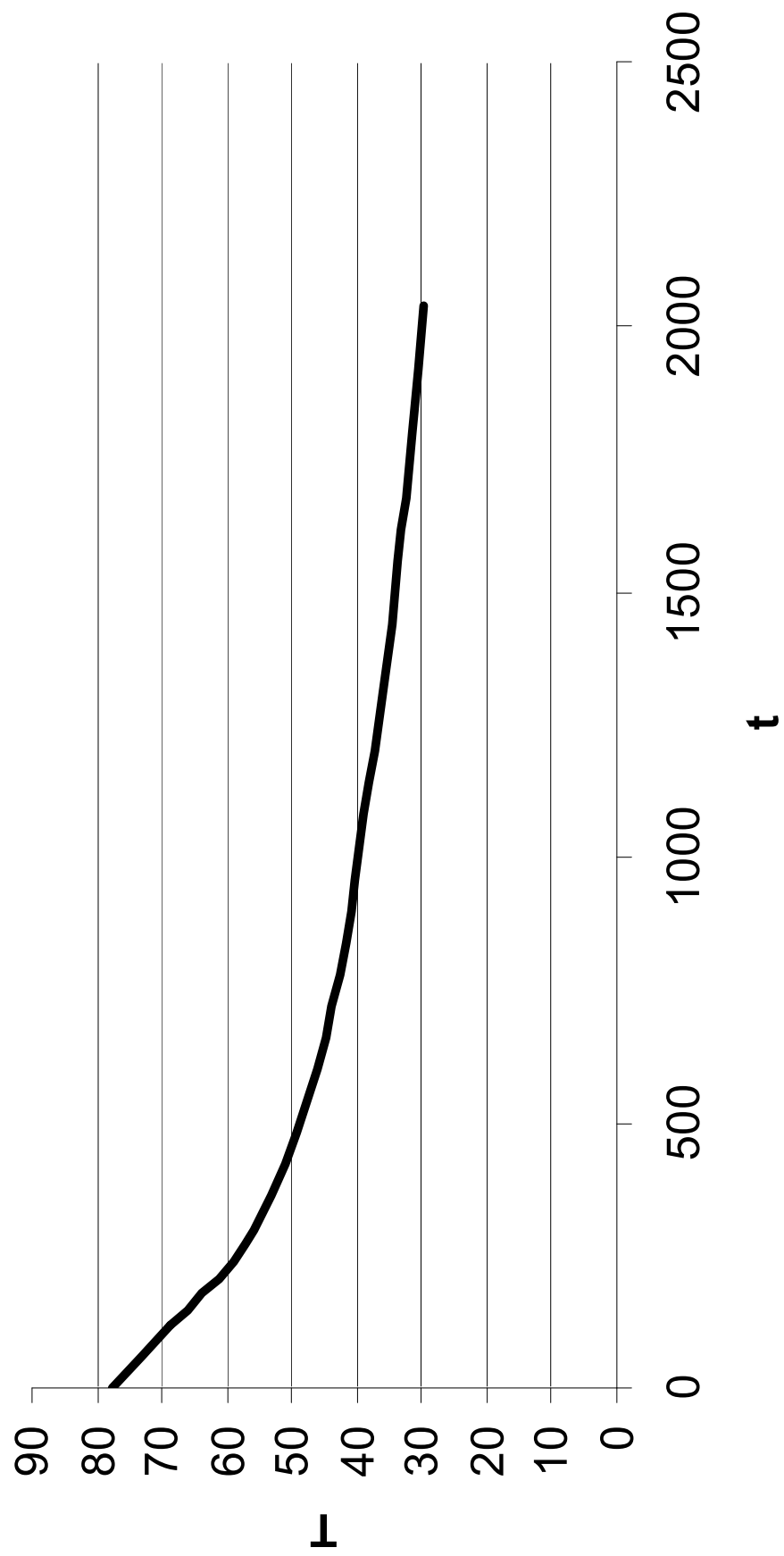
## Μέτρηση 5η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=455,90 \text{ ml/5min}$



## Μέτρηση 6η

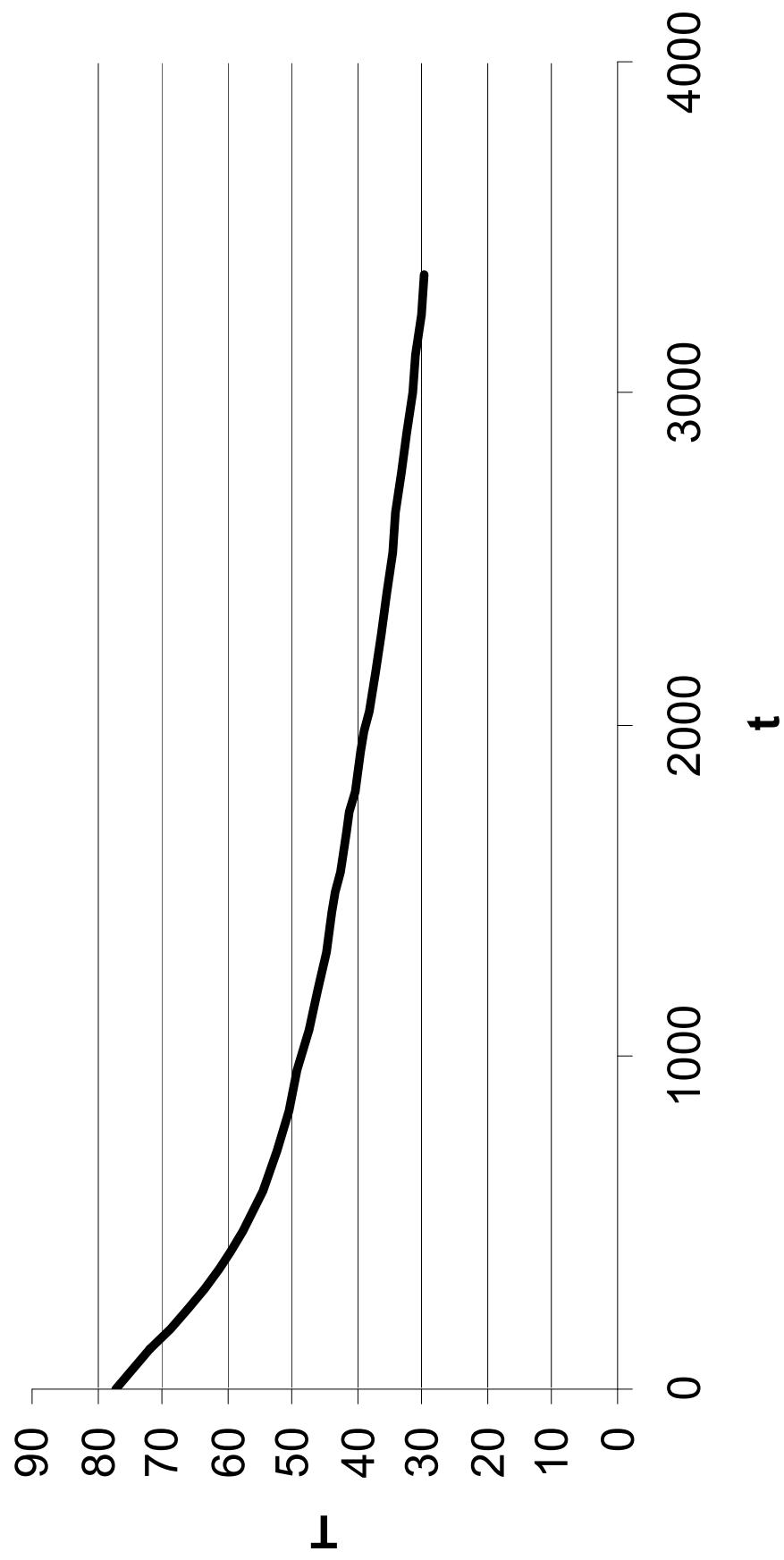
Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=814,58 \text{ ml/5min}$





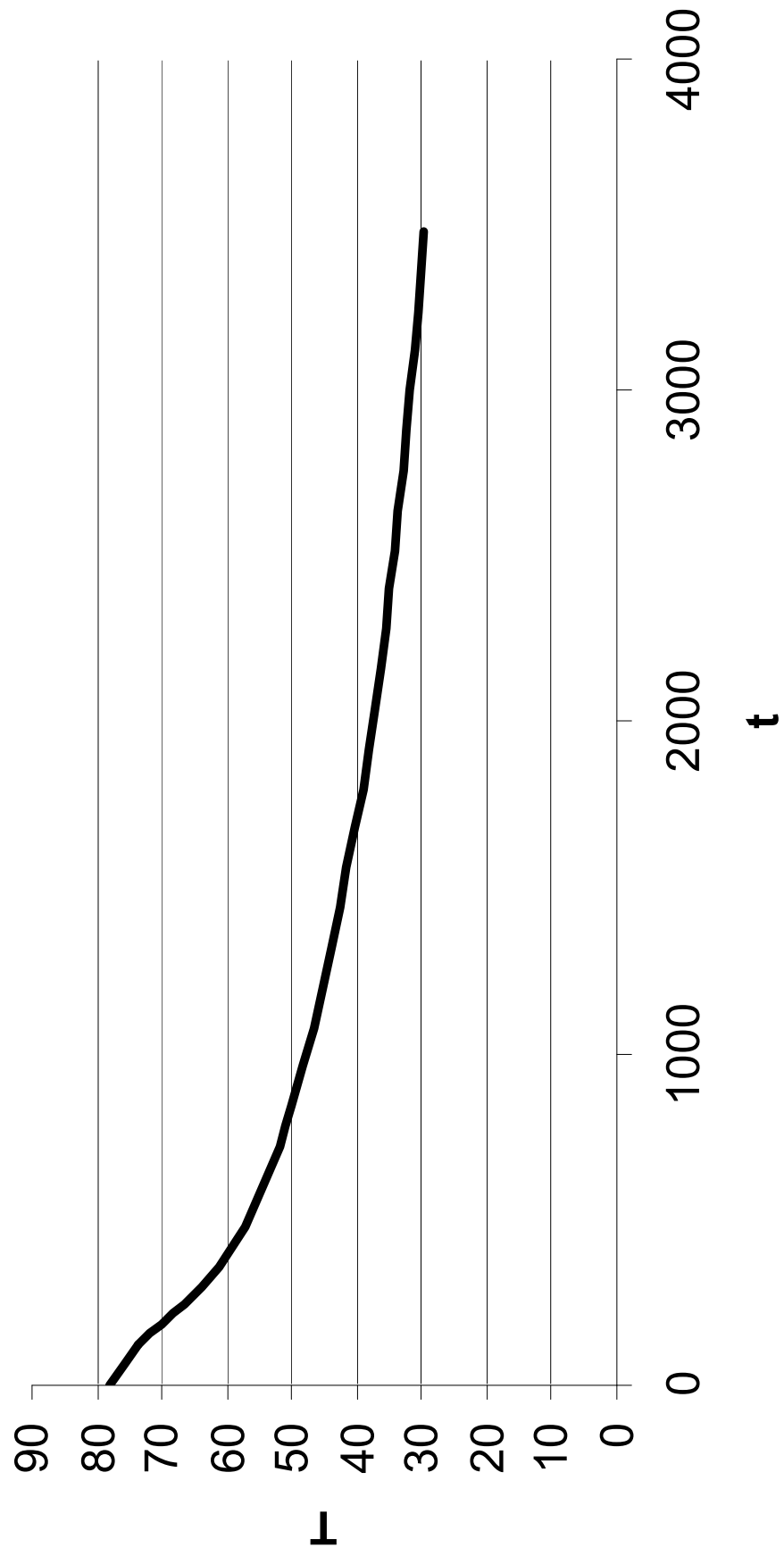
## Μέτρηση 7η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=448,33 \text{ ml/5min}$



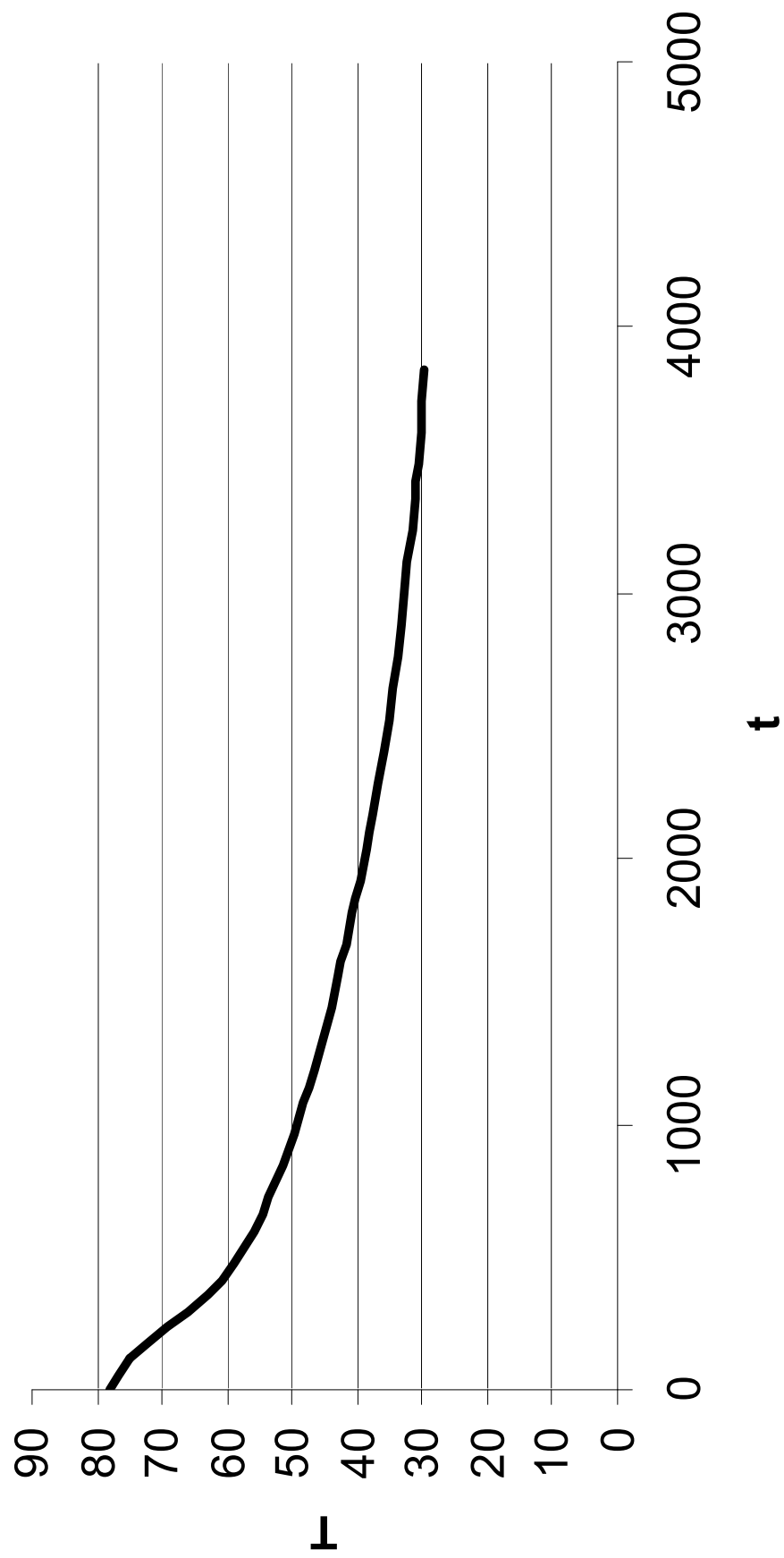
## Μέτρηση 8η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=485,42 \text{ ml/5min}$

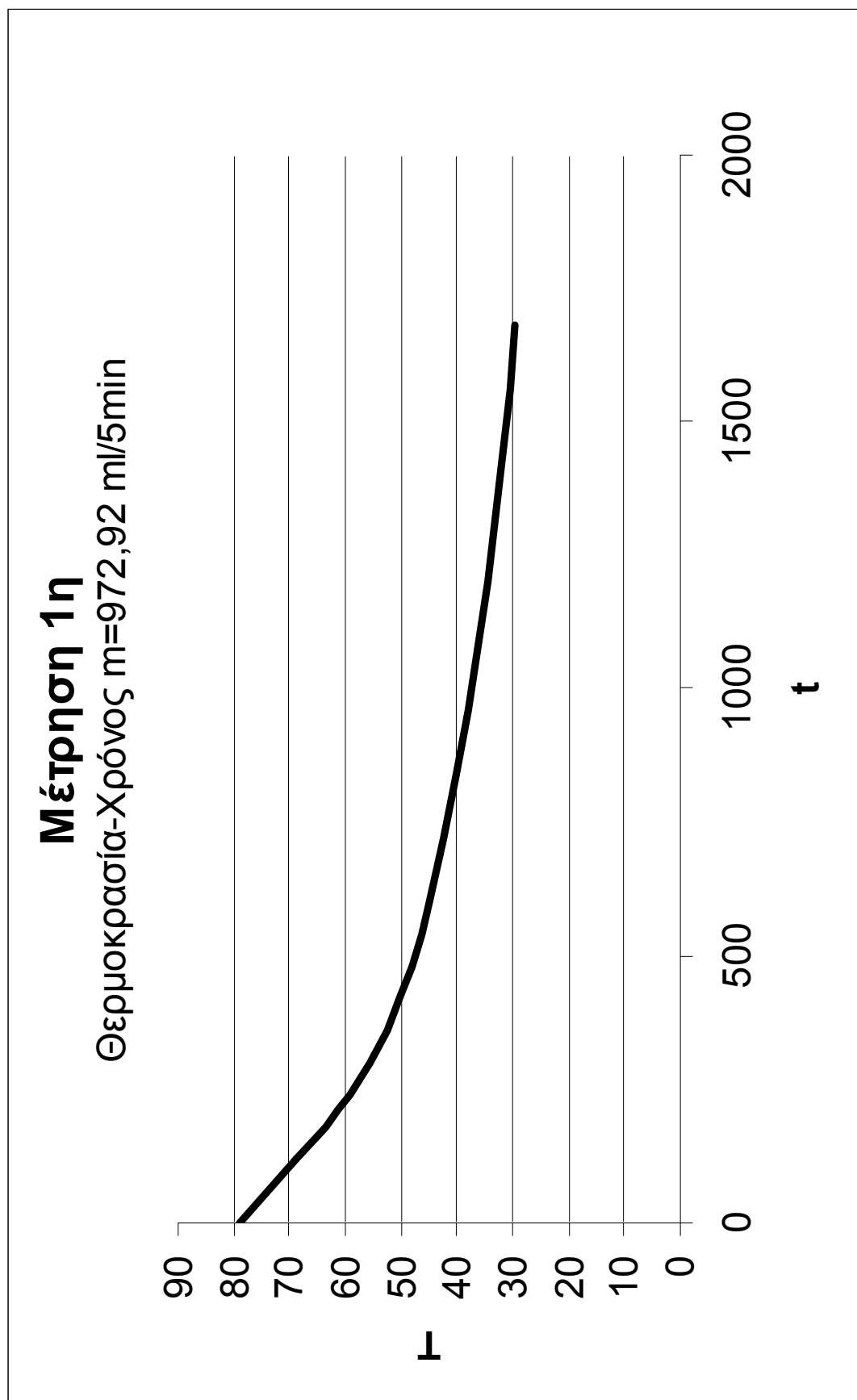


## Μέτρηση 9η

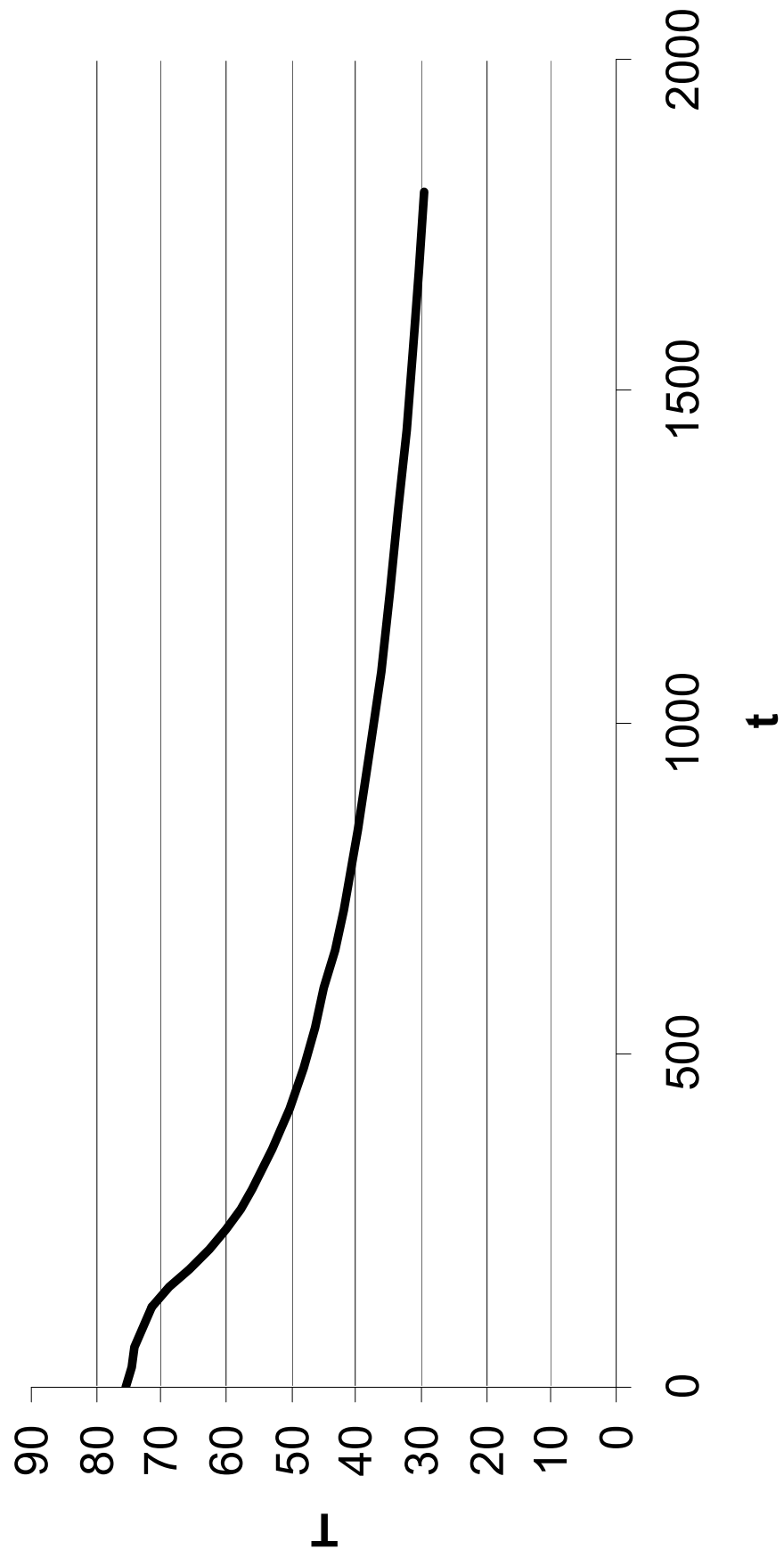
Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=450 \text{ ml/5min}$



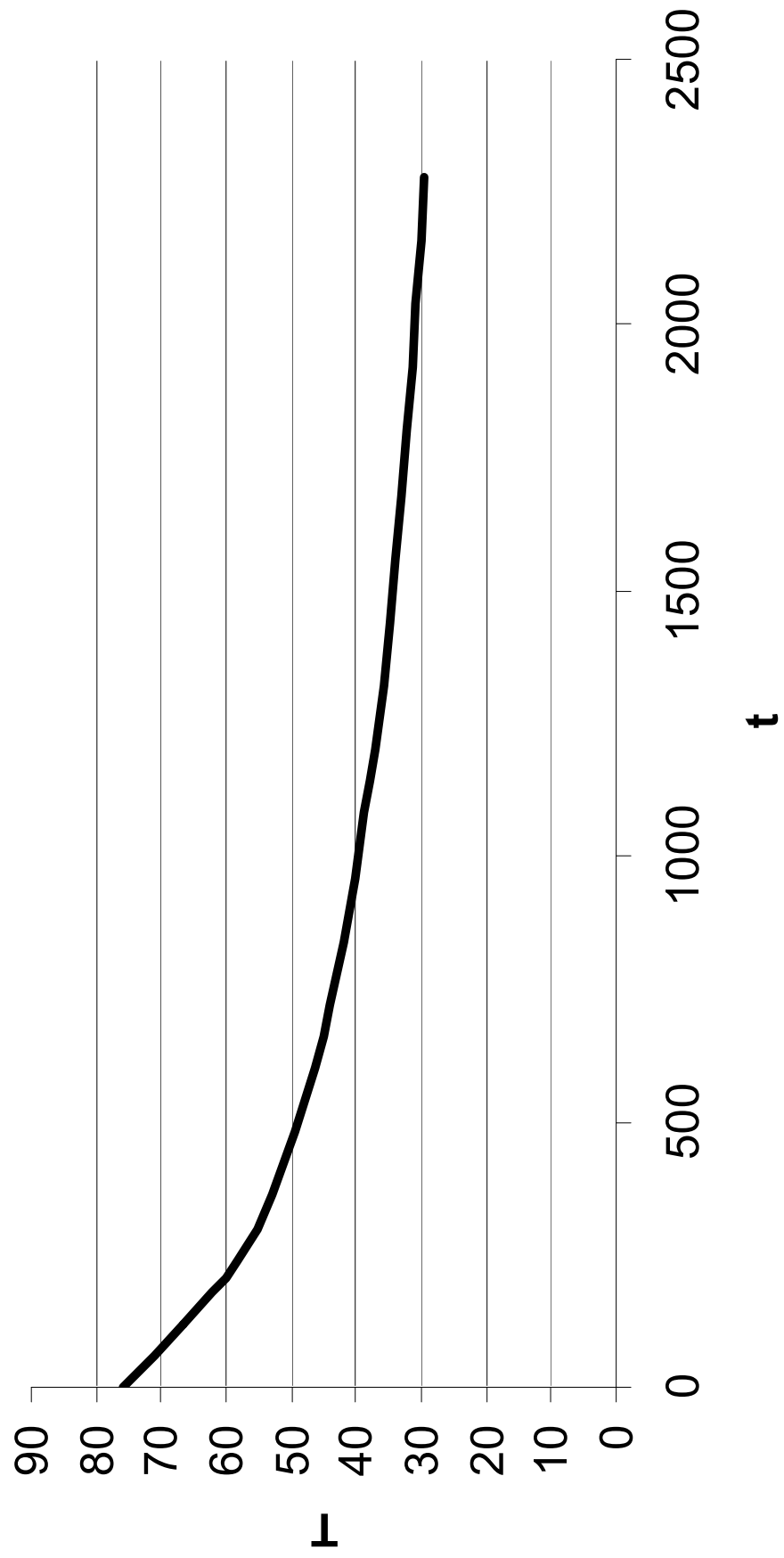
9.5.5 Δοχείο 3<sup>ο</sup> με PCM



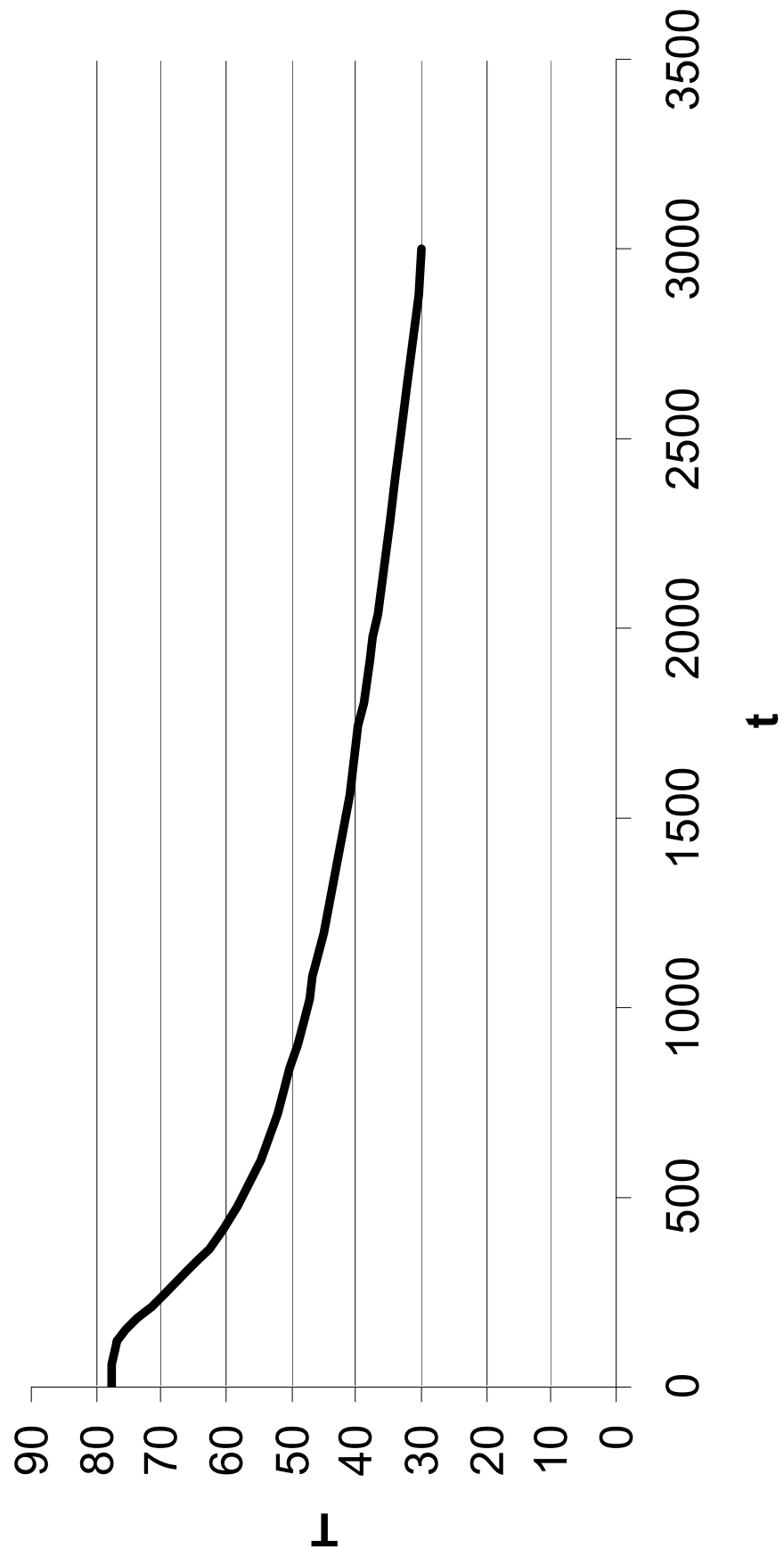
**Μέτρηση 2η**  
Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=1020,83 \text{ ml/5min}$



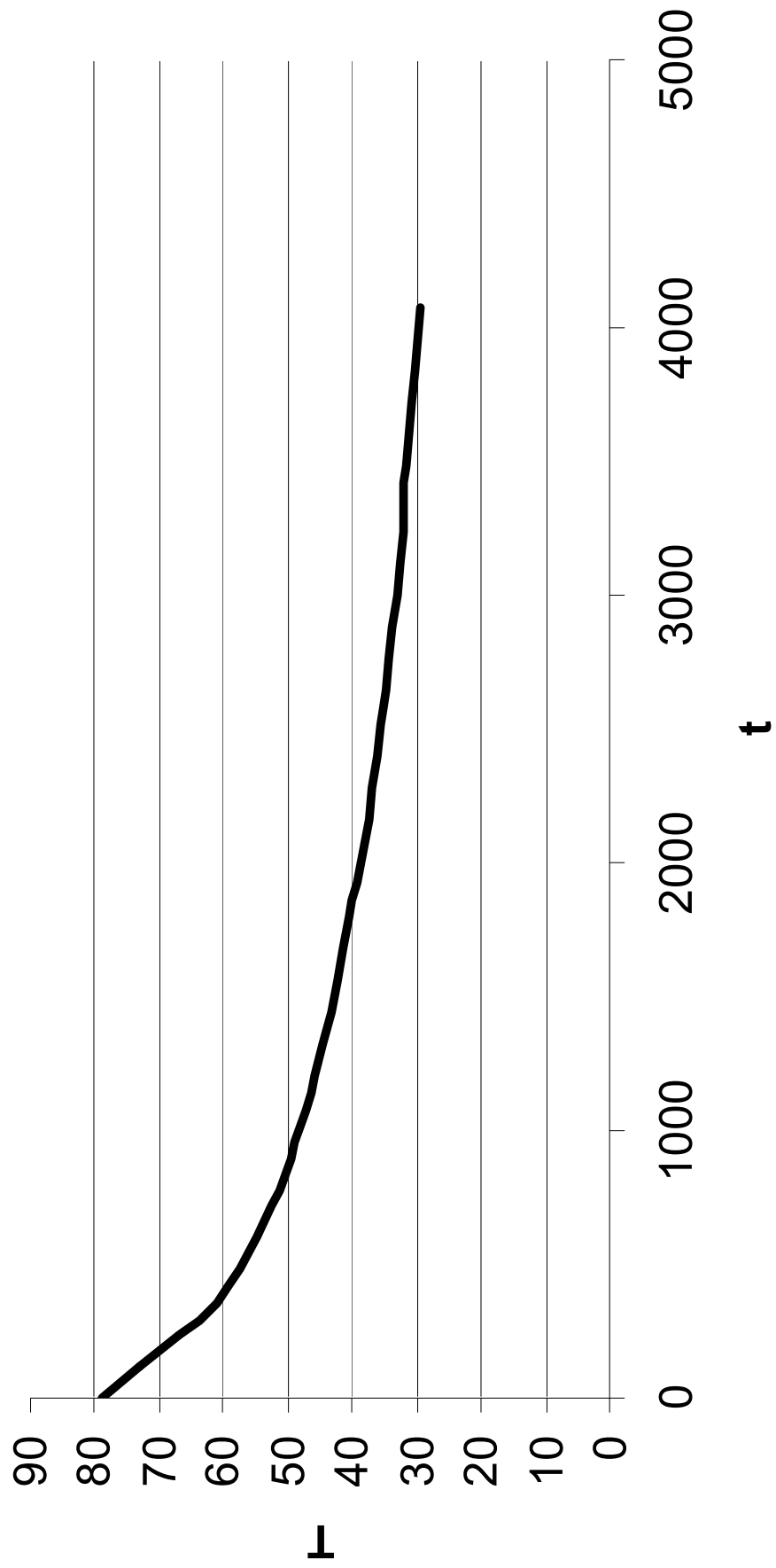
**Μέτρηση 3η**  
Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=829,17 \text{ ml/5min}$



**Μέτρηση 4η**  
Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=535,42 \text{ ml/5min}$

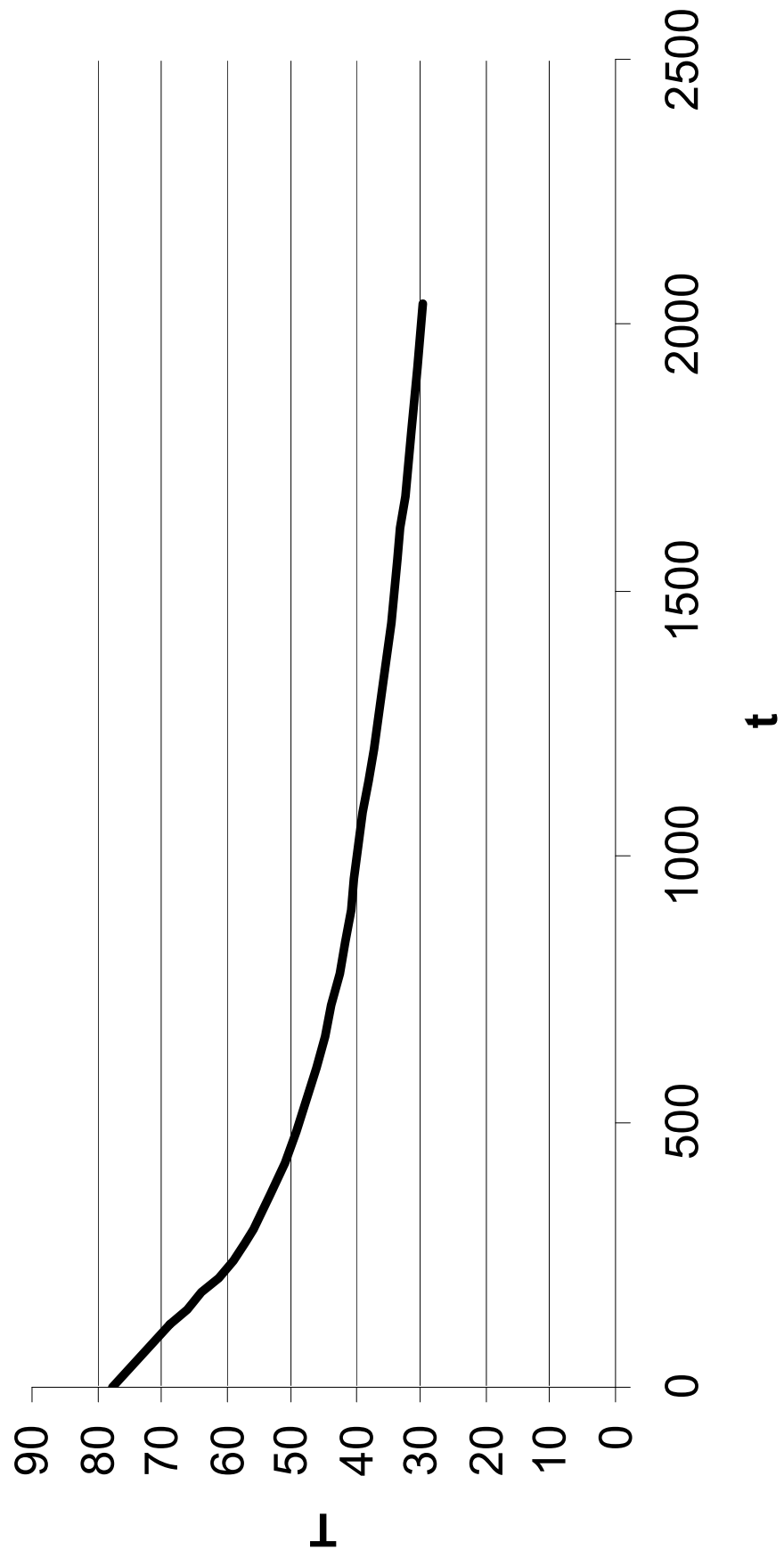


**Μέτρηση 5η**  
Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=455,90 \text{ ml/5min}$

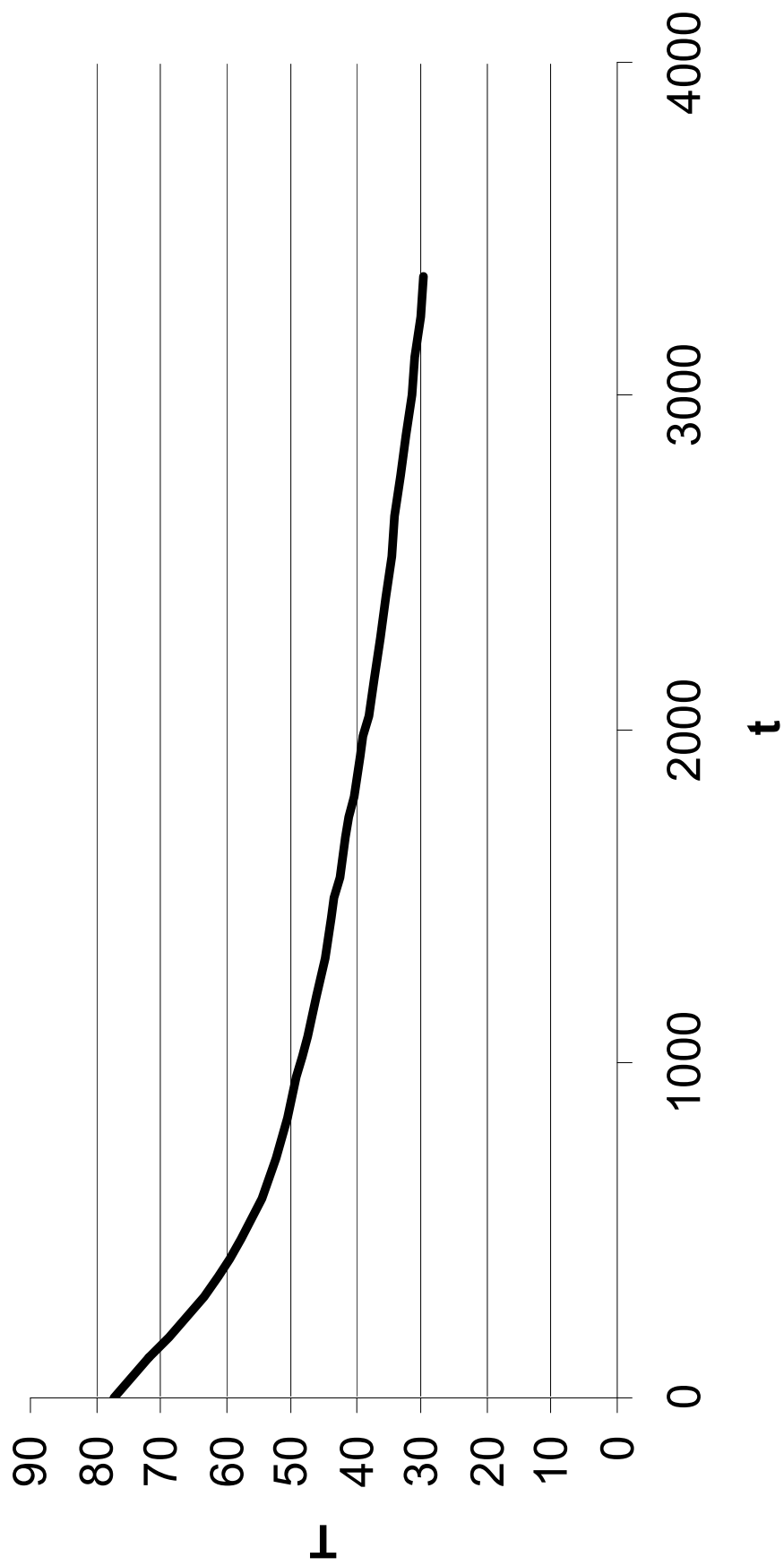




**Μέτρηση 6η**  
Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=814,58 \text{ ml/5min}$

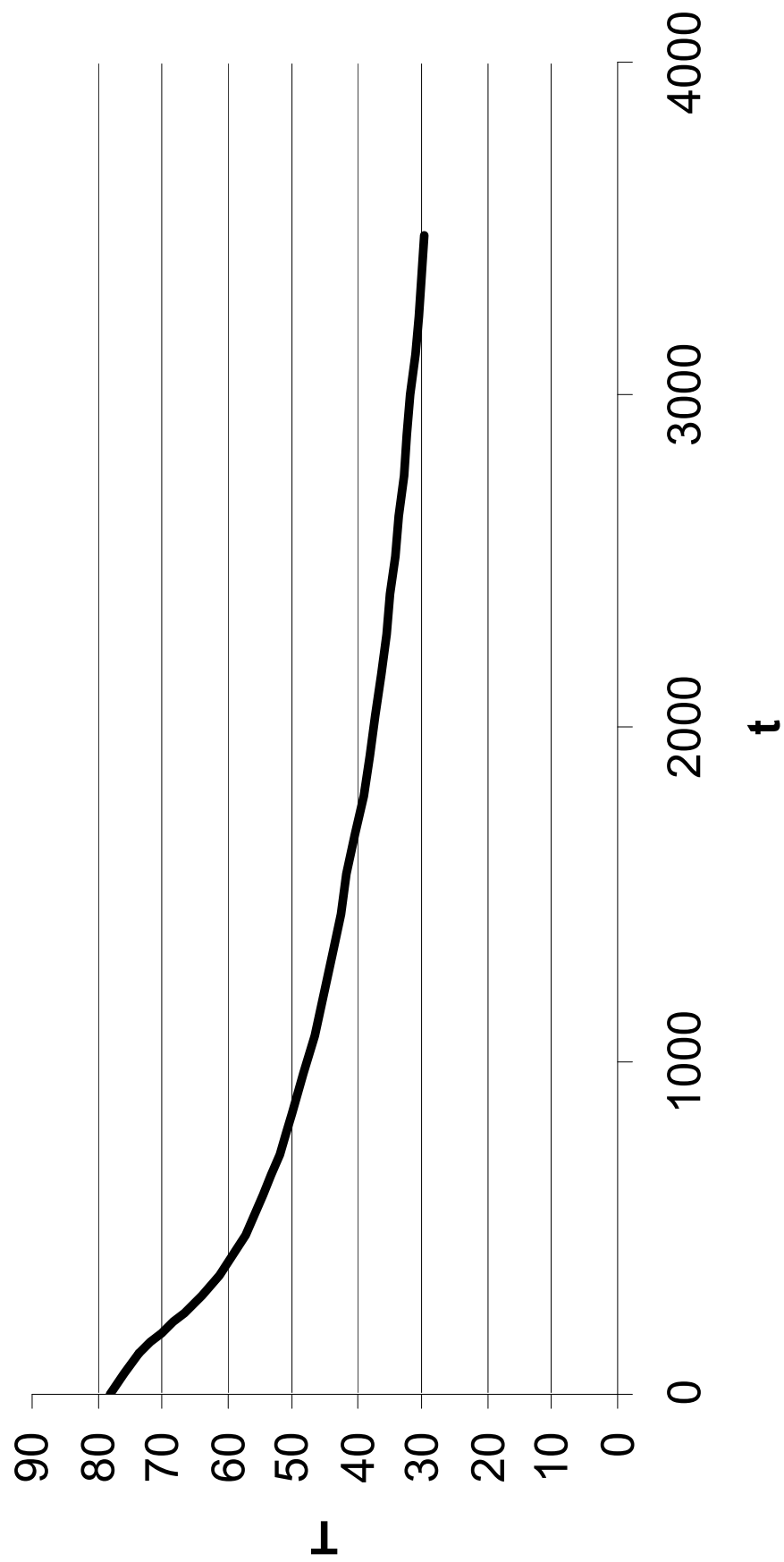


**Μέτρηση 7η**  
Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=418,33 \text{ ml/5min}$

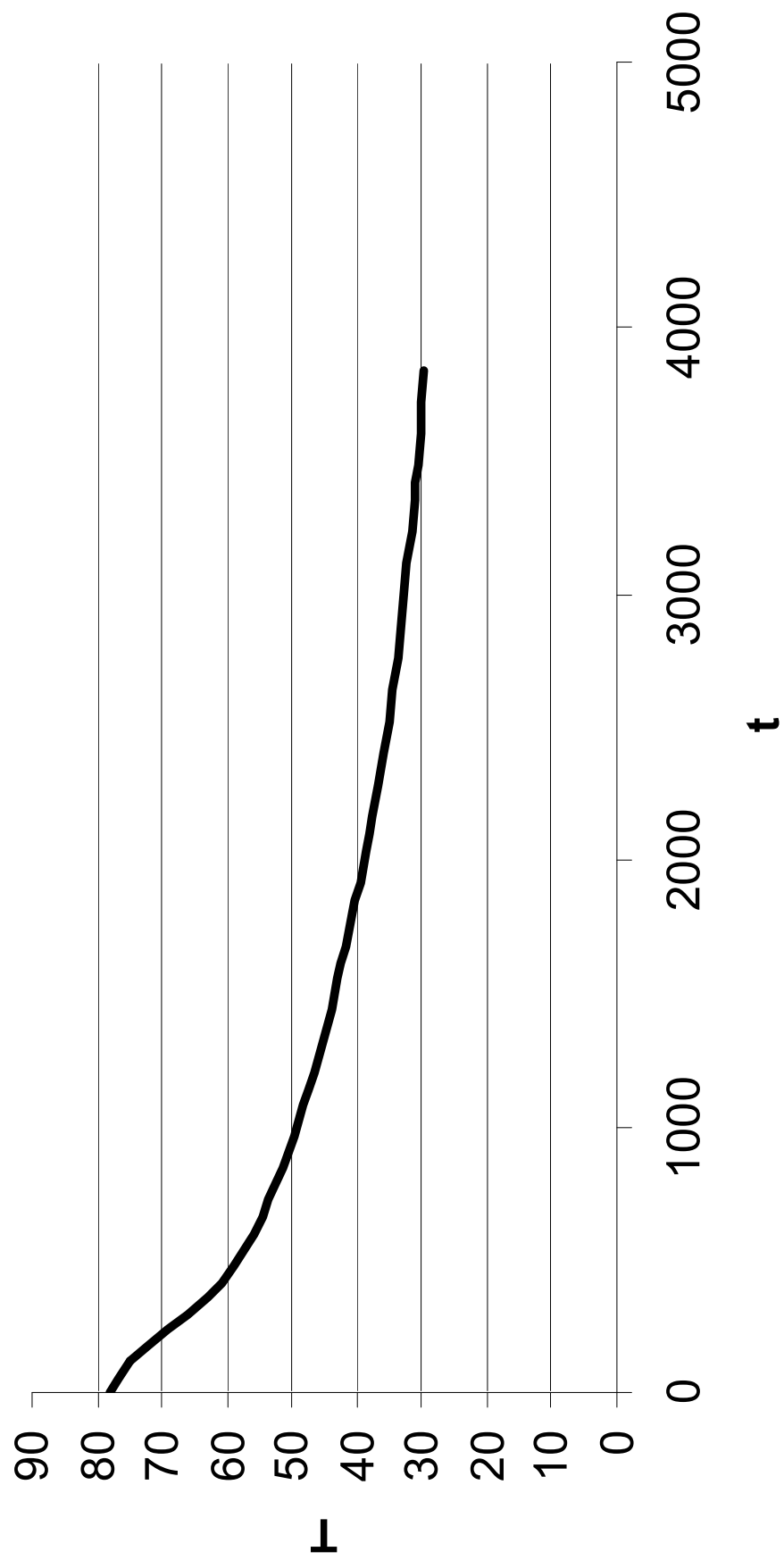


## Μέτρηση 8η

Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=485,42 \text{ ml/5min}$



**Μέτρηση 9η**  
Θερμοκρασία-Χρόνος  $m=450 \text{ ml/5min}$



## 9.6 Θεωρητική ανάλυση χρήσης δοχείου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με χρήση υλικού αλλαγής φάσης σε σχέση με δοχείο αποθήκευσης θερμού νερού

### Παράδειγμα

*Κέρδος χρήσης δοχείων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με χρήση Υλικού αλλαγής φάσης*

Πολλοί θα ήθελαν να είχαν ένα σύστημα θέρμανσης με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Για την επίτευξη όμως των επιθυμητών αποτελεσμάτων χρειάζεται πολύ μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης. Με την ενσωμάτωση ενός κατάλληλου υλικού που απελευθερώνει μεγάλα ποσά ενέργειας κατά την αλλαγή φάσης του (λανθάνουσα θερμότητα), ενός υλικού αλλαγής φάσης δηλαδή (PCM), τα συμβατικά συστήματα θα είναι κατάλληλα για πολύ περισσότερες εφαρμογές. Η κρίσιμη ερώτηση όμως είναι υπό ποιες προϋποθέσεις ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας παρέχει μεγαλύτερο πλεονέκτημα από ένα συνηθισμένο σύστημα αποθήκευσης με νερό.

*Πλεονέκτημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας*

Πολλές μονάδες αποθήκευσης όπως οι συμβατικές μονάδες αποθήκευσης θερμότητας με ζεστό νερό χρησιμοποιούν μόνο την αισθητή θερμότητα, δηλαδή την διαφορά θερμοκρασίας στο νερό. Η ικανότητα αποθήκευσης ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (107)$$

Σε ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, η ενέργεια που αποθηκεύεται υπό μορφή αισθητής θερμότητας ενισχύεται και από την λανθάνουσα θερμότητα (ενθαλπία τήξης) του υλικού αλλαγής φάσης. Αυτή η ενέργεια αποθηκεύεται όταν το υλικό τήκεται και απελευθερώνεται όταν το υλικό στερεοποιείται. Η ικανότητα αποθήκευσης προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = (m \cdot C_p \cdot \Delta T)_{water} + (m \cdot C_p \cdot \Delta T)_{PCM} + (m \cdot C_p \cdot \Delta T)_{material} + (m \cdot \Delta h_{melt})_{PCM} \quad (108)$$

Water:νερό,

PCM:Υλικό αλλαγής φάσης,

material:Υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το εκάστοτε δοχείο αποθήκευσης

Q : ποσό θερμότητας (σε kJ)

m : μάζα (σε kg)

$C_p$  : ειδική θερμοχωρητικότητα (σε kJ/kgK)

$\Delta T$  : Διαφορά θερμοκρασίας που εξετάζεται (σε K ή °C )

$\Delta h_{melt}$  : Ειδική ενθαλπία τήξης του υλικού αποθήκευσης

Όσο μικρότερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας λειτουργίας τόσο μεγαλύτερο είναι το πλεονέκτημα της αποθήκευσης με υλικό αλλαγής φάσης από ότι με θερμό νερό

Έστω αδιαβατικά μονωμένο ορειχάλκινο κυλινδρικό δοχείο με μήκος  $L=1,19m$  ακτίνα  $R=0,2m$  όγκο  $V=150lt$  και το 1% του όγκου να αποτελείτε από ορείχαλκο.

### Σταθερές

$C_p$ Νερού σε (kJ/kgK)	4,18
$C_p$ παραφίνης σε (kJ/kgK)	2,13
$C_p$ ορείχαλκου σε (kJ/kgK)	0,377
πυκνότητα ορείχαλκου $\rho$ σε (kg/m <sup>3</sup> )	8550
μέση πυκνότητα παραφίνης $\rho$ σε (kg/m <sup>3</sup> )	825
πυκνότητα Νερού $\rho$ σε (kg/m <sup>3</sup> )	1000
Λανθάνουσα θερμότητα παραφίνης $E$ σε (kJ)	172
Σημείο τήξης παραφίνης (°C)	55

Εξετάζουμε το δοχείο ως προς την ενέργεια που αποθηκεύει όταν χρησιμοποιούμε όχι μόνο θερμό νερό αλλά και παραφίνη(RT55 Rubitherm) για την αποθήκευση ενέργειας.

Θεωρούμαι:

- Το δοχείο είναι αδιαβατικά μονωμένο κατά τη αποφόρτιση του
- Το  $C_p$  και η πυκνότητα του νερού και του ορείχαλκου παραμένουν σχεδόν σταθερά για τις θερμοκρασίες που εξετάζουμε
- Χρησιμοποιούμε μία μέση τιμή για την πυκνότητα και το  $C_p$  της παραφίνης

Παραφίνη	Όγκος (lt)	Μάζα (kg)	Νερό	Όγκος (lt)	Μάζα (kg)
10%	15	12,375	89%	133,5	133,5
20%	30	24,75	79%	118,5	118,5
30%	45	37,125	69%	103,5	103,5
40%	60	49,5	59%	88,5	88,5
50%	75	61,875	49%	73,5	73,5
60%	90	74,25	39%	58,5	58,5
70%	105	86,625	29%	43,5	43,5
80%	120	99	19%	28,5	28,5
90%	135	111,375	9%	13,5	13,5
95%	142,5	117,5625	4%	6	6
0%	0	0	99%	148,5	148,5

Χρησιμοποιώντας την σχέση

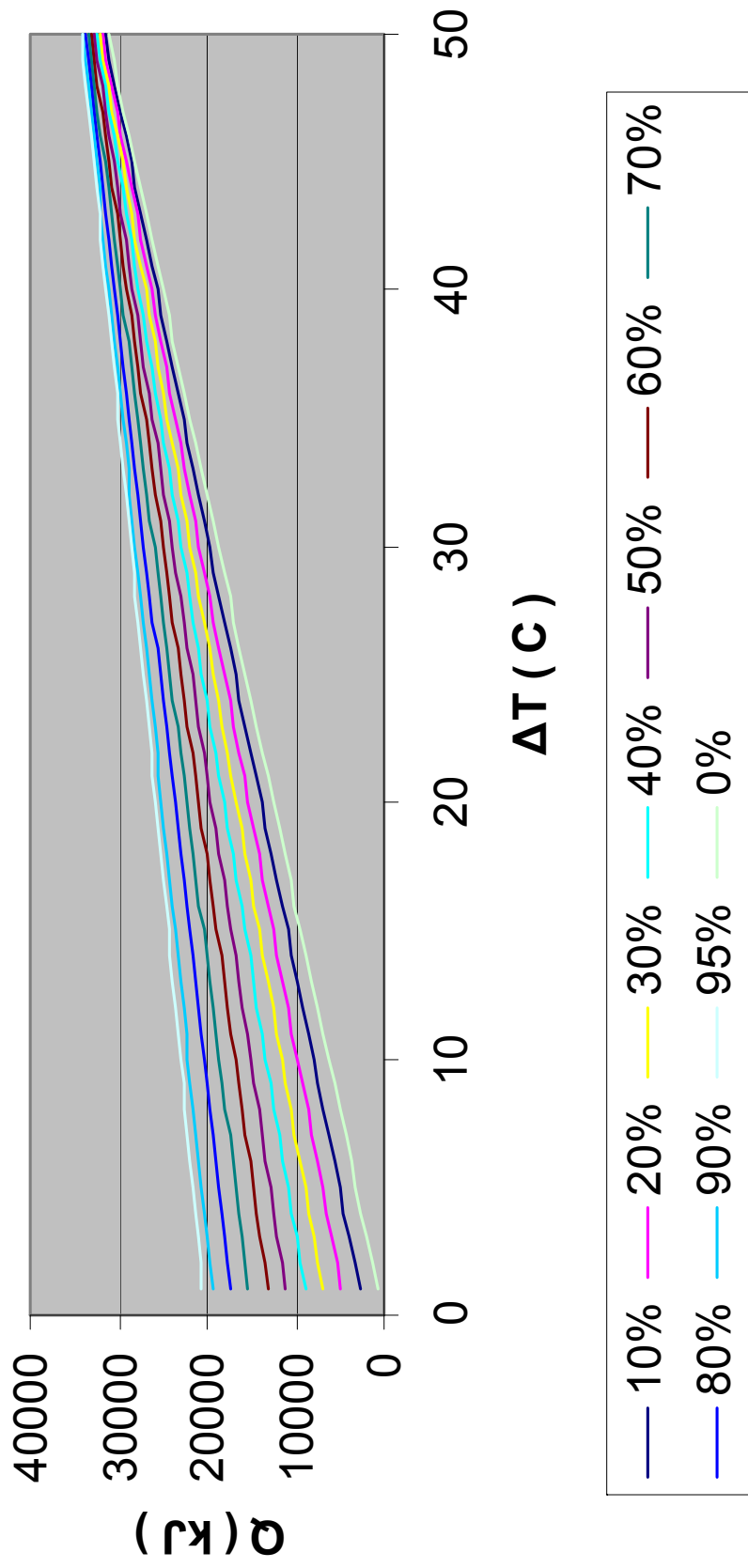
$$Q = (m \cdot C_p \cdot \Delta T)_{water} + (m \cdot C_p \cdot \Delta T)_{PCM} + (m \cdot C_p \cdot \Delta T)_{material} + (m \cdot \Delta h_{melt})_{PCM}$$

για  $\Delta T$  από 1 °C -55 °C και παίρνοντας την αναλογία της αποθηκευμένης ενέργειας του δοχείου με παραφίνη προς την αποθηκευμένη ενέργεια του δοχείου μόνο με νερό ( $Q_{pcm}/Q_{water}$ ) και αντίστροφα ( $Q_{water}/Q_{pcm}$ ) κατασκευάζουμε τα παρακάτω διαγράμματα.

### **Συμπεράσματα Παραδείγματος**

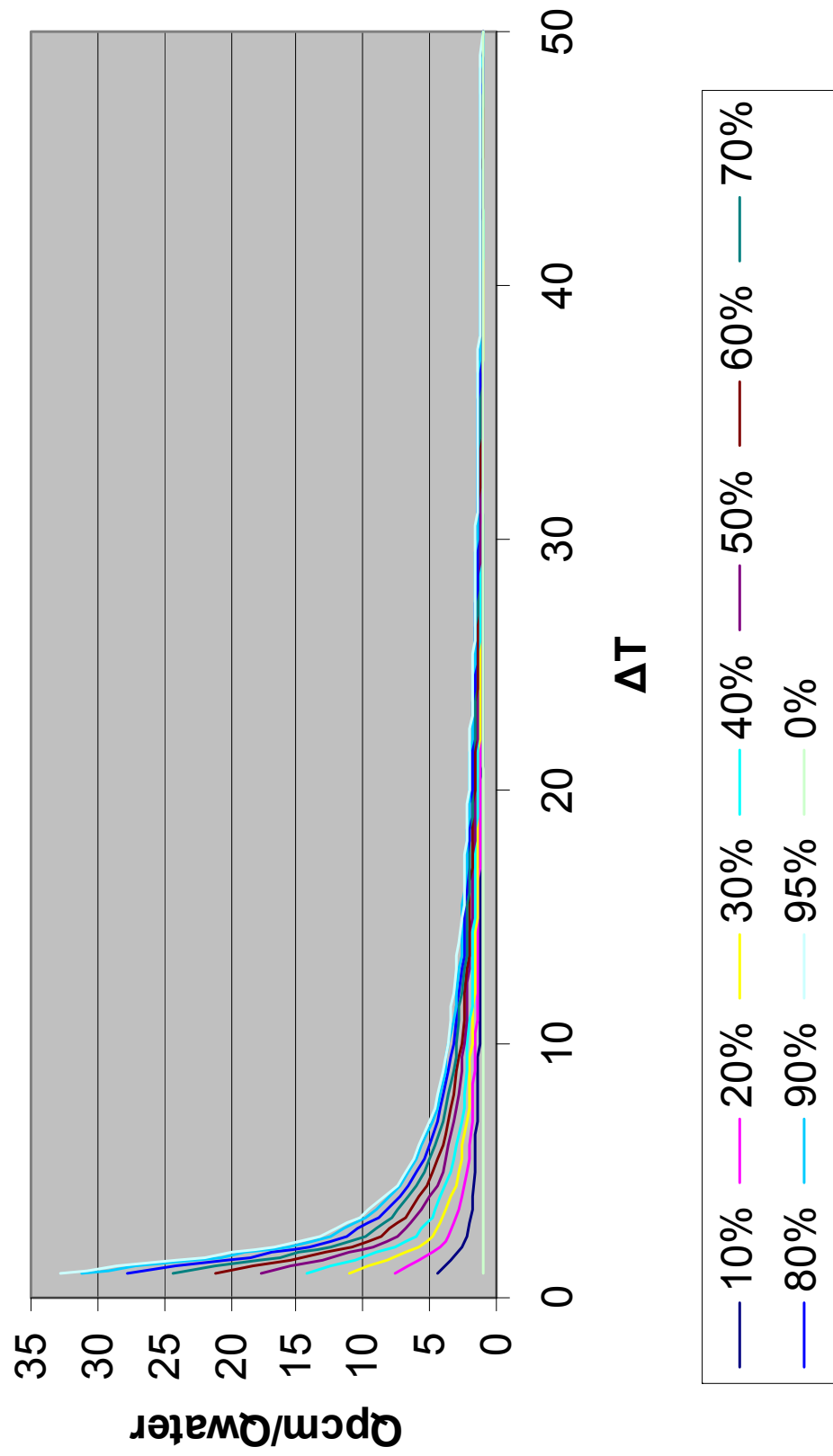
Από τα διαγράμματα παρακάτω φαίνεται πως η χρήση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με λανθάνουσα θερμότητα κάνοντας χρήση παραφίνης είναι ανώτερη από την χρήση συστημάτων θερμού νερού μόνο όταν τουλάχιστον το 50% του όγκου του δοχείου αποθήκευσης αποτελείται από παραφίνη και μόνο όταν η διαφορά θερμοκρασίας λειτουργίας είναι το πολύ  $\Delta T=15-20$  °C

Αδιαβατικά μονωμένο δοχείο Παραφίνης-νερού  
Διάγραμμα  
Ενέργειας-Θερμοκρασίας λειτουργίας  
(ως προς το ποσοστό όγκου της παραφίνης)

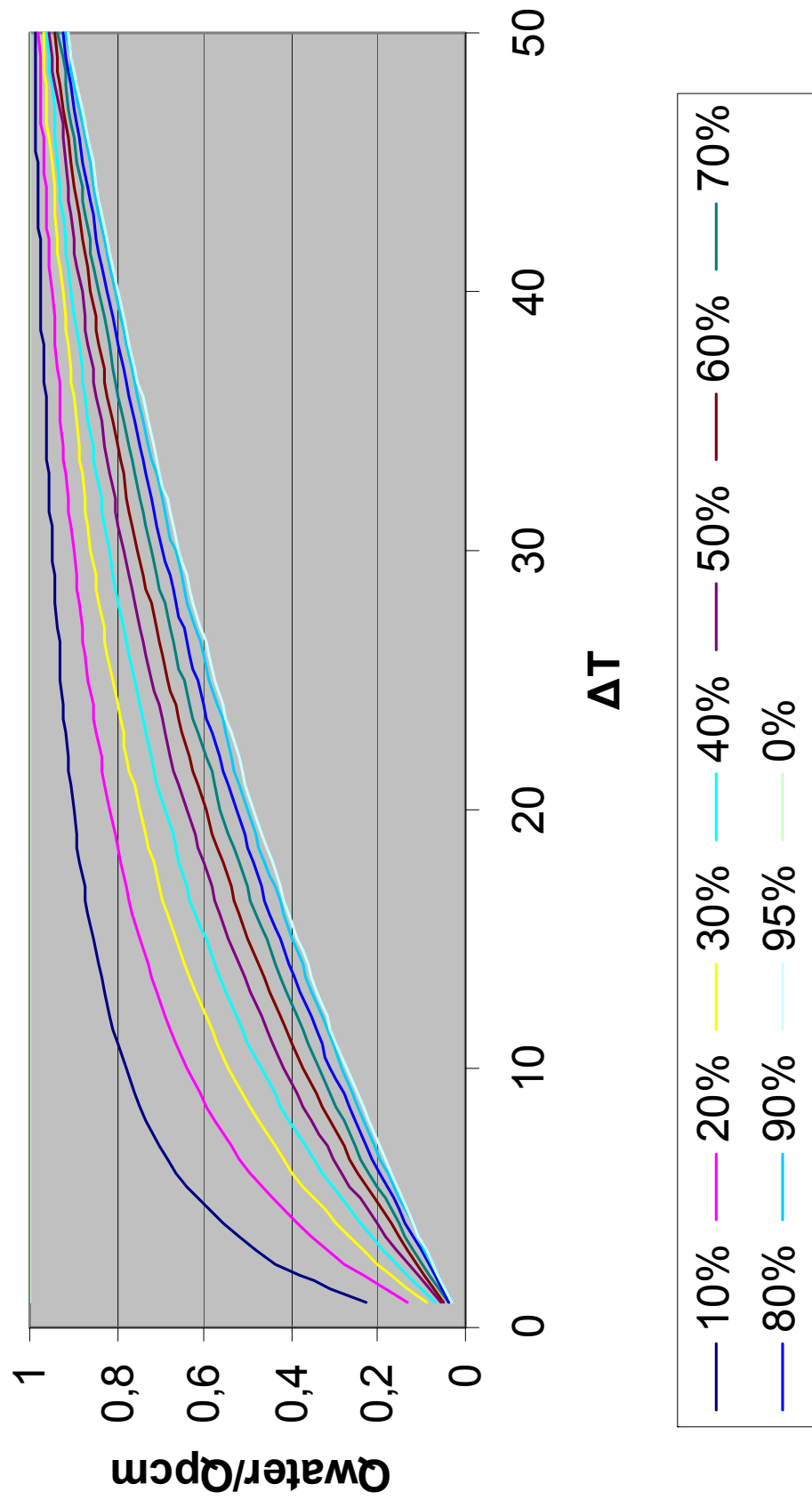




Αναλογία Ενέργειας  $Q_{pcm}/Q_{water}$   
(ως προς το ποσοστό όγκου της παραφίνης)



Αναλογίες Ενέργειας  $Q_{water}/Q_{pcm}$   
(ως προς το ποσοστό όγκου της παραφίνης)



## **9.7 Συγκριτικά διαγράμματα πειράματος**

Παρακάτω παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα **Θερμοκρασίας εξόδου από την διάταξη (T) – Χρόνου αποφόρτισης του δοχείου (t)**, μεταξύ των πειραματικών δοχείων όταν περιέχουν PCM και όταν περιέχουν νερό μέσα από τις πειραματικές μετρήσεις, συγκρίνοντας κάθε φορά τα δοχεία, με την ίδια παροχή και τις ίδιες διαστάσεις.

Ακόμη παρατίθενται τα θεωρητικά συγκριτικά διαγράμματα **Αποθηκευμένης θερμότητας(Q) - Εύρους θερμοκρασίας λειτουργίας(ΔT)** μεταξύ των πειραματικών δοχείων όταν περιέχουν PCM και όταν περιέχουν νερό συγκρίνοντας κάθε φορά δοχεία ίδιων διαστάσεων κάνοντας χρήση της σχέσης (Εξ.108) και θεωρώντας ότι :

- Έχει τηχθεί όλη η παραφίνη
- Το  $C_p$  του νερού παραμένει σταθερό παίρνοντας την μέση τιμή του από τους  $30^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C}$
- Το  $C_p$  της παραφίνης παραμένει σταθερή παίρνοντας την μέση τιμή του από τους  $30^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C}$
- Η πυκνότητα του νερού είναι  $1000 \text{ kg/m}^3$
- Η μέση πυκνότητα της παραφίνης είναι  $825 \text{ kg/m}^3$
- Τα δοχεία με PCM περιέχουν 10% παραφίνη κατ' όγκο

Τέλος δίδονται τα συγκριτικά θεωρητικά διαγράμματα **Αποθηκευμένης ενέργειας δοχείου με PCM προς αποθηκευμένης ενέργειας δοχείου με νερό ( $Q_{pcm}/Q_{water}$ ) - Εύρους θερμοκρασίας λειτουργίας (ΔT)** και τα διαγράμματα **Αποθηκευμένης ενέργειας δοχείου με νερό προς αποθηκευμένης ενέργειας δοχείου με PCM ( $Q_{water}/Q_{pcm}$ ) – Εύρους θερμοκρασίας λειτουργίας (ΔT)**, συγκρίνοντας δοχεία ίδιων διαστάσεων και υπολογίζοντας την ενέργειας από την σχέση (Εξ.108) με της παραπάνω θεωρήσεις.

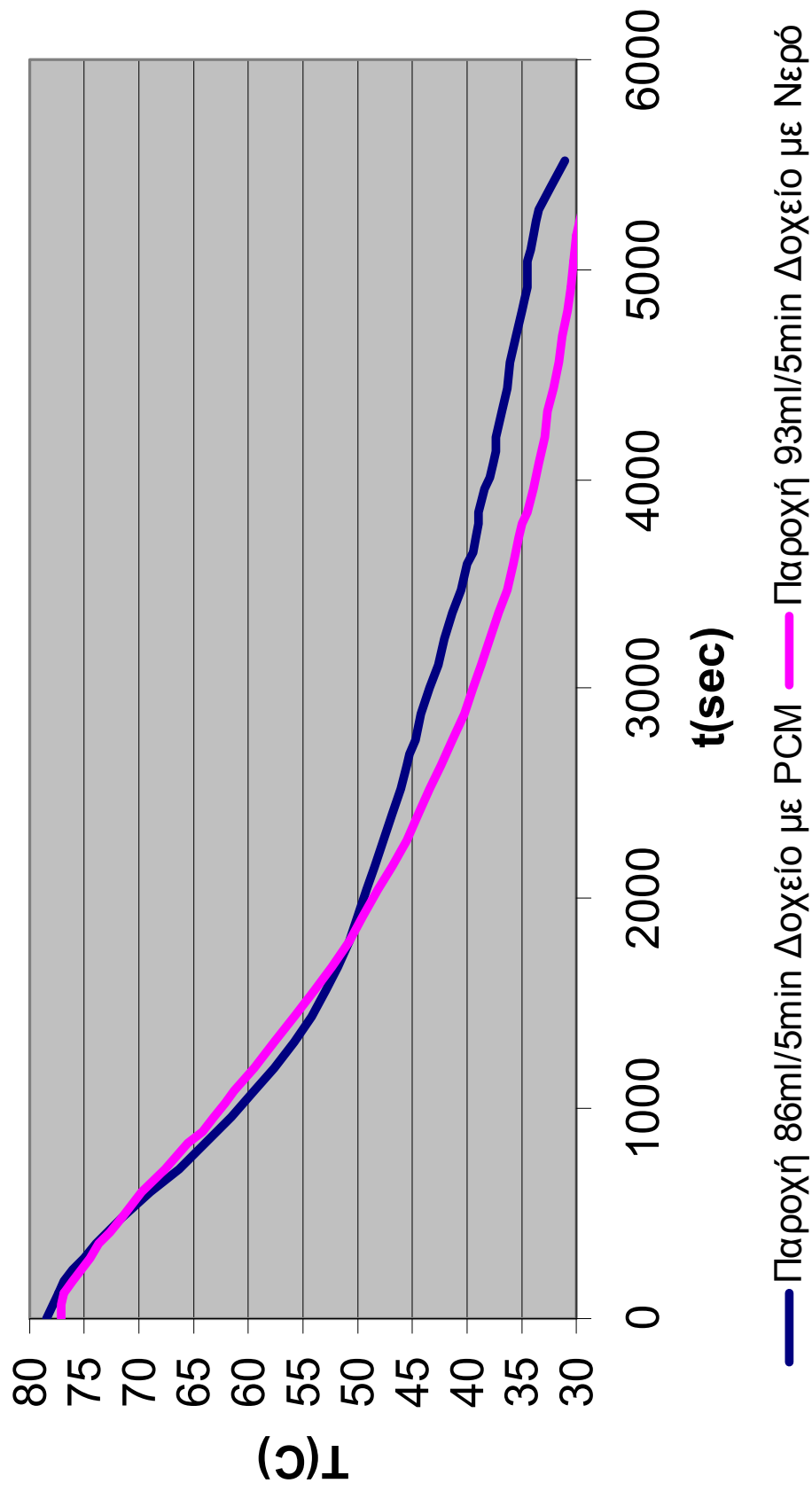
9.7.1 Πίνακες εύρεσης συγκριτικών διαγραμμάτων

<b>Πίνακας 16: Συγκριτικά διαγράμματα Θερμοκρασίας-Χρόνου αποφόρτισης (T-t) μεταξύ δοχείου με PCM και δοχείου χωρίς PCM</b>			
<b><u>Δοχείο 1<sup>ο</sup></u></b> H <sub>1</sub> =150mm	<b>Παροχή (ml/5min)</b>		<b>Σελίδα εύρεσης διαγράμματος</b>
	Με PCM	Χωρίς PCM	
	86	93	Σελ 197
	257	244	Σελ 198
	342	328	Σελ 199
	126	150	Σελ 200
<b><u>Δοχείο 2<sup>ο</sup></u></b> H <sub>2</sub> =300mm	<b>Παροχή (ml/5min)</b>		<b>Σελίδα εύρεσης διαγράμματος</b>
	Με PCM	Χωρίς PCM	
	220	224	Σελ 201
	335	325	Σελ 202
	367	369	Σελ 203
	408	438	Σελ 204
<b><u>Δοχείο 3<sup>ο</sup></u></b> H <sub>3</sub> =450mm	<b>Παροχή (ml/5min)</b>		<b>Σελίδα εύρεσης διαγράμματος</b>
	Με PCM	Χωρίς PCM	
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-

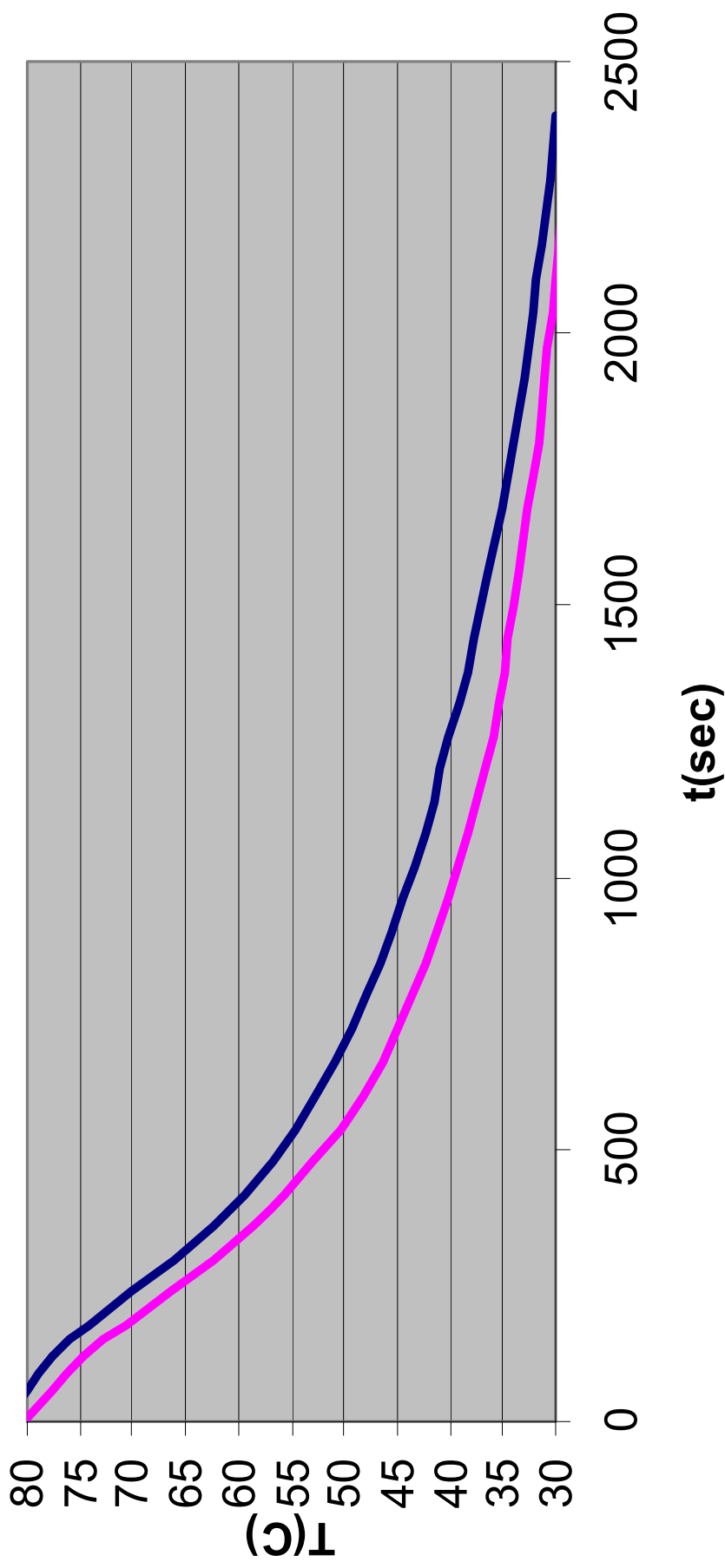
<b>Πίνακας 17: Θεωρητικά Συγκριτικά διαγράμματα με βάση τις διαστάσεις και τα σταθερά στοιχεία των δοχείων που κατασκευάστηκαν</b>		
<b><u>Δοχείο 1<sup>ο</sup></u></b> H <sub>1</sub> =150mm	<b>Τύπος Διαγράμματος</b>	<b>Σελίδα εύρεσης Διαγράμματος</b>
	$Q - \Delta T$	Σελ 205
	$\frac{Q_{PCM}}{Q_{water}} - \Delta T$	Σελ 208
	$\frac{Q_{water}}{Q_{PCM}} - \Delta T$	Σελ 211
<b><u>Δοχείο 2<sup>ο</sup></u></b> H <sub>1</sub> =300mm	<b>Τύπος Διαγράμματος</b>	<b>Σελίδα εύρεσης Διαγράμματος</b>
	$Q - \Delta T$	Σελ 206
	$\frac{Q_{PCM}}{Q_{water}} - \Delta T$	Σελ 209
	$\frac{Q_{water}}{Q_{PCM}} - \Delta T$	Σελ 212
<b><u>Δοχείο 3<sup>ο</sup></u></b> H <sub>1</sub> =450mm	<b>Τύπος Διαγράμματος</b>	<b>Σελίδα εύρεσης Διαγράμματος</b>
	$Q - \Delta T$	Σελ 207

<i>Δοχείο 3<sup>ο</sup></i> H <sub>1</sub> =450mm	$\frac{Q_{PCM}}{Q_{water}} - \Delta T$	Σελ 210
	$\frac{Q_{water}}{Q_{PCM}} - \Delta T$	Σελ 213

### Σύγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 1ο H<sub>1</sub>=150mm Δοχείο με PCM-Δοχείο με Νερό

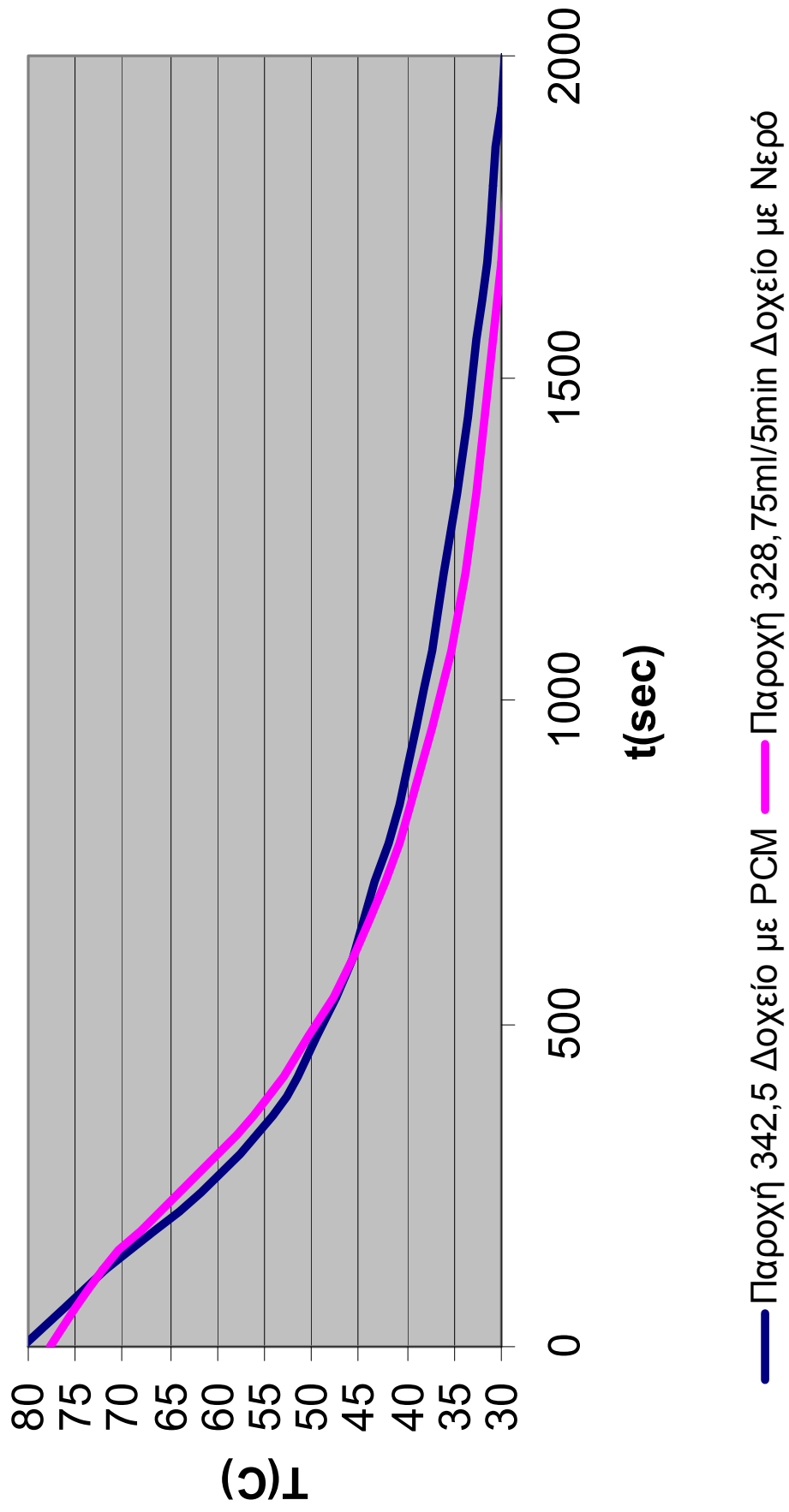


**Σύγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 1ο H<sub>1</sub>=150mm  
Δοχείο με PCM-Δοχείο με Νερό**



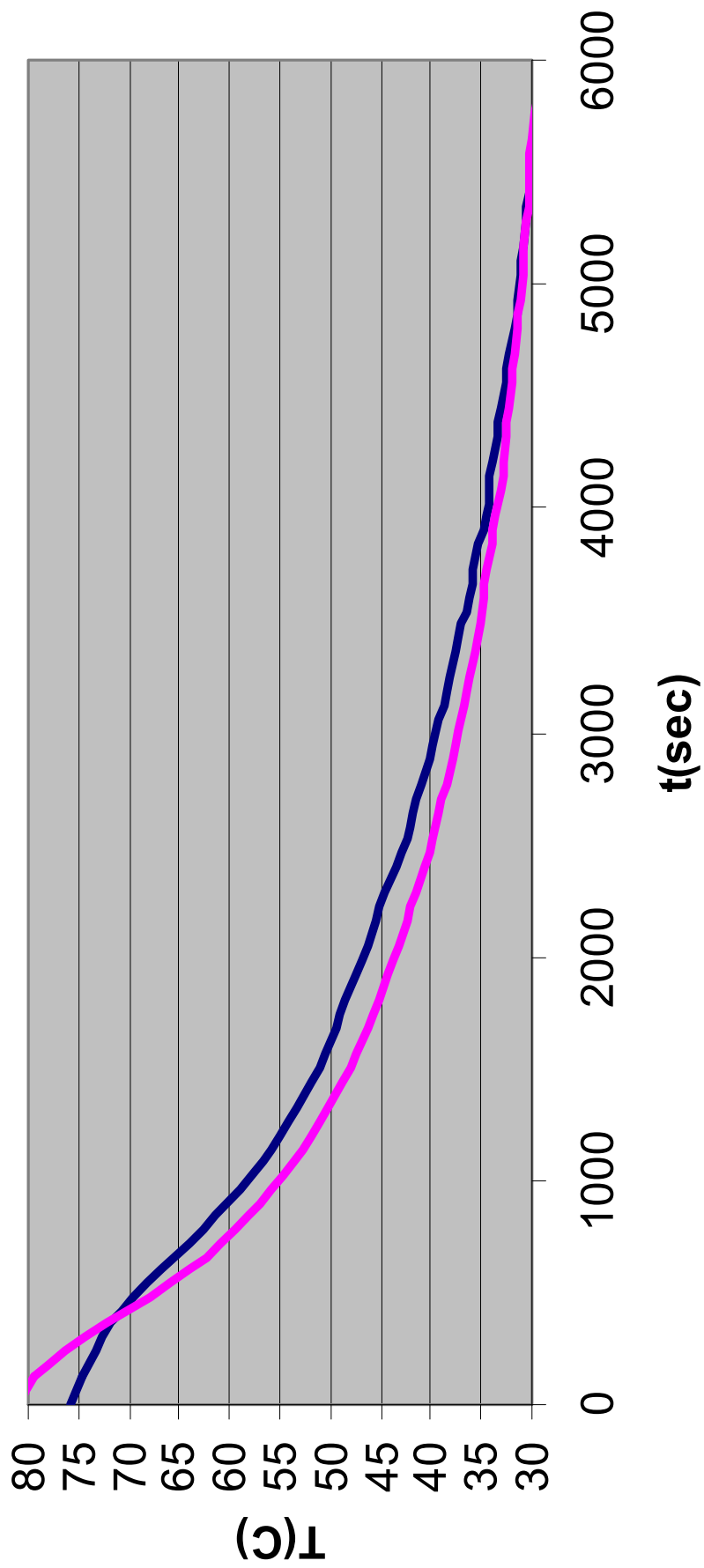
— Παροχή 257ml/5min Δοχείο με PCM    — Παροχή 244ml/5min Δοχείο με Νερό

### Σύγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 1ο Η1=150mm Δοχείο με PCM-Δοχείο με Νερό



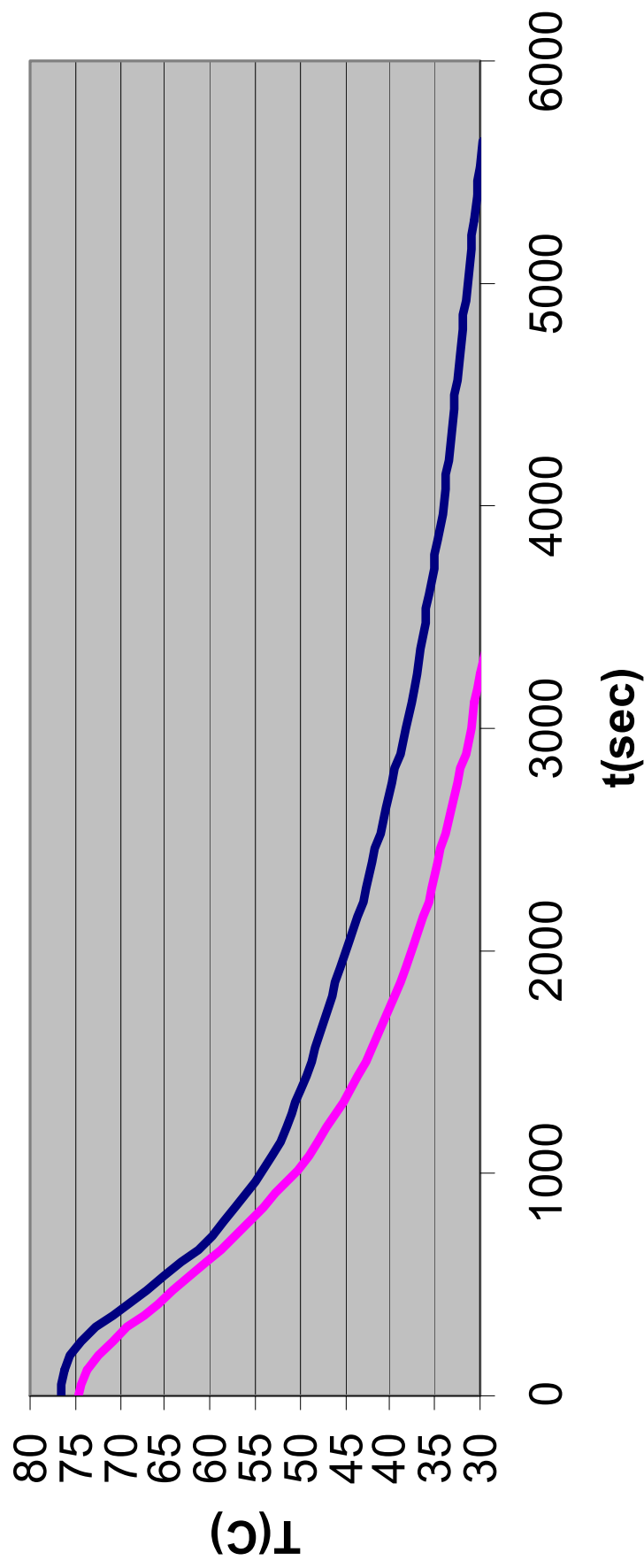


### Σύγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 1ο Η1=150mm Δοχείο με PCM-Δοχείο με Νερό



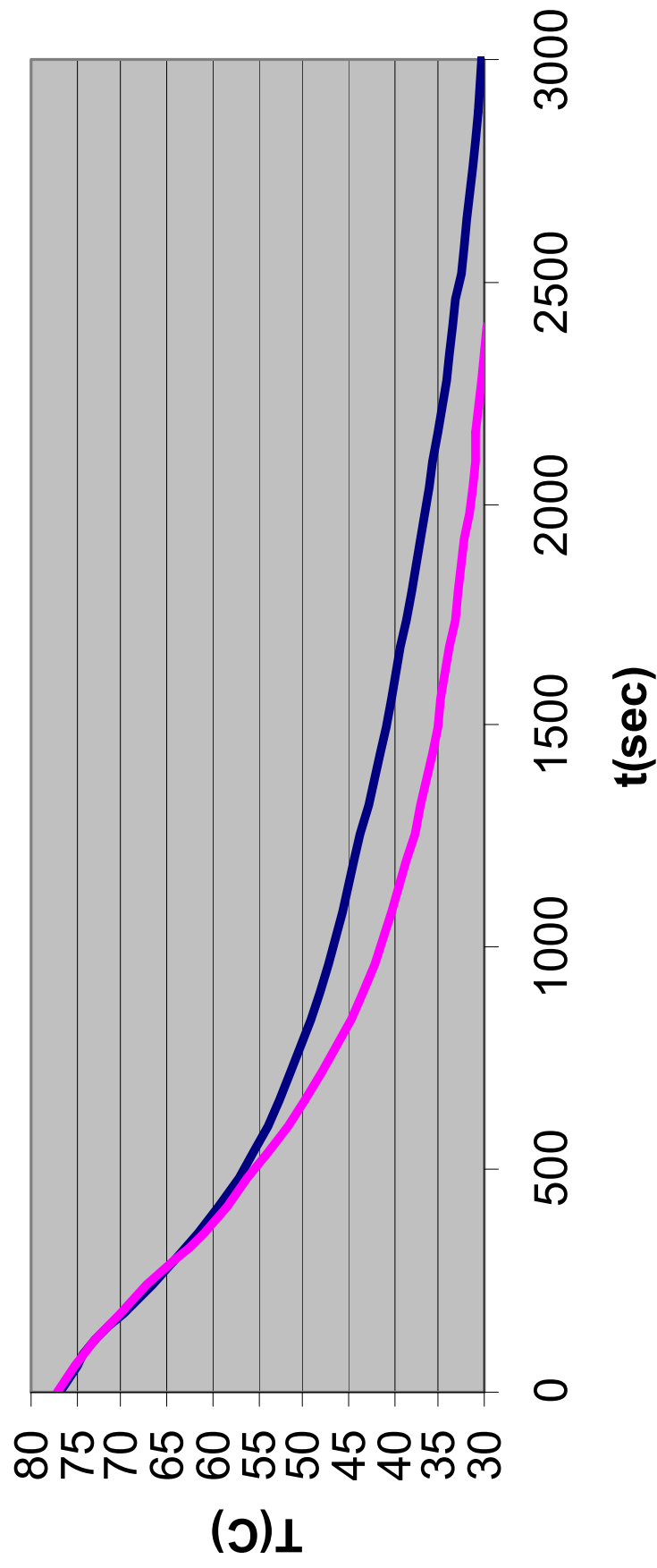
— Παροχή 126ml/5min Δοχείο με PCM — Παροχή 150ml/5min Δοχείο με Νερό

### Σύγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 2ο H<sub>1</sub>=300mm Δοχείο με PCM-Δοχείο με Νερό



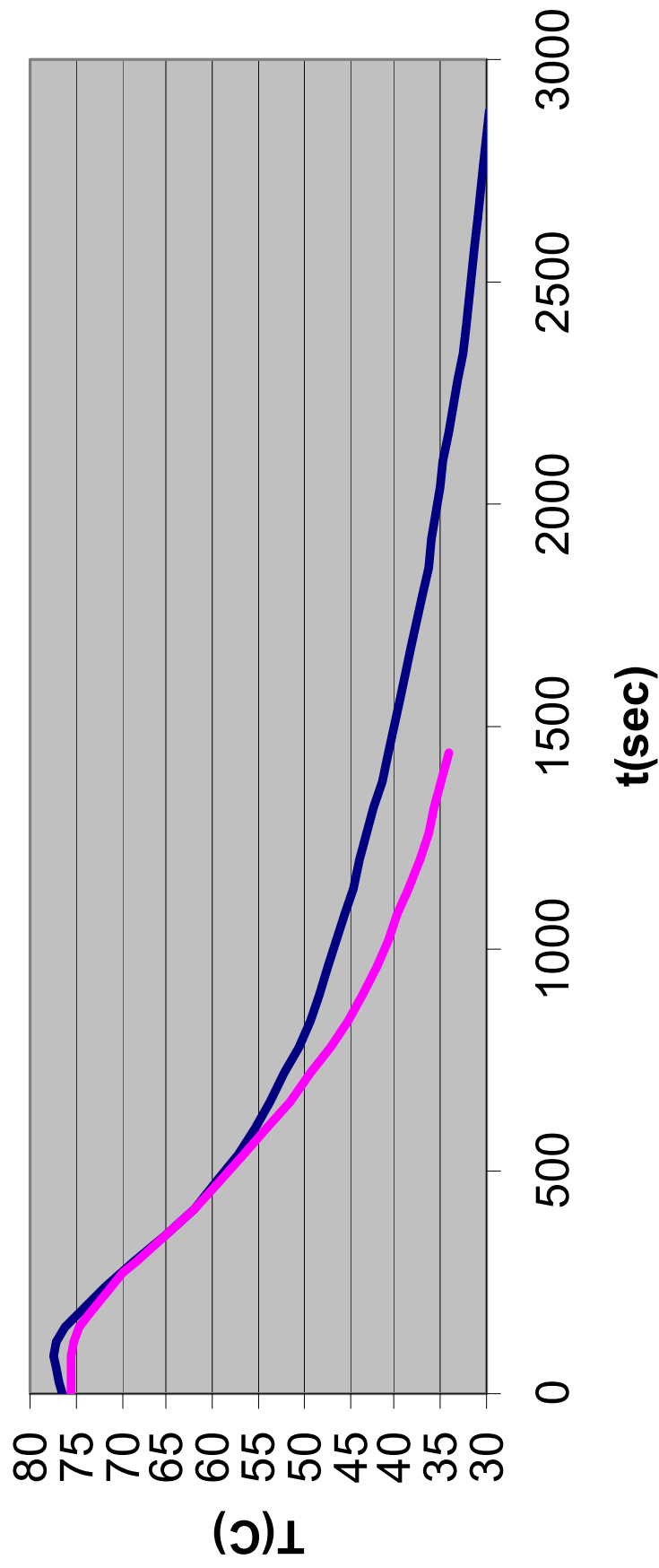
— Παροχή 220ml/5min Δοχείο με PCM — Παροχή 224ml/5min Δοχείο με Νερό

### Σύγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 2ο H<sub>1</sub>=300mm Δοχείο με PCM-Δοχείο με Νερό



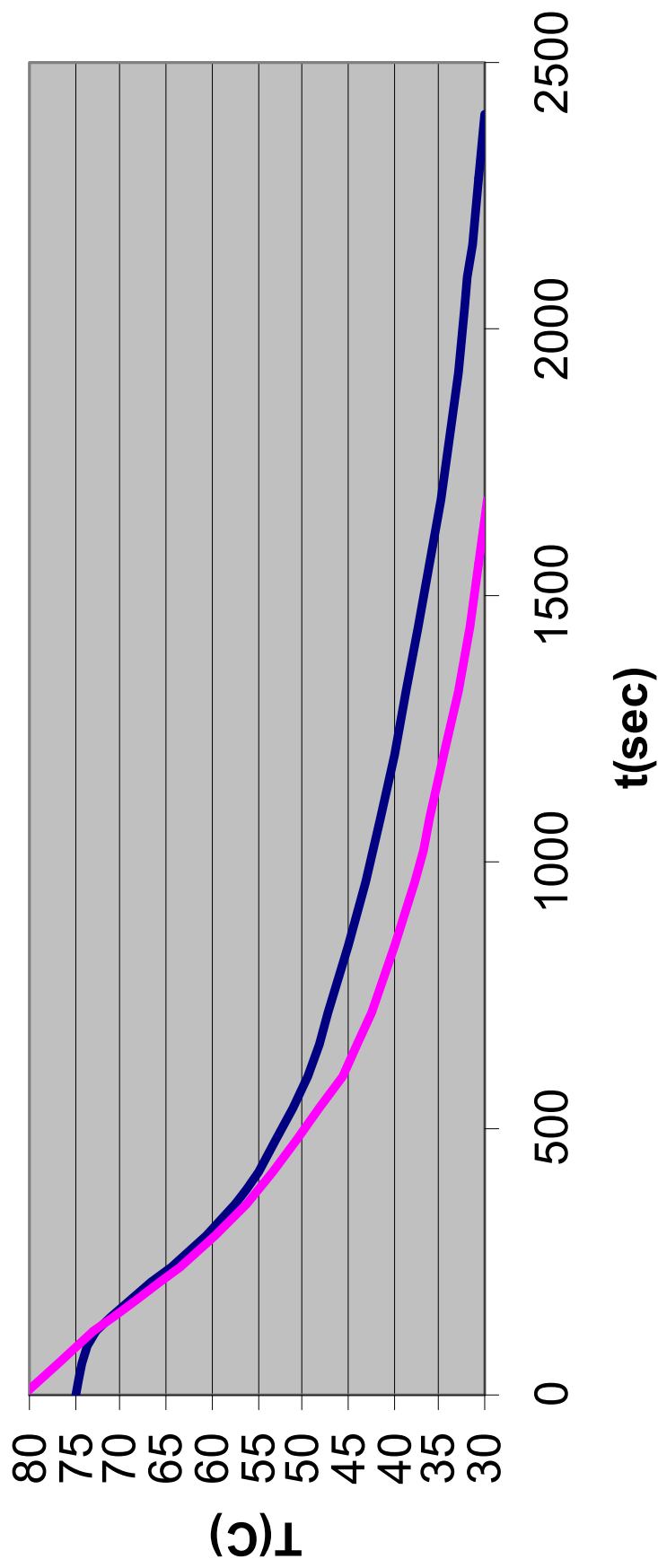
— Παροχή 335ml/5min Δοχείο με PCM — Παροχή 325ml/5min Δοχείο με Νερό

### Σύγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 2ο H<sub>1</sub>=300mm Δοχείο με PCM-Δοχείο με Νερό



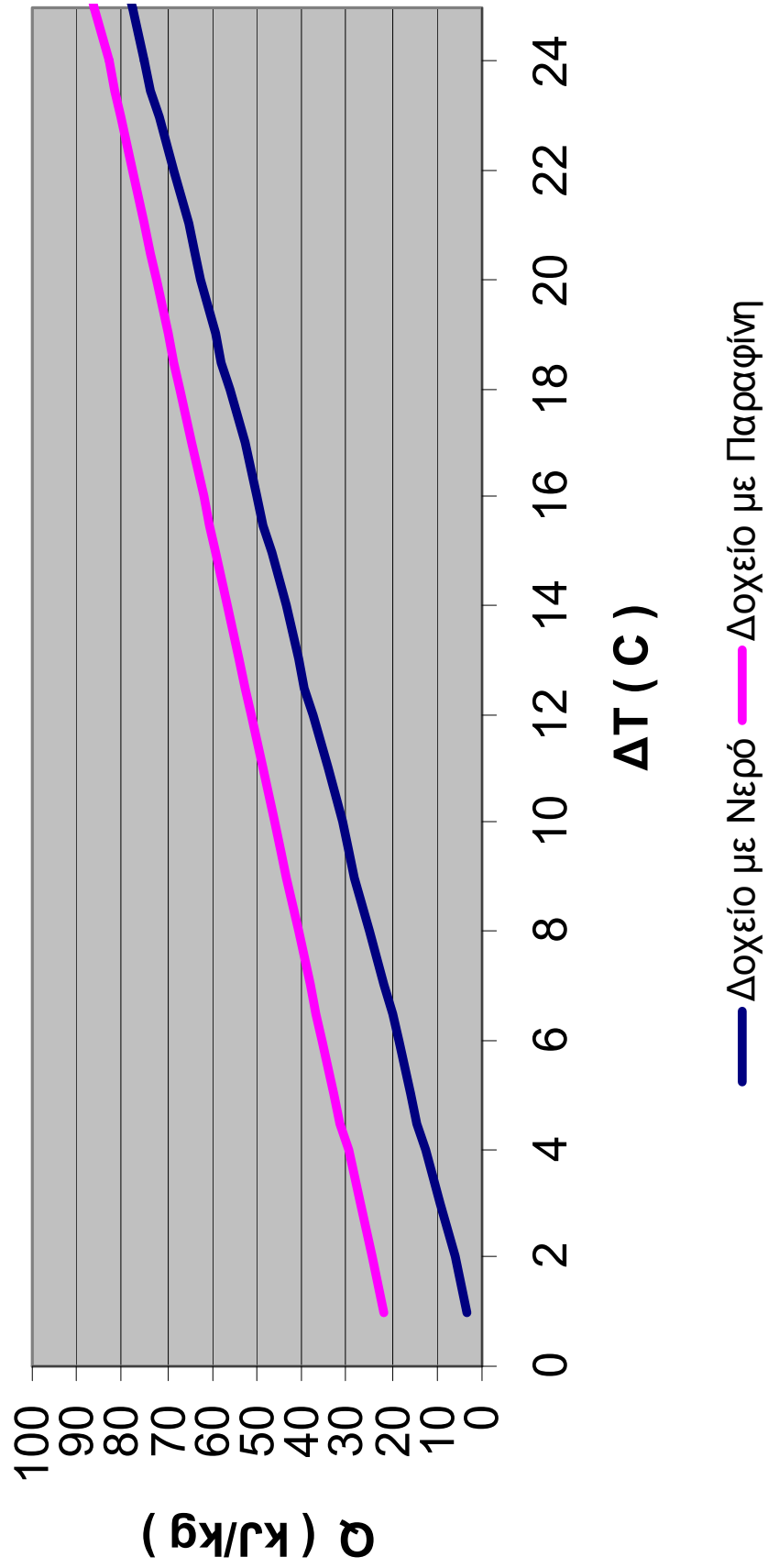
— Παροχή 367ml/5min Δοχείο με PCM — Παροχή 369ml/5min Δοχείο με Νερό

### Σύγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 2ο H<sub>1</sub>=300mm Δοχείο με PCM-Δοχείο με Νερό

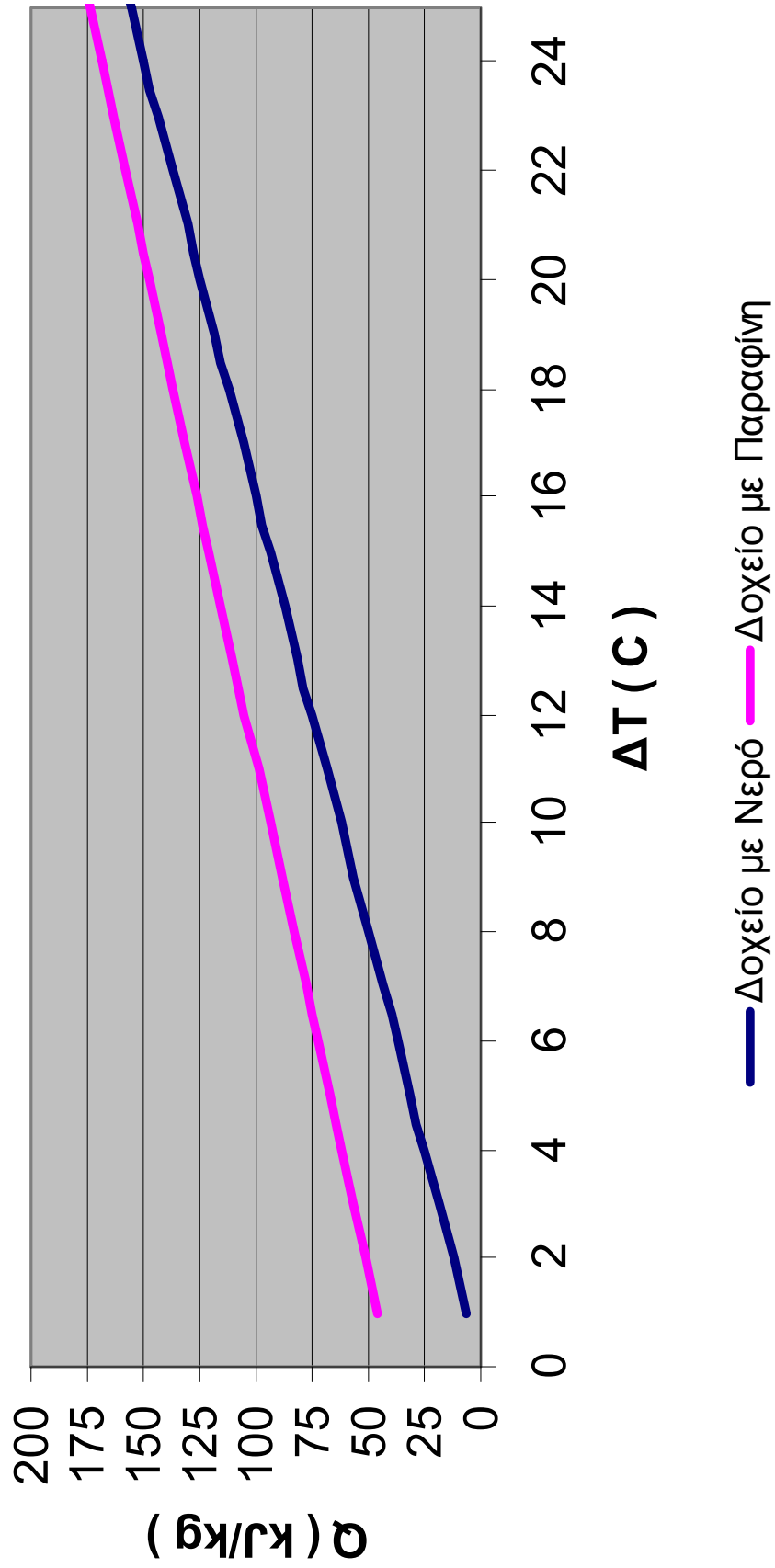


— Παροχή 408ml/5min Δοχείο με PCM — Παροχή 438ml/5min Δοχείο με Νερό

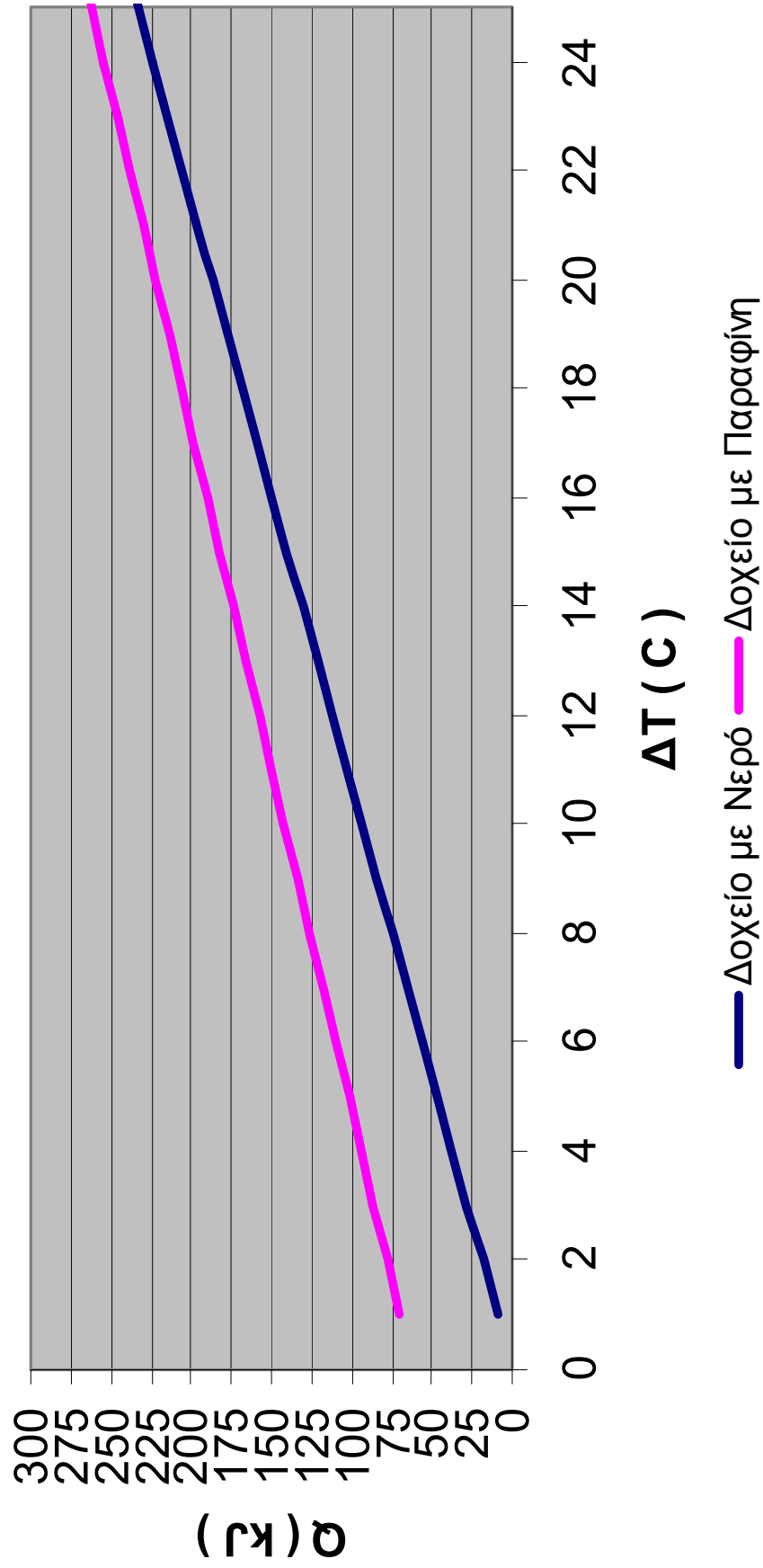
Συγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 1ο  
Αποθηκευμένη θερμότητα - Εύρος θερμοκρασίας  
λειτουργίας



## Συγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 2ο Αποθηκευμένη θερμότητα - Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας

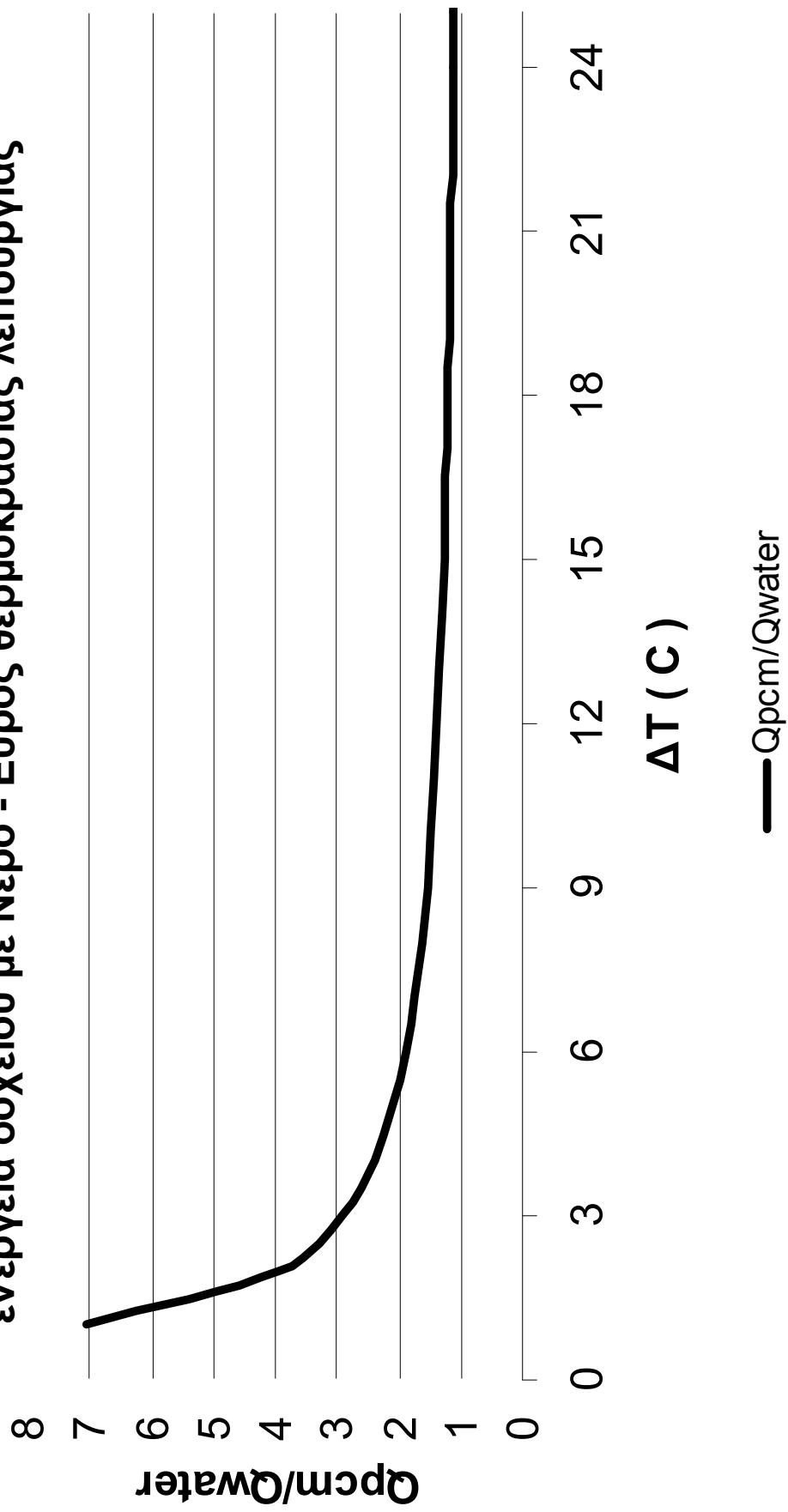


### Συγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 3ο Αποθηκευμένη θερμότητα - Εύρος θερμοκρασίας Λειτουργίας

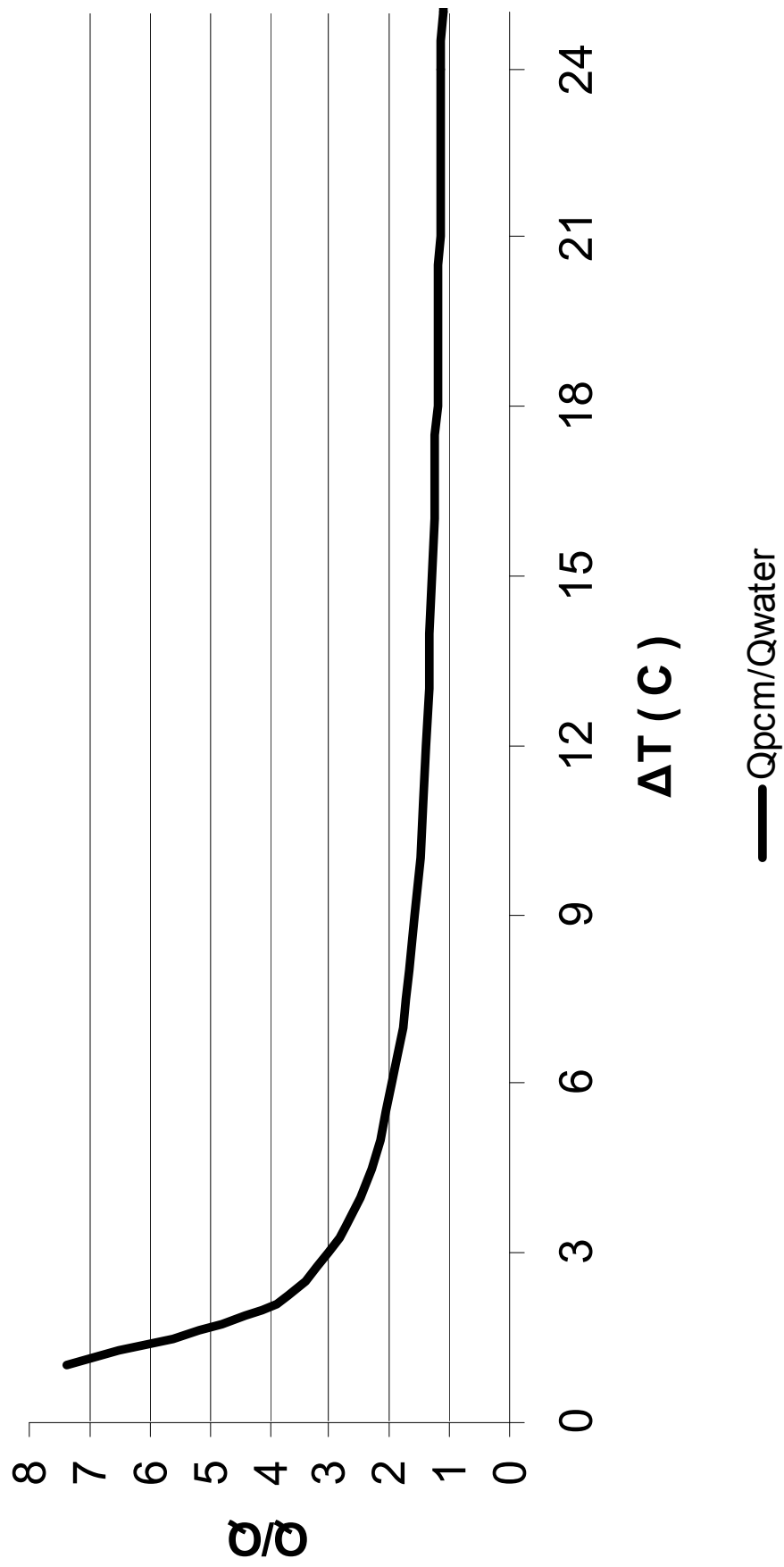




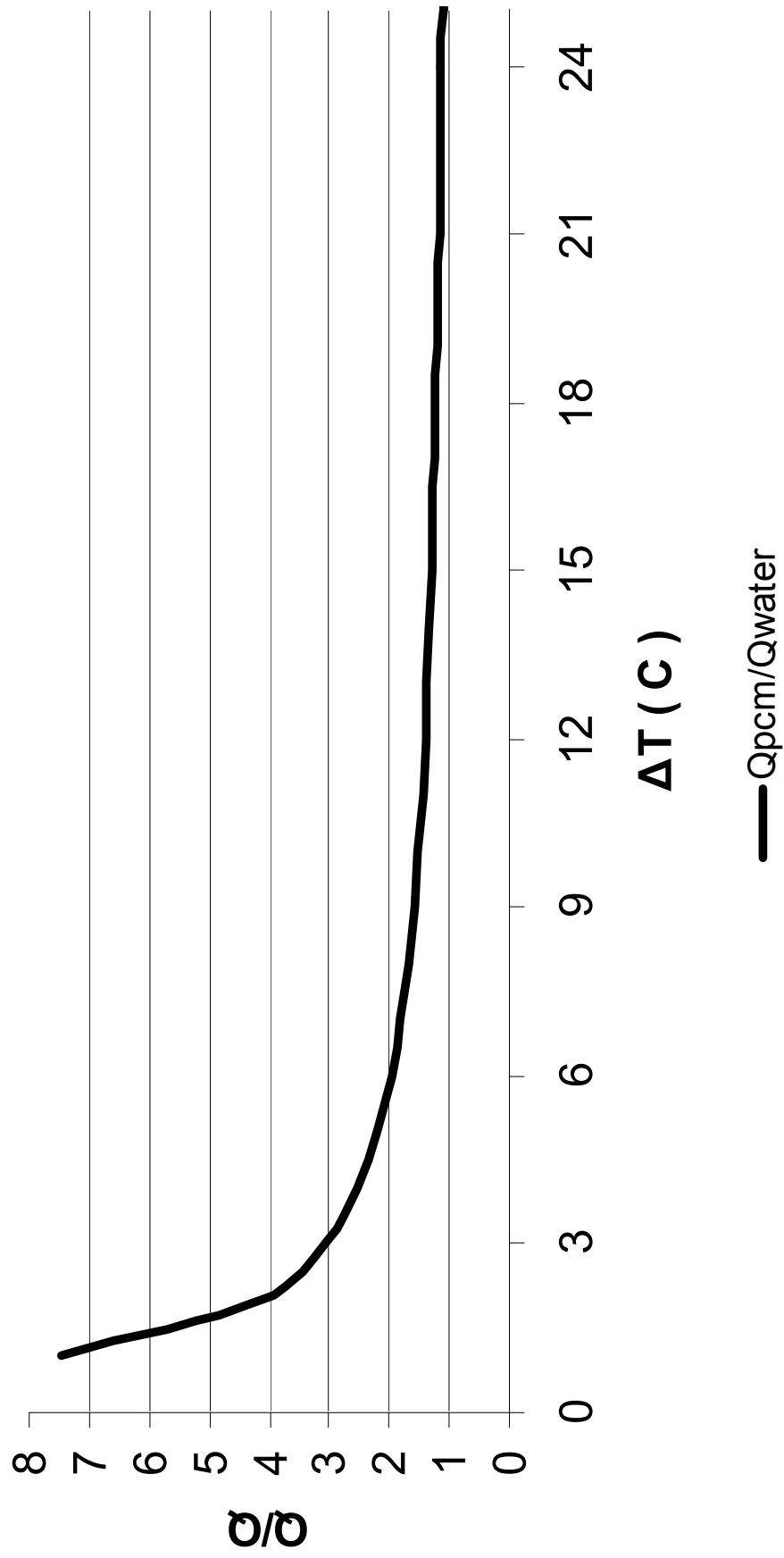
**Συγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 1ο  
Αποθηκευμένη θερμότητα δοχείου με PCM/Αποθηκευμένη  
ενέργεια δοχείου με Νερό - Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας**



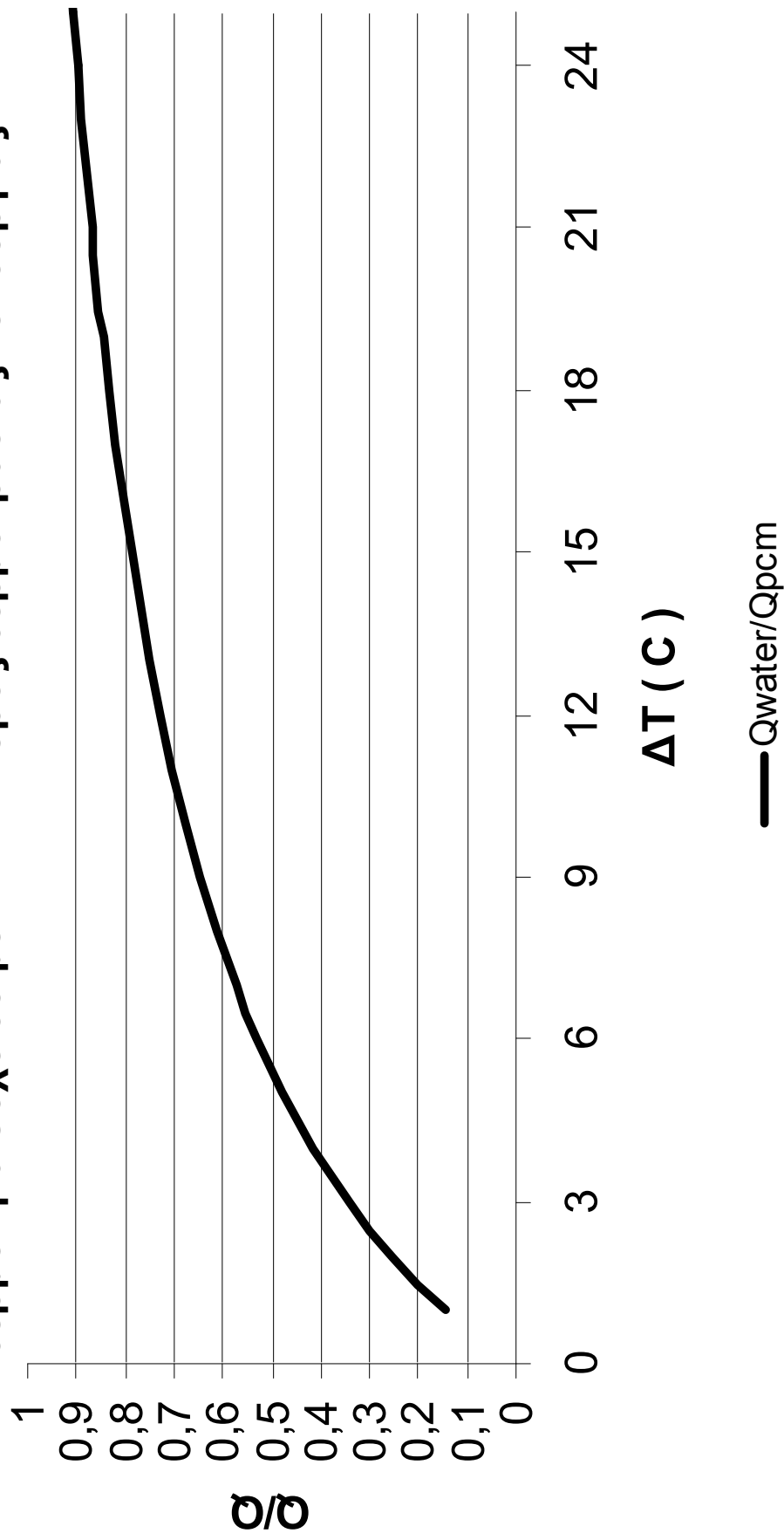
**Συγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 2ο  
Αποθηκευμένη θερμότητα δοχείου με PCM/Αποθηκευμένη  
ενέργεια δοχείου με Νερό - Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας**



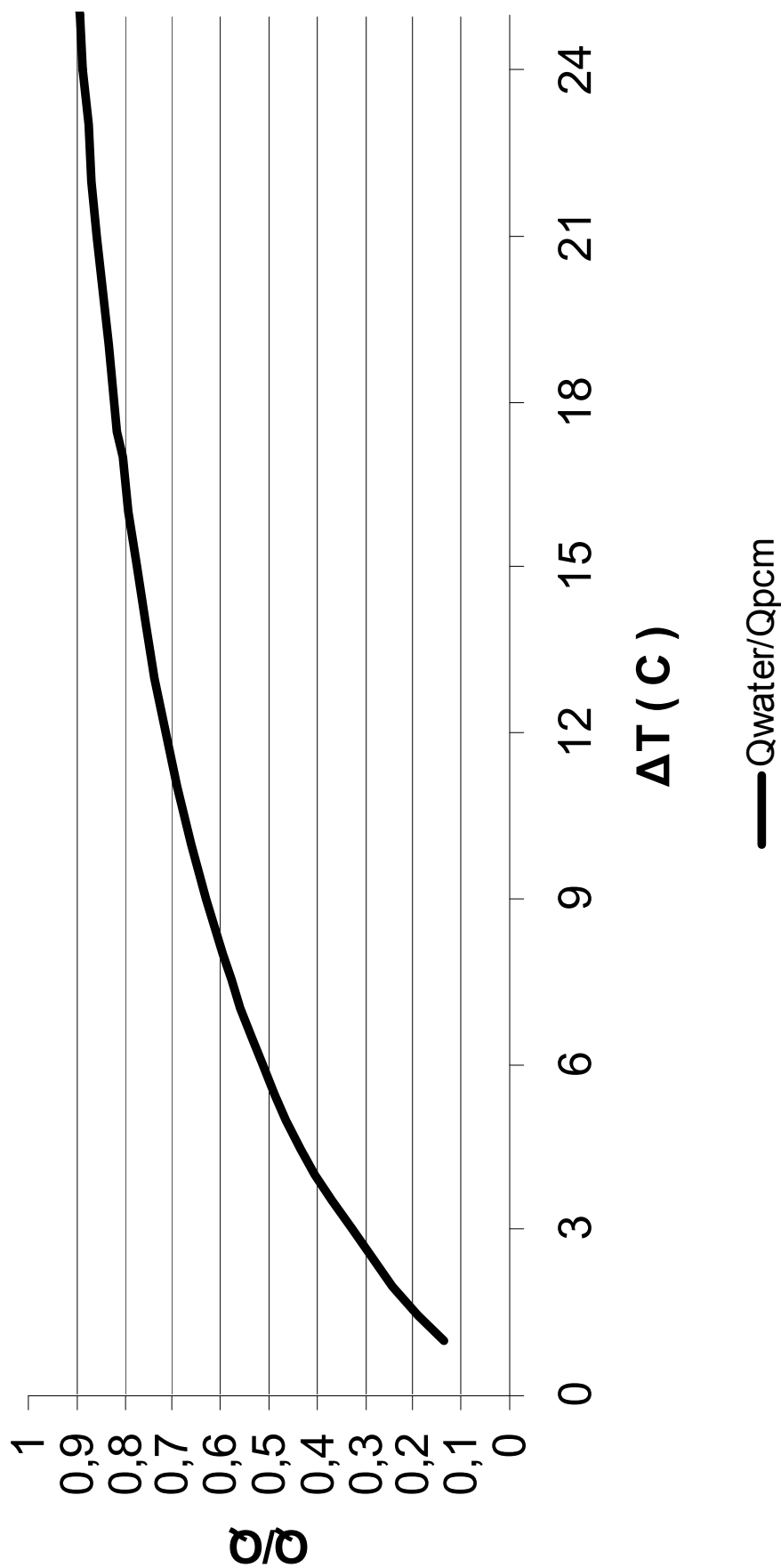
**Συγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 3ο  
Αποθηκευμένη θερμότητα δοχείου με PCM/Αποθηκευμένη  
ενέργεια δοχείου με Νερό - Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας**



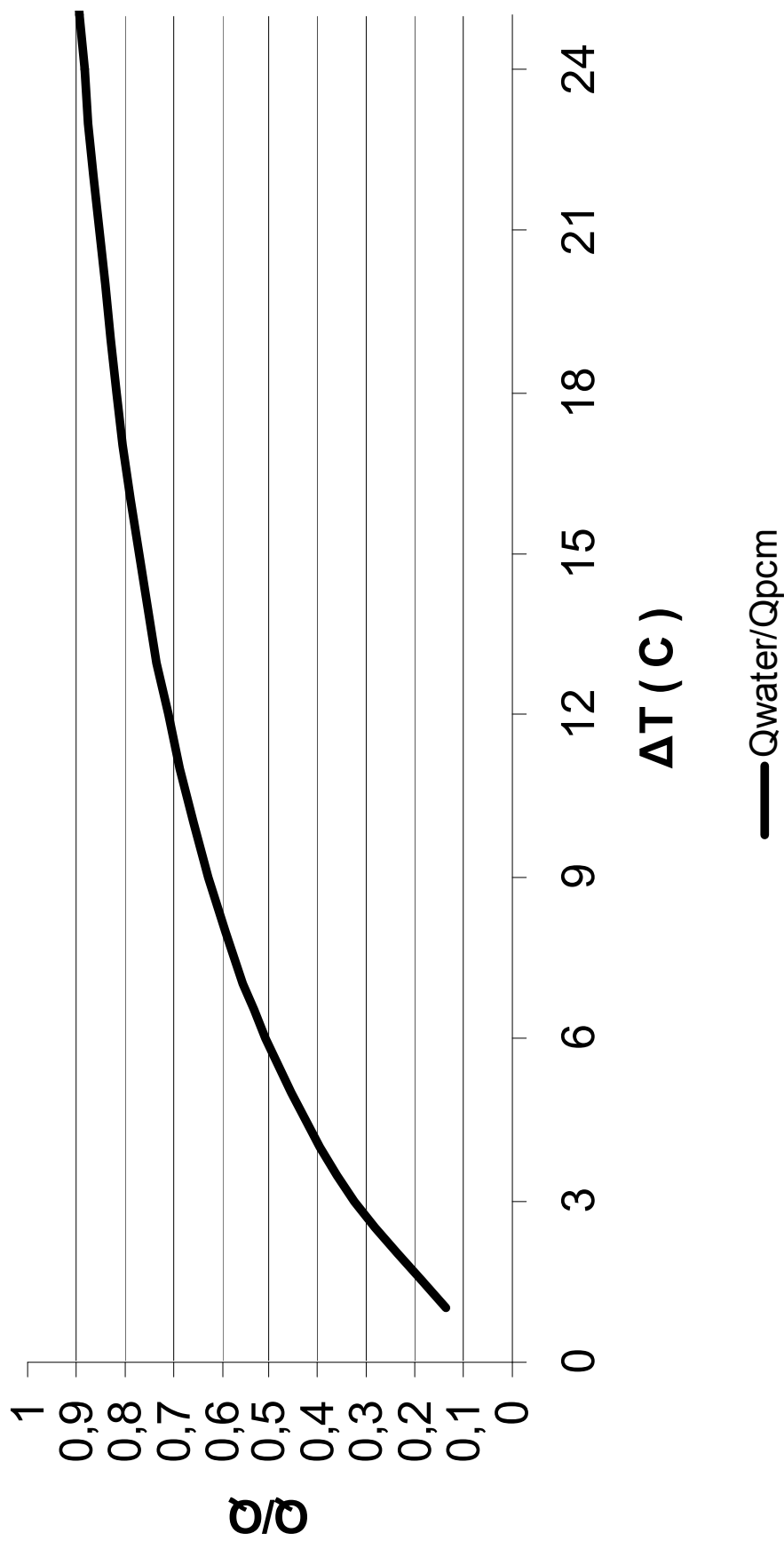
**Συγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 1ο**  
**Αποθηκευμένη ενέργεια δοχείου με Νερό/Αποθηκευμένη**  
**θερμότητα δοχείου με PCM - Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας**



**Συγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 2ο**  
**Αποθηκευμένη ενέργεια δοχείου με Νερό/Αποθηκευμένη**  
**θερμότητα δοχείου με PCM - Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας**



**Συγκριτικό διάγραμμα Δοχείο 3ο**  
**Αποθηκευμένη ενέργεια δοχείου με Νερό/Αποθηκευμένη**  
**θερμότητα δοχείου με PCM - Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας**



## **9.8 Συμπεράσματα συγκριτικών διαγραμμάτων Δοχείων PCM-Δοχείων Νερού**

### **9.8.1 Συγκριτικά Διαγράμματα «T-t»**

Από τα διαγράμματα «T-t» φαίνεται καθαρά ότι η απόδοση του συστήματος με PCM είναι μεγαλύτερη από αυτή του δοχείου με το νερό στις θερμοκρασίες 55°C - 40 °C αφού για τον ίδιο χρόνο αποφόρτισης η θερμοκρασίες για στο δοχείο με την παραφίνη διατηρούνται σε υψηλότερη στάθμη.

Ακόμη εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η κλήση της καμπύλης του δοχείου με την παραφίνη αλλάζει στις θερμοκρασίες 55°C - 45°C και γίνεται μικρότερη ενώ συνεχίζοντας την αποφόρτιση αποκτά σταδιακά την μορφή της καμπύλης του δοχείου με το νερό.

Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμοκρασία στερεοποίησης της παραφίνης είναι στους 55°C οπότε στο εύρος 55°C - 45°C (λόγο και χρονικής υστέρησης της μεταφερόμενης θερμότητας) θα γίνεται η απόδοσης της λανθάνουσας θερμότητας στερεοποίησης της παραφίνης.

Πέρα από αυτό το εύρος θερμοκρασιών η καμπύλη του δοχείου με PCM θα αρχίσει να συμπίπτει με αυτή του νερού διότι η περισσότερη μάζα της παραφίνης θα έχει είδη στερεοποιηθεί και θα έχει αποδώσει το μεγαλύτερο μέρος της αποθηκευμένης λανθάνουσας θερμότητας που είχε, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η ισχύ του συστήματος και να συμπίπτει με αυτή του δοχείου που περιέχει μόνο θερμό νερό.

Αν εξετάζαμε το σύστημα για μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών θα βλέπαμε ότι όσο μεγαλύτερο  $\Delta T$  είχαμε τόσο περισσότερο θα υπερτερούσε το δοχείο θερμού νερού. Δηλαδή η απόδοση του δοχείου με το PCM πέφτει σε σύγκριση με την κλασική λύση αποθήκευσης με θερμό νερό και ύστερα από ένα σημείο η κλασική λύση είναι πιο συμφέρουσα.

Αυτός είναι και ο λόγος που τέτοιου είδους συστήματα για να έχει νόημα η χρήση τους θα πρέπει να εφαρμόζονται για μικρά  $\Delta T$  γιατί το κέρδος σε σχέση με τα κλασικά συστήματα θερμού νερού το παίρνουμε όταν γίνεται η απόδοση της λανθάνουσας θερμότητας, δηλαδή σε ένα συγκεκριμένο πολύ μικρό εύρος θερμοκρασίας

Όσον αφορά τα συγκριτικά διαγράμματα «T-t» του πρώτου δοχείου οι διαφορές δεν είναι πολύ μεγάλες διότι :

- υπήρξαν σφάλματα κατά την μέτρηση λόγο της πολύ μικρής παροχής με αποτέλεσμα το θερμοστοιχείο να μην μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια την θερμοκρασία εξόδου
- Οι διαστάσεις του δοχείου είναι πολύ μικρές με συνέπεια ο όγκος της παραφίνης να είναι μικρός και έτσι η αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα να είναι ελάχιστη

### 9.8.2 Διαγράμματα «Q-ΔT» και Διαγράμματα Αναλογιών «(Qpcm/Qwater)-ΔT» , «(Qwater/Qpcm)-ΔT»

Όπως και στο παράδειγμα που δώσαμε και εδώ φαίνεται ότι για ένα εύρος θερμοκρασίας  $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$  (από την θερμοκρασία στερεοποίησης της παραφίνης) το σύστημα δίνει περίπου διπλάσια ενέργεια από αυτή του νερού ενώ για εύρος μεγαλύτερο τον  $15^{\circ}\text{C}$  τα δύο διαφορετικά συστήματα δίνουν σχεδόν την ίδια ενέργεια. Ενώ το σύστημα θερμού νερό για  $\Delta T>30^{\circ}\text{C}-35^{\circ}\text{C}$  είναι πιο αποδοτικό

Τα διαγράμματα αυτά έχουν ακριβώς την ίδια μορφή μεταξύ των τριών δοχείων διότι και τα τρία δοχεία έχουν την ίδια κατ' όγκο περιεκτικότητα σε παραφίνη, νερό και ορείχαλκο.



## 9.9 Σχέσεις ομοιότητας μεταξύ των τριών δοχείων αποθήκευσης θερμότητας με υλικό αλλαγής φάσης

### 9.9.1 Ομοιότητες Δοχείων

Τα δοχεία που κατασκευάστηκαν και που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα έχουν κάποιες ομοιότητες μεταξύ τους όσον αφορά την γεωμετρία τους αλλά και τα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται οι οποίες παρατίθενται παρακάτω:

1. Και τα τρία δοχεία είναι κυλινδρικά
2. Η διάμετρος και το πάχος των δοχείων είναι ίδια σε κάθε ένα από αυτά
3. Οι σωλήνες που έχουν τοποθετηθεί στα δοχεία έχουν και αυτοί την ίδια διάμετρο και το ίδιο πάχος σε κάθε δοχείο
4. Ο αριθμός των σωλήνων μέσα σε κάθε δοχείο είναι 20
5. Το μήκος των δοχείων είναι κάθε φορά πολλαπλάσιο του μήκους του πρώτου δοχείου (με το 2<sup>ο</sup> δοχείο να έχει διπλάσιο μήκος από το πρώτο και το τρίτο δοχείο να έχει τριπλάσιο μήκος από το πρώτο)
6. Και τα τρία δοχεία έχουν ≈10% κατ' όγκο παραφίνη
7. Και τα τρία δοχεία έχουν ≈16% κατ' όγκο ορείχαλκο
8. Και στα τρία δοχεία όταν ξεκινά η μέτρηση υπάρχει θερμό νερό σε περιεκτικότητα ≈74% κατ' όγκο

Με δεδομένες τις ομοιότητες που υπάρχουν στα τρία δοχεία και με τις πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει θα προσπαθήσουμε να βρούμε μία πειραματική σχέση η οποία θα μπορεί να μας δίνει την θερμοκρασία συναρτήσεως του χρόνου αποφόρτισης για αντίστοιχα δοχεία μεγαλύτερου ύψους (αλλά ίδιας διαμέτρου)

Αρχικά για να έχουμε μία καλύτερη εικόνα στην σύγκριση των διαγραμμάτων και λόγω του ότι η ακριβής ρύθμιση της παροχής δεν είναι δυνατή εξαιτίας σφαλμάτων που δημιουργούνται κατά την μέτρηση (άλατα στο νερό του δικτύου, συστολή διαστολή βελονοειδούς βάνας κατά την φόρτιση και την αποφόρτιση, μετρητικά όργανα) διαιρούμε τον χρόνο αποφόρτισης ( $t$ ) κάθε δοχείου με τον χρόνο ανανέωσης κάθε φορά για το εκάστοτε δοχείο (τον χρόνο δηλαδή που χρειάζεται για να ανανεωθεί η μάζα του νερού μέσα στο δοχείο μία φορά).

$$t^* = \frac{t}{t_{av}} \quad (109)$$

$$t^* = \text{Ανανεώσεις}$$

$$t = \text{Χρόνος αποφόρτισης}$$

$$t_{av} = \text{Χρόνος μίας ανανέωσης}$$

Από τις μετρήσεις που έχουν γίνει στα δοχεία με παραφίνη (PCM) επιλέγουμε τις εξής ομάδες μετρήσεων:

1)

- Από το 1<sup>ο</sup> Δοχείο την 5<sup>η</sup> μέτρηση με παροχή 265 ml/5min
- Από το 2<sup>ο</sup> Δοχείο την 8<sup>η</sup> μέτρηση με παροχή 578 ml/5min
- Από το 3<sup>ο</sup> Δοχείο την 3<sup>η</sup> μέτρηση με παροχή 829 ml/5min

2)

- Από το 1<sup>ο</sup> Δοχείο την 8<sup>η</sup> μέτρηση με παροχή 363 ml/5min
- Από το 2<sup>ο</sup> Δοχείο την 9<sup>η</sup> μέτρηση με παροχή 767 ml/5min
- Από το 3<sup>ο</sup> Δοχείο την 2<sup>η</sup> μέτρηση με παροχή 1021 ml/5min

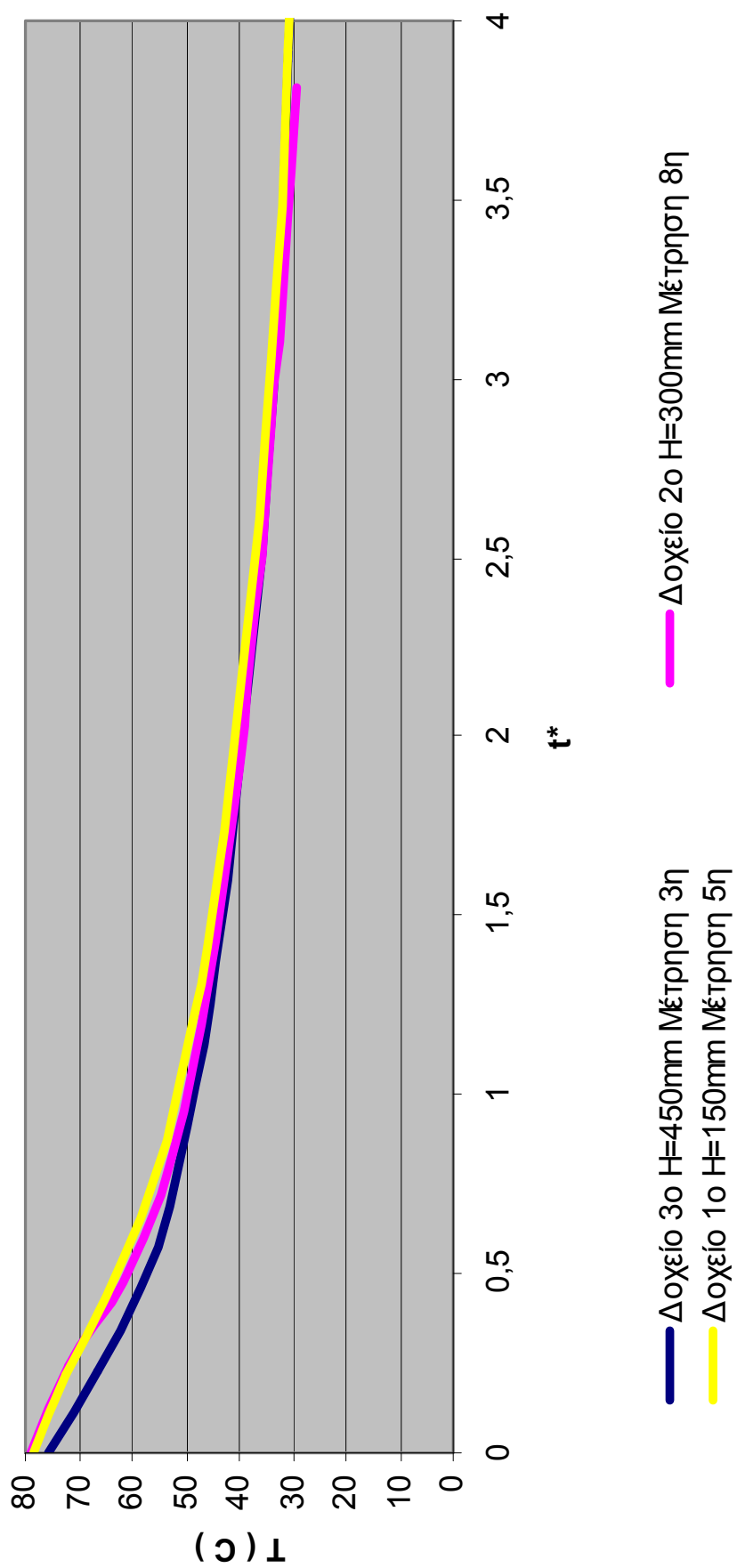
Επιλέγουμε αυτές τις μετρήσεις διότι οι ανανεώσεις των δοχείων στις συγκεκριμένες μετρήσεις είναι πολύ κοντά μεταξύ τους και περίπου ίσες με 7 Ανανεώσεις/ώρα για την 1<sup>η</sup> ομάδα και 8.5 Ανανεώσεις/ώρα για την 2<sup>η</sup> ομάδα και παραθέτοντας το συγκριτικό διάγραμμα «T-t\*» μπορούμε να δούμε πως συμπεριφέρονται τα δοχεία μεταξύ τους.

Έτσι κατασκευάζουμε τα δύο διαγράμματα που ακολουθούν στην επόμενη σελίδα.

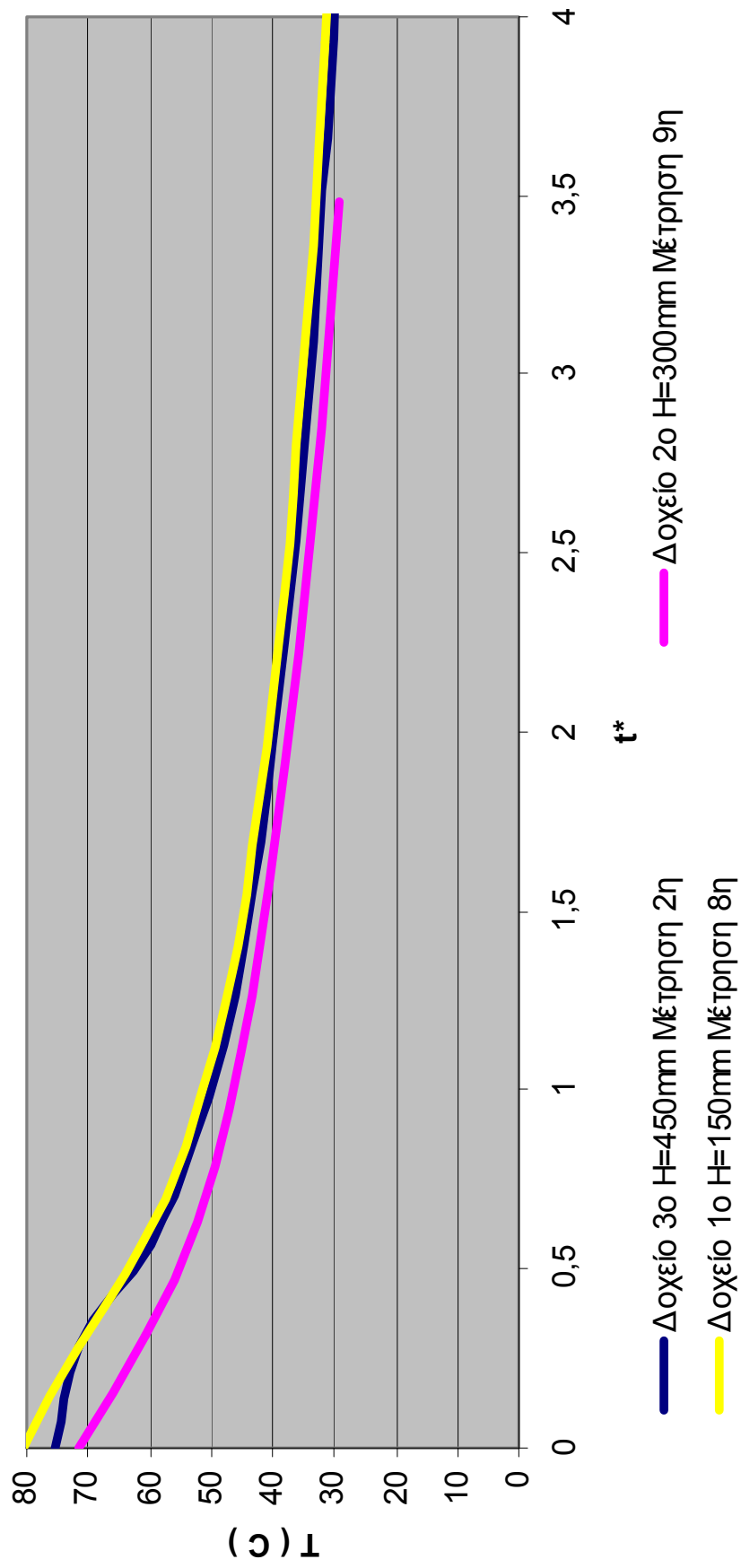
Παρατηρούμε ότι οι διαφορές στην θερμοκρασία αποφόρτισης μεταξύ των τριών δοχείων είναι πολύ μικρές και η συμπεριφορά της θερμοκρασίας αποφόρτισης συμπίπτει στα τρία δοχεία. Έτσι θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι μπορεί να υπάρχει κάποια σχέση η οποία θα συνδέει την θερμοκρασία αποφόρτισης με τον χρόνο αποφόρτισης και τις διαστάσεις του δοχείου.

Αυτό θα επιχειρήσουμε να πράξουμε παρακάτω.

**Συκριτικό διάγραμμα Θερμοκρασίας αποφόρτισης  
των Δοχείων 1,2,3  
με παροχή 7 Ανανεώσεις/Ωρα**



**Συγκριτικό διάγραμμα Θερμοκρασίας αποφόρτισης  
των Δοχείων 1,2,3  
με παροχή 8.5 Ανανεώσεις/Ωρα**



### 9.9.2 Εύρεση σχέσης ομοιότητας

Για να μπορέσουμε να βρούμε μία πειραματική σχέση που να συνδέει την θερμοκρασία (T) με τον χρόνο αποφόρτισης (t) και την διάσταση του ύψους που είναι και αυτή που αλλάζει στα δοχεία που εξετάζουμε ( οι υπόλοιπες διαστάσεις παραμένουν ίδιες) θα πρέπει να διαλέξουμε μετρήσεις στις οποίες η παροχή είναι ίδια ώστε να μην υπεισέρθει και η παροχή στην σχέση μας.

Όποτε η ομάδα των μετρήσεων που επιλέγουμε από τα δοχεία με PCM που έχουν εξεταστεί είναι:

- Η 7<sup>η</sup> Μέτρηση από το 1<sup>ο</sup> Δοχείο (H=150mm) με παροχή 1.37 ml/sec
- Η 2<sup>η</sup> Μέτρηση από το 2<sup>ο</sup> Δοχείο (H=300mm) με παροχή 1.36 ml/sec
- Η 7<sup>η</sup> Μέτρηση από το 3<sup>ο</sup> Δοχείο (H=450mm) με παροχή 1.39 ml/sec

#### Βήμα 1<sup>ο</sup>

Βρίσκουμε την συνάρτηση που προσεγγίζει όσο καλύτερα γίνεται την ομάδα των σημείων (T,t) που απαρτίζουν κάθε μέτρηση

Η προσέγγιση θα γίνει με παρεμβολή τις παρακάτω εκθετικής συνάρτησης με τέσσερις συντελεστές:

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x) \quad (110)$$

Όπου

- το x αντιπροσωπεύεται από τον χρόνο αποφόρτισης t
- το  $f(x)$  αντιπροσωπεύεται από την θερμοκρασία T

Για την παρεμβολή χρησιμοποιούμε το εργαλείο «Curve Fitting Tool» που εμπεριέχεται στην Matlab 7.7.0 .

Ανοίγουμε το λογισμικό της Matlab και δημιουργούμε τις μεταβλητές T<sub>1</sub>,T<sub>2</sub>,T<sub>3</sub>,t<sub>1</sub>,t<sub>2</sub>,t<sub>3</sub> στις οποίες τοποθετούμε τις εκάστοτε μετρήσεις μας όπως φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 47)

T<sub>1</sub>: Τοποθετούμε τις θερμοκρασίες της 7<sup>ης</sup> μέτρησης από το 1<sup>ο</sup> Δοχείο

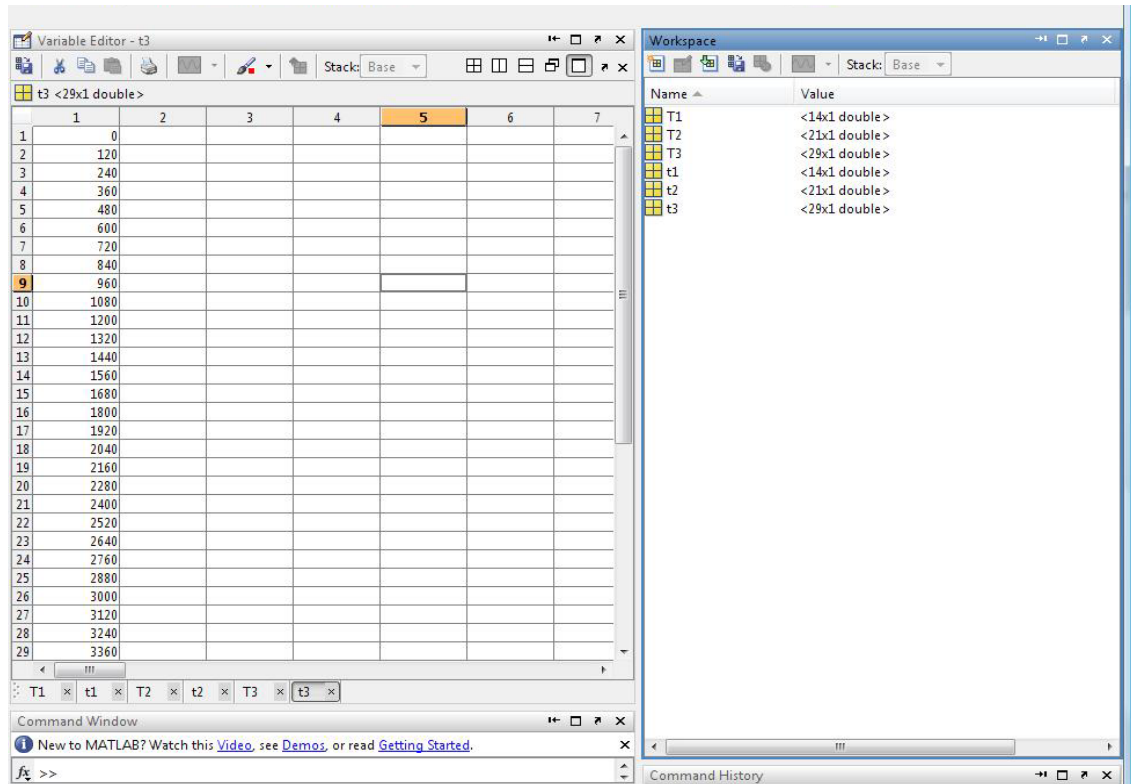
t<sub>1</sub>: Τοποθετούμε τους χρόνους αποφόρτισης της 7<sup>ης</sup> μέτρησης από το 1<sup>ο</sup> Δοχείο

T<sub>2</sub>: Τοποθετούμε τις θερμοκρασίες της 2<sup>ης</sup> μέτρησης από το 2<sup>ο</sup> Δοχείο

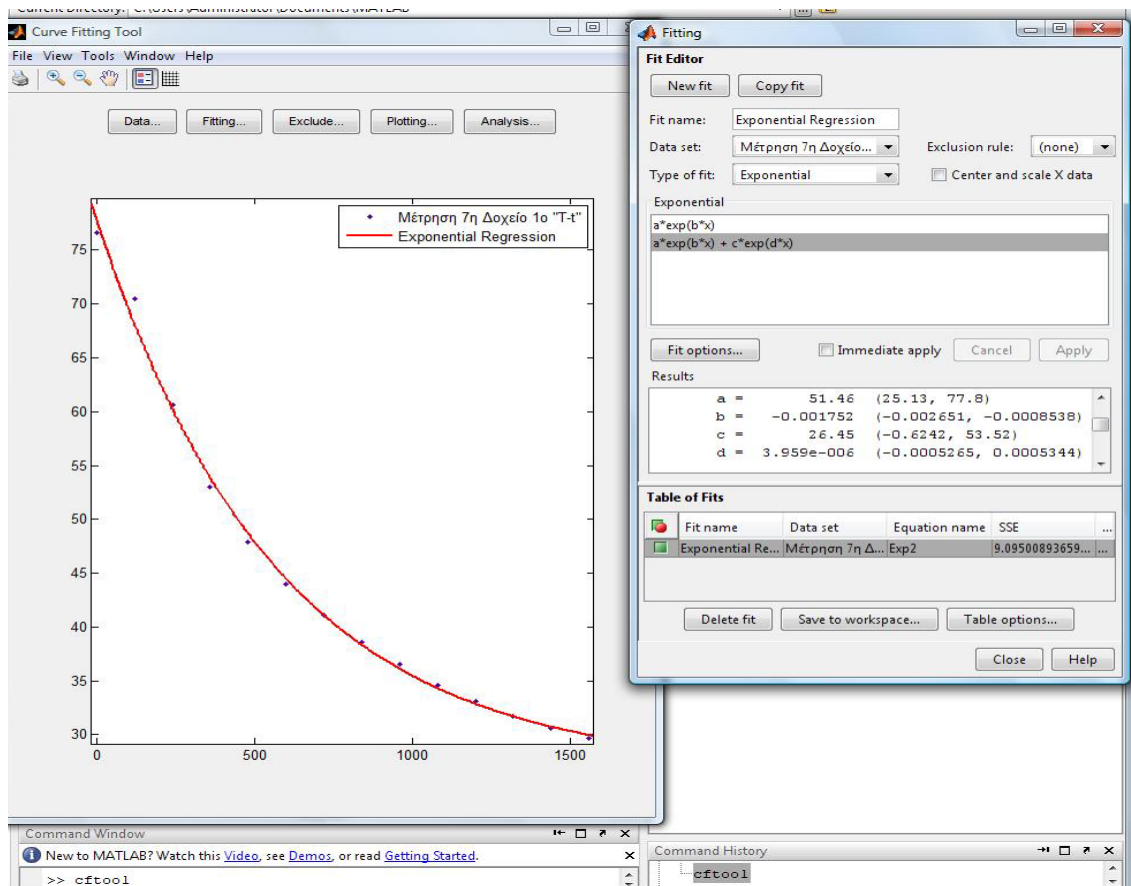
t<sub>2</sub>: Τοποθετούμε τους χρόνους αποφόρτισης της 2<sup>ης</sup> μέτρησης από το 2<sup>ο</sup> Δοχείο

T<sub>3</sub>: Τοποθετούμε τις θερμοκρασίες της 7<sup>ης</sup> μέτρησης από το 3<sup>ο</sup> Δοχείο

t<sub>3</sub>: Τοποθετούμε τους χρόνους αποφόρτισης της 7<sup>ης</sup> μέτρησης από το 3<sup>ο</sup> Δοχείο



Σχήμα 47: Λογισμικό της Matlab, Δεξιά φαίνεται το παράθυρο Workspace όπου φαίνονται οι μεταβλητές που έχουμε δημιουργήσει ενώ αριστερά έχουμε επιλέξει την μεταβλητή  $t_3$  και έχουμε τοποθετήσει μέσα τα δεδομένα που θέλουμε. Τέλος κάτω και αριστερά βρίσκεται η γραμμή εντολών της Matlab



Σχήμα 48 : Εργαλείο «Curve Fitting Tool» της Matlab, Δεξιά έχει ανοίξει το παράθυρο της επιλογής Fitting όπου έχουμε επιλέξει την μέτρηση που θέλουμε να προσεγγίσουμε και την συνάρτηση με την οποία την προσεγγίζουμε και η Matlab μας δίνει τους συντελεστές a,b,c,d. Αριστερά φαίνεται το διάγραμμα με τις μετρήσεις και την παρεμβολή

Για να μπορέσουμε τώρα να κάνουμε την παρεμβολή, ανοίγουμε το εργαλείο «Curve Fitting Tool» πληκτρολογώντας cftool στην γραμμή εντολών της Matlab, και πατώντας την επιλογή «Fitting» επιλέγουμε την εκθετική συνάρτηση με την οποία θέλουμε να προσεγγίσουμε τα δεδομένα μας και η Matlab μας δίνει τους συντελεστές της συνάρτησης και το διάγραμμα της παρεμβολής.(Σχήμα 48)

Έτσι επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία και για τις τρεις μετρήσεις παίρνουμε τους εξής συντελεστές:

Μέτρηση 7<sup>η</sup> Δοχείο 1<sup>ο</sup> :

- $a = 49.67$
- $b = -0.001806$
- $c = 28.27$
- $d = -0.0000332$

Μέτρηση 2<sup>η</sup> Δοχείο 2<sup>ο</sup> :

- $a = 34.16$
- $b = -0.001825$
- $c = 42.84$
- $d = -0.0001521$

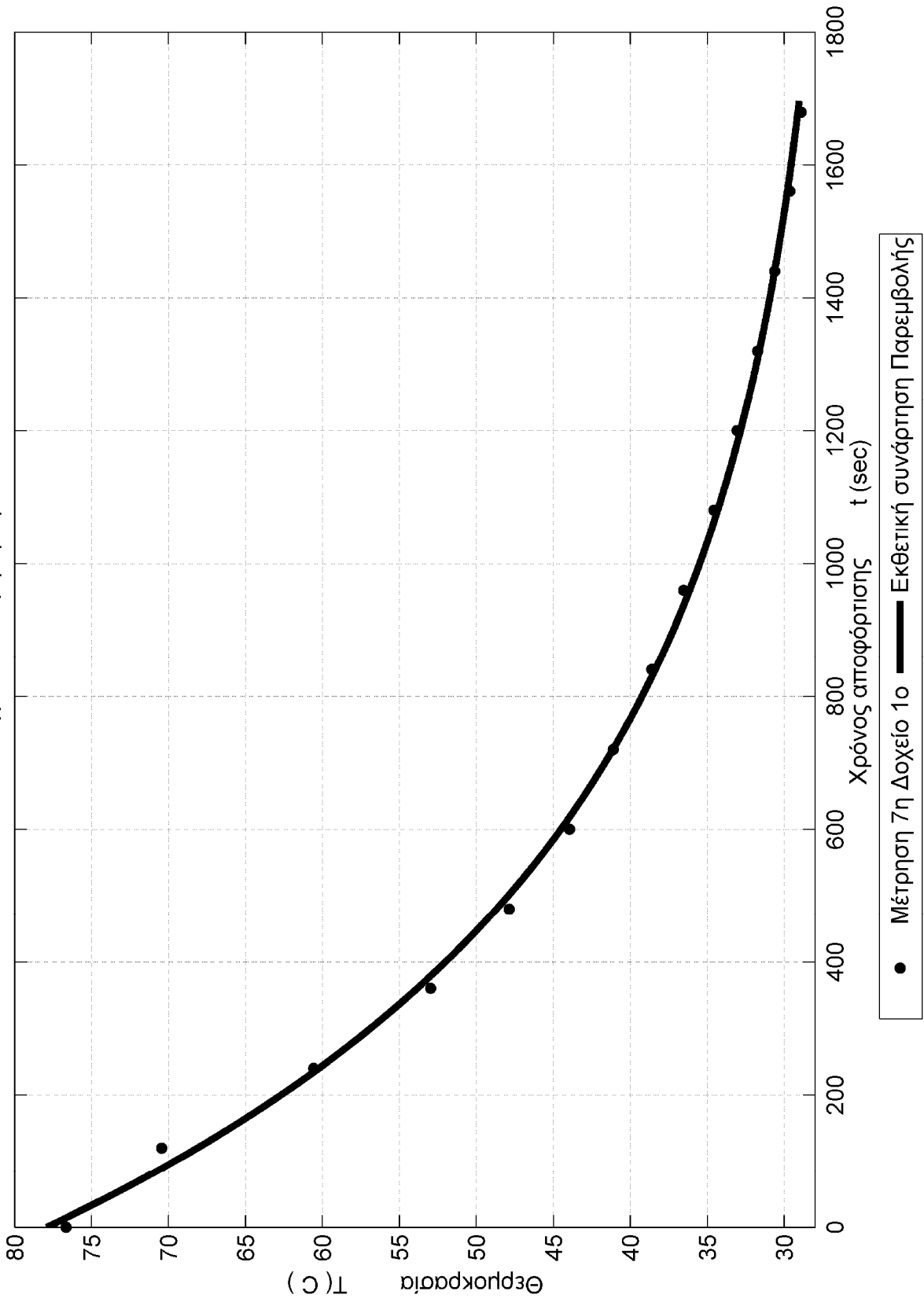
Μέτρηση 7<sup>η</sup> Δοχείο 3<sup>ο</sup> :

- $a = 20.88$
- $b = -0.002597$
- $c = 56.96$
- $d = -0.0001952$

Επίσης παίρνουμε τα παρακάτω διαγράμματα που δείχνουν τις συναρτήσεις προσέγγισης των μετρήσεων σε σχέση με τις μετρήσεις.

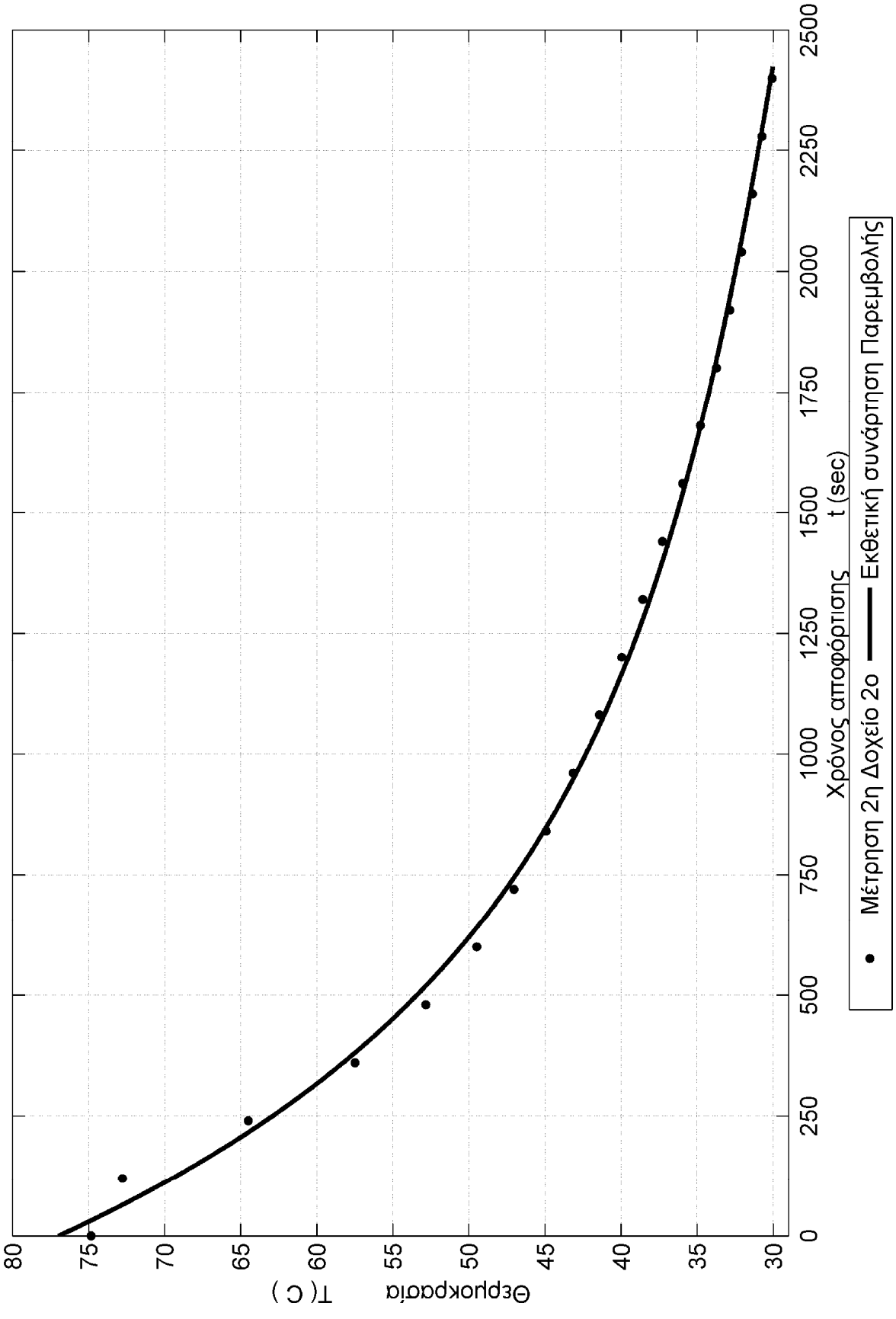
Από ότι φαίνεται η μετρήσεις προσεγγίζονται πολύ καλά από την (Εξ.110)

Προσέγγιση Πειραματικών Μετρήσεων με Εκθετική Συνάρτηση  
Δοχείο 1ο Μέτρηση 7η

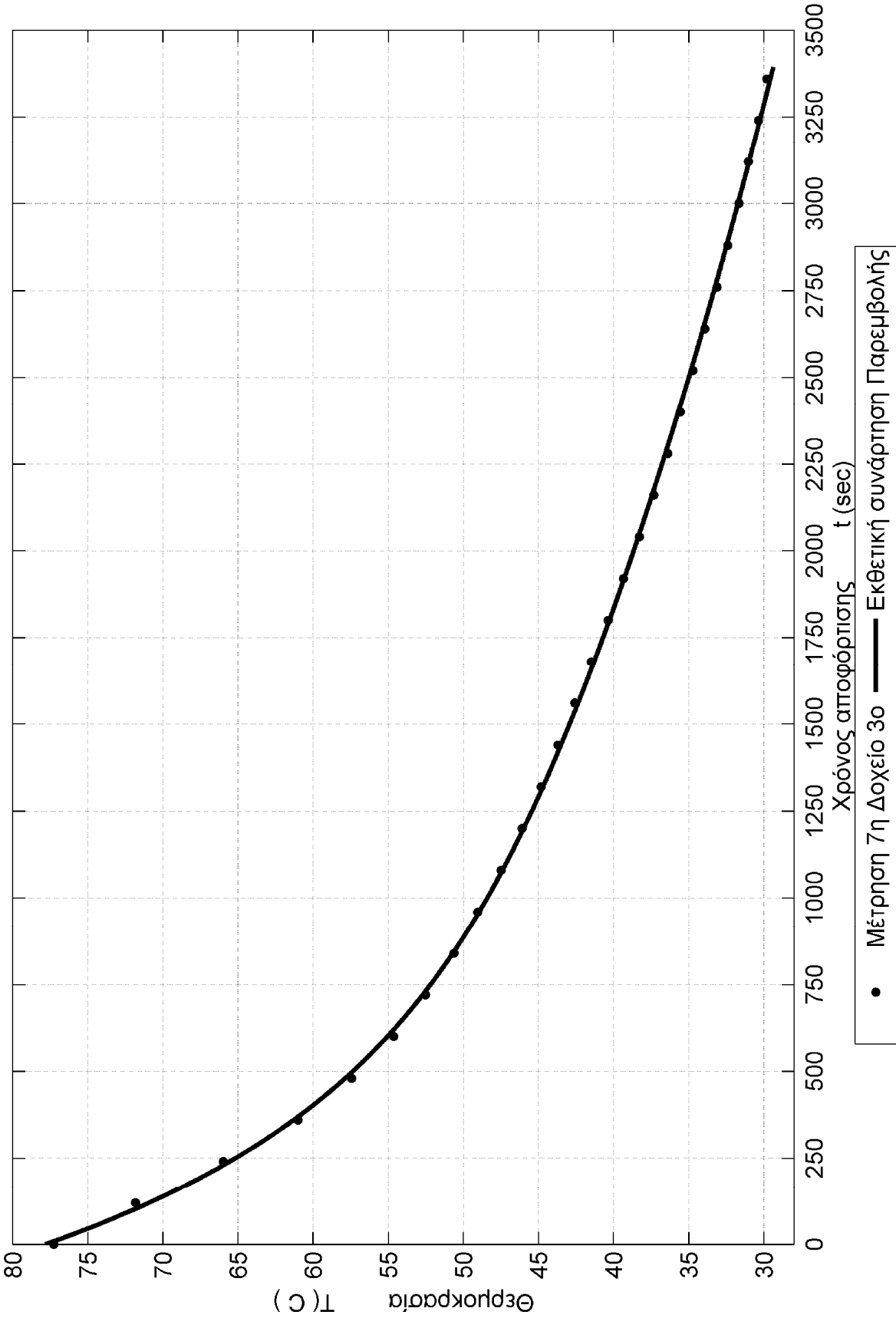




Προσέγγιση Πειραματικών Μετρήσεων με Εκθετική Συνάρτηση  
Δοχείο 2ο Μέτρηση 2η



Προσέγγιση Πειραματικών Μετρήσεων με Εκθετική Συνάρτηση  
Δοχείο 3ο Μέτρηση 7η



## Βήμα 2°

Έχοντας τώρα τις συναρτήσεις που προσεγγίζουν τις πειραματικές μετρήσεις, για να βγάλουμε μία ενιαία συνάρτηση για δοχεία οποιοδήποτε ύψους θα προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε την μεταβολή των συντελεστών της συνάρτησης της εκάστοτε μέτρησης ανάλογα με το ύψος.

Η συναρτήσεις που παίρνουμε για τις τρεις μετρήσεις που διαλέξαμε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 18 : Συναρτήσεις Προσέγγισης Μετρήσεων				
Δοχείο	Ύψος H(mm)	Μέτρηση	Παροχή ml/sec	Προσεγγιστική Συνάρτηση
1°	150mm	7 <sup>n</sup>	1.37	$T_1(x_1) = 49.67 \cdot \exp(-0.001806 \cdot x_1) + 28.67 \cdot \exp(-0.0000332 \cdot x_1)$
2°	300mm	2 <sup>n</sup>	1.36	$T_2(x_2) = 34.16 \cdot \exp(-0.001825 \cdot x_2) + 42.84 \cdot \exp(-0.0001521 \cdot x_2)$
3°	450mm	7 <sup>n</sup>	1.39	$T_3(x_3) = 20.88 \cdot \exp(-0.002597 \cdot x_3) + 56.96 \cdot \exp(-0.0001952 \cdot x_3)$

Αντιστοιχίζοντας κάθε συντελεστή a,b,c,d με το εκάστοτε ύψος του δοχείου θα έχουμε 3 σημεία κάθε φορά (για κάθε συντελεστή) τα οποία μπορούν να προσεγγιστούν από μία συνάρτηση δηλαδή:

- $a = a(H)$
- $b = b(H)$
- $c = c(H)$
- $d = d(H)$

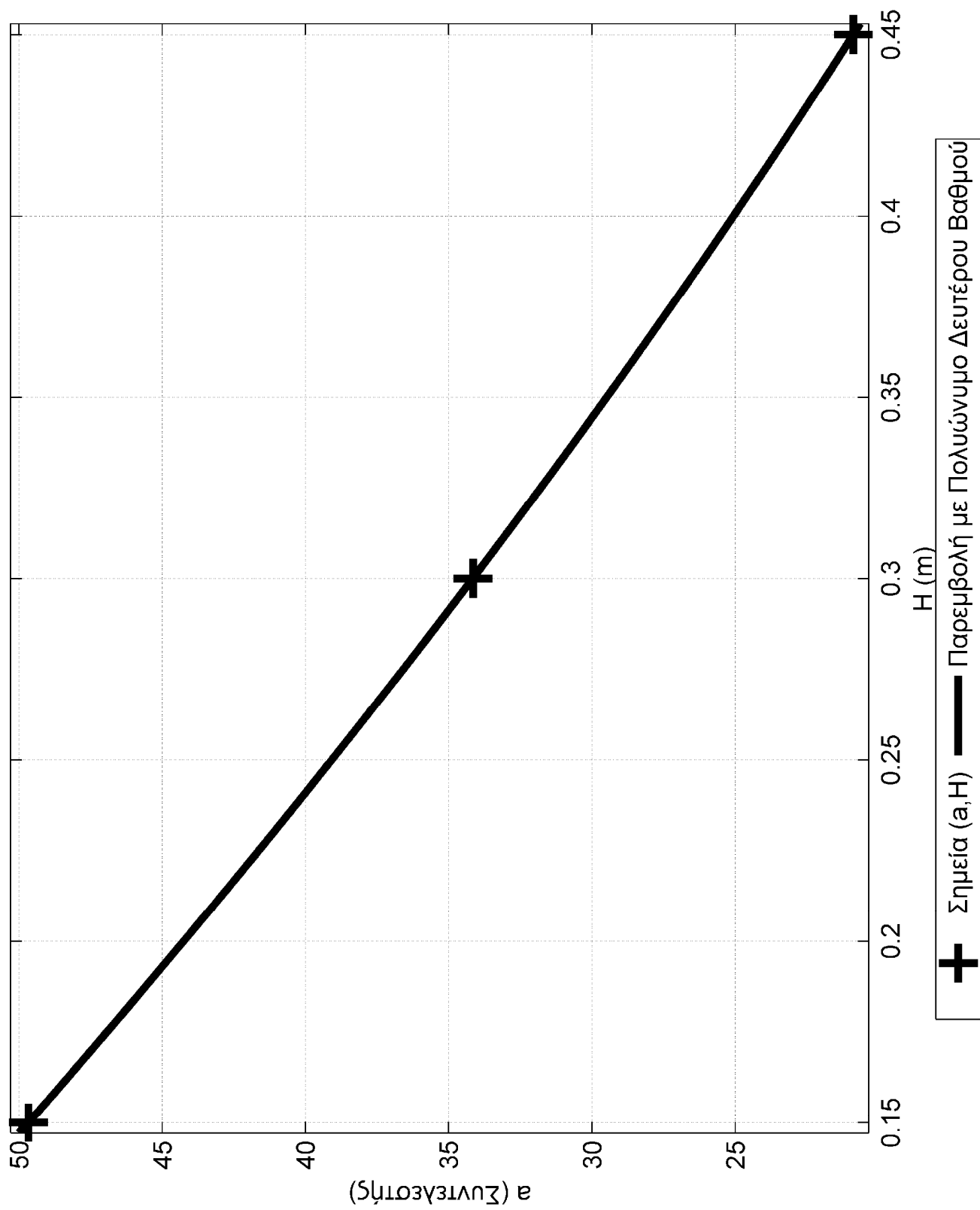
Θα κάνουμε χρήση πάλι του λογισμικού Matlab ακριβώς με τον ίδιο τρόπο με πριν, μόνο που τώρα η παρεμβολή δεν θα γίνει με την (Εξ.110) αλλά με ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού:

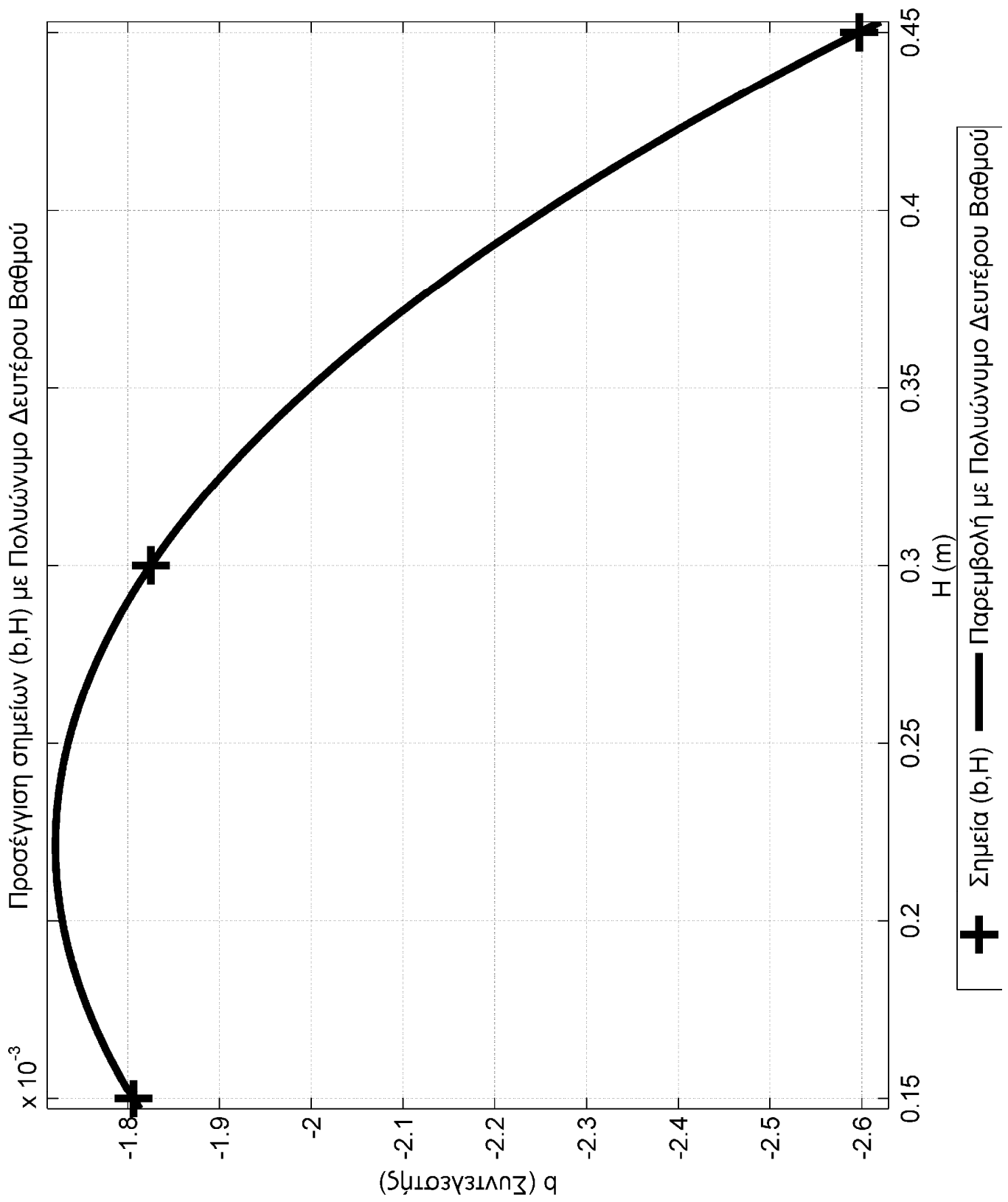
$$f(x) = p_1 \cdot x^2 + p_2 \cdot x + p_3 \quad (111)$$

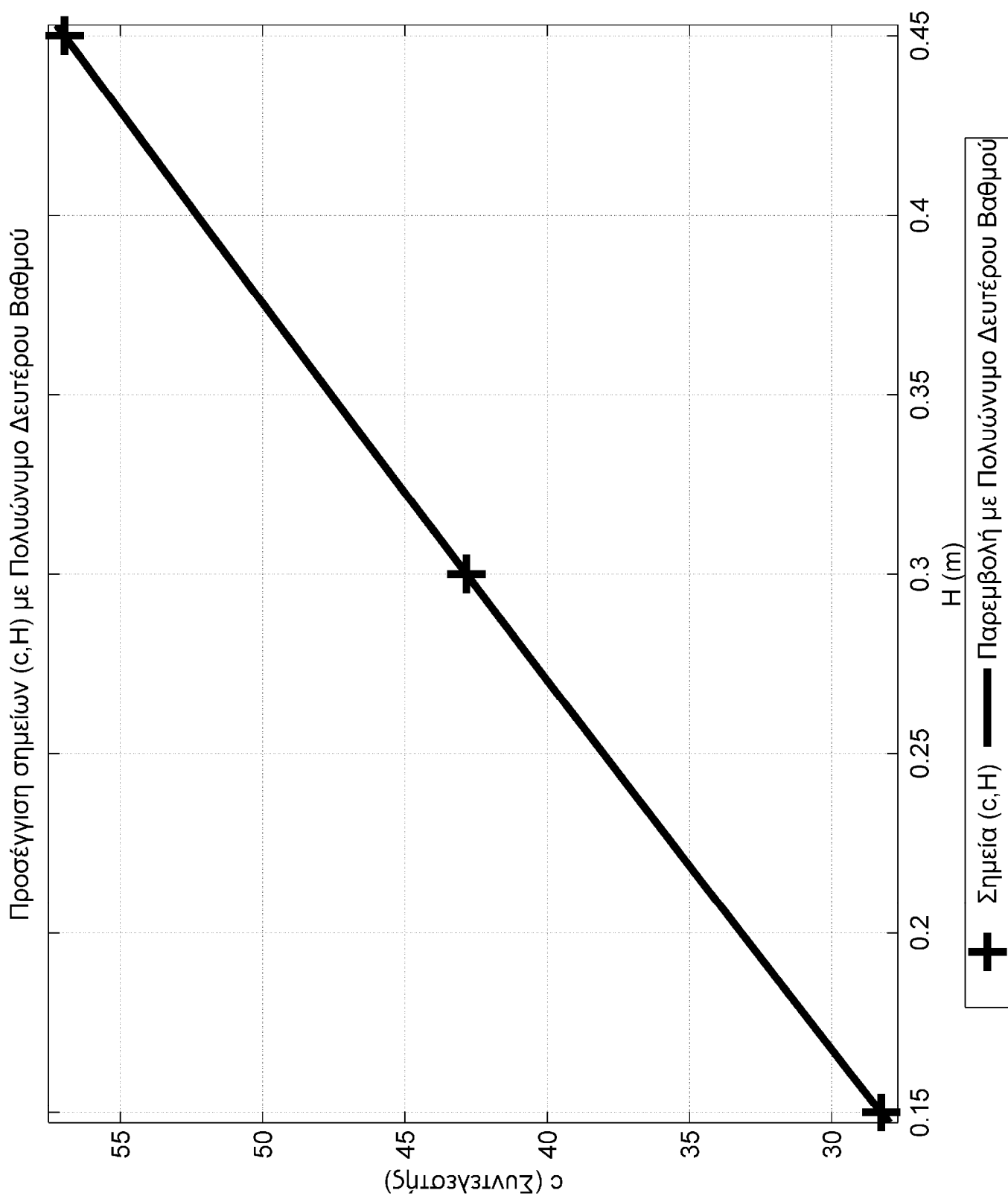
Ακολουθούν τα διαγράμματα των προσεγγιστικών συναρτήσεων που παίρνουμε από το λογισμικό Matlab για τα σημεία (a,H),(b,H),(c,H),(d,H)

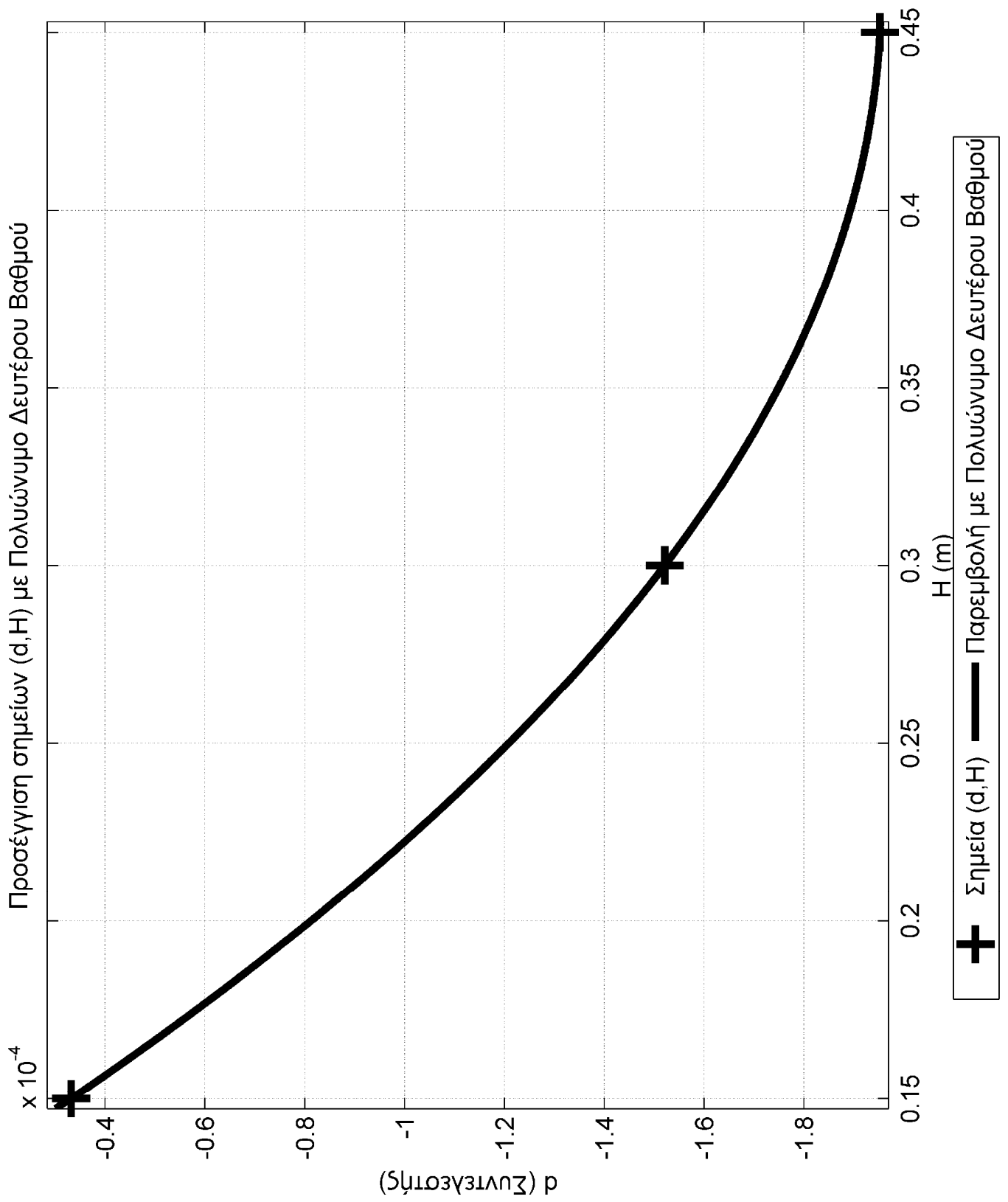
Πίνακας 19 : Συντελεστές a,b,c,d				
<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>H</b>
49.67	-0.001806	28.27	-0.0000332	150mm
34.16	-0.001825	42.84	-0.0001521	300mm
20.88	-0.002597	56.96	-0.0001952	450mm

Προσέγγιση σημείων (a,H) με Πολυώνυμο Δευτέρου Βαθμού









Η παραπάνω προσεγγίσεις μας δίνουν τα πολυώνυμα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Πίνακας 20 : Πολυώνυμα 2<sup>ου</sup> Βαθμού των a,b,c,d</b>	
a	$a(H) = 49.56 \cdot H^2 - 125.7 \cdot H + 67.41$
b	$b(H) = -0.01673 \cdot H^2 + 0.007403 \cdot H - 0.00254$
c	$c(H) = -10 \cdot H^2 + 101.6 \cdot H + 13.25$
d	$d(H) = 0.001684 \cdot H^2 - 0.001551 \cdot H + 0.0001615$

Με τους συντελεστές των πολυωνύμων να είναι :

<b>Πίνακας 21: Συντελεστές των πολυωνύμων των a,b,c,d</b>			
Συνάρτηση	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$
$a(H)$	49.56	-125.7	67.41
$b(H)$	-0.01673	0.007403	-0.00254
$c(H)$	-10	101.6	13.25
$d(H)$	0.001684	-0.001551	0.0001615

Βήμα 3<sup>ο</sup>

Τώρα μπορούμε να φτιάξουμε την τελική μας συνάρτηση  $T(t,H)$ .

- Εκφράσαμε την θερμοκρασία εξόδου του νερού από το δοχείο συναρτήσει του χρόνου αποφόρτισης για κάθε μία από τις τρεις μετρήσεις κάνοντας παρεμβολή με μία εκθετική συνάρτηση τεσσάρων συντελεστών.
- Εκφράσαμε κάθε συντελεστή a,b,c,d της (Εξ.110) συναρτήσει του ύψους (H) του εκάστοτε δοχείου ώστε να μην εκφράζεται η θερμοκρασία T κάθε δοχείου από μία διαφορετική συνάρτηση T(t) αλλά για τα δοχεία διαφορετικού H να έχουμε μία ενιαία συνάρτηση T(t,H).

Οπότε αντικαθιστώντας τους συντελεστές a,b,c,d με τις  $a(H), b(H), c(H), d(H)$  στην (Εξ.110) παίρνουμε την γενική σχέση που περιγράφει την θερμοκρασία T για δοχεία διαφορετικού ύψους H.

$$T(t, H) = a(H) \cdot \exp[b(H) \cdot t] + c(H) \cdot \exp[d(H) \cdot t] \quad (112)$$

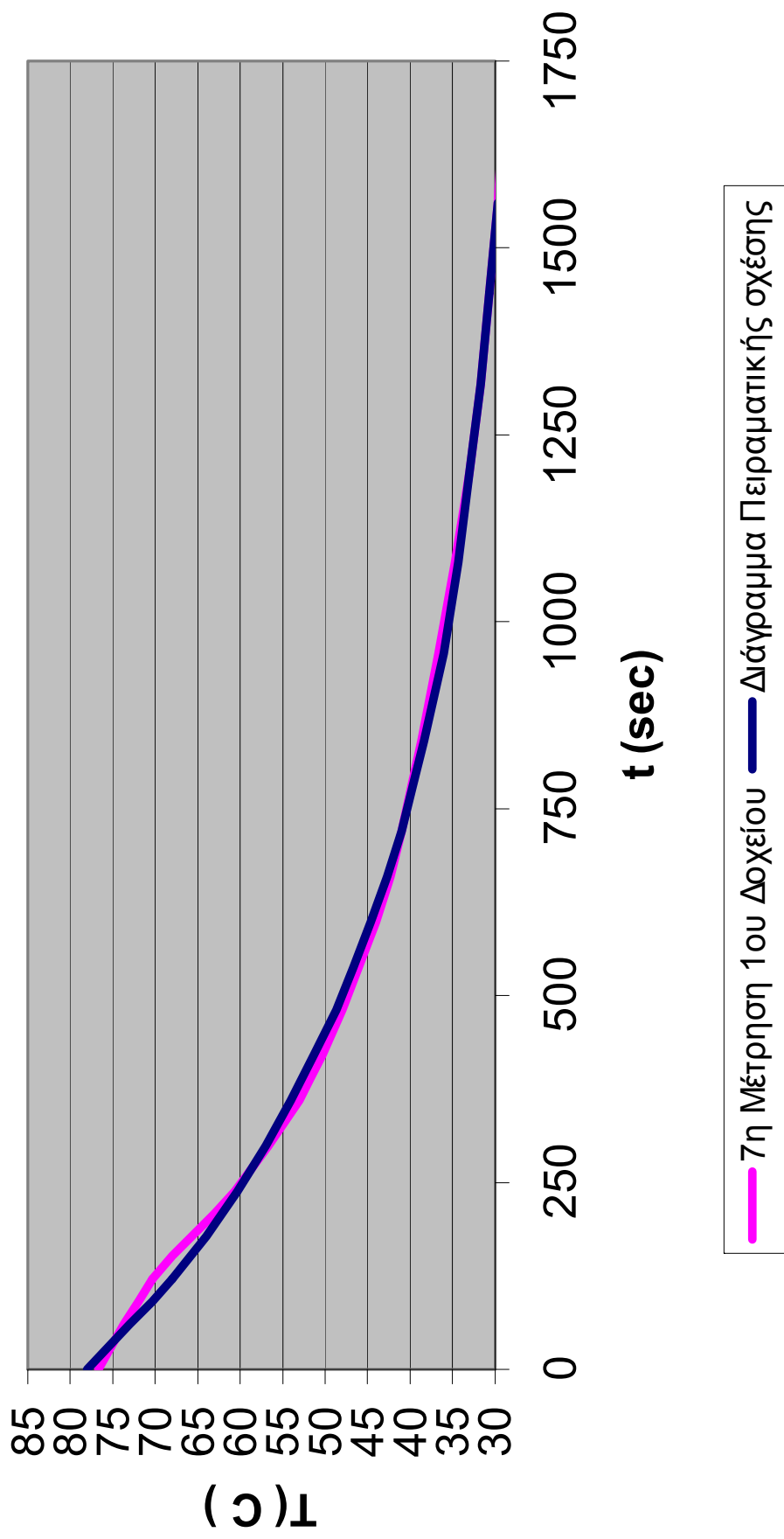
Κάνοντας χρήση της (Εξ.112) με:

- $H=0,15 \text{ m}$  ,  $t=0 - 1750 \text{ sec}$  (Μέτρηση 7<sup>η</sup> Δοχείο 1<sup>ο</sup>)
- $H=0,3 \text{ m}$  ,  $t=0 - 2500 \text{ sec}$  (Μέτρηση 2<sup>η</sup> Δοχείο 2<sup>ο</sup>)
- $H=0,45 \text{ m}$  ,  $t=0 - 3500 \text{ sec}$  (Μέτρηση 7<sup>η</sup> Δοχείο 3<sup>ο</sup>)

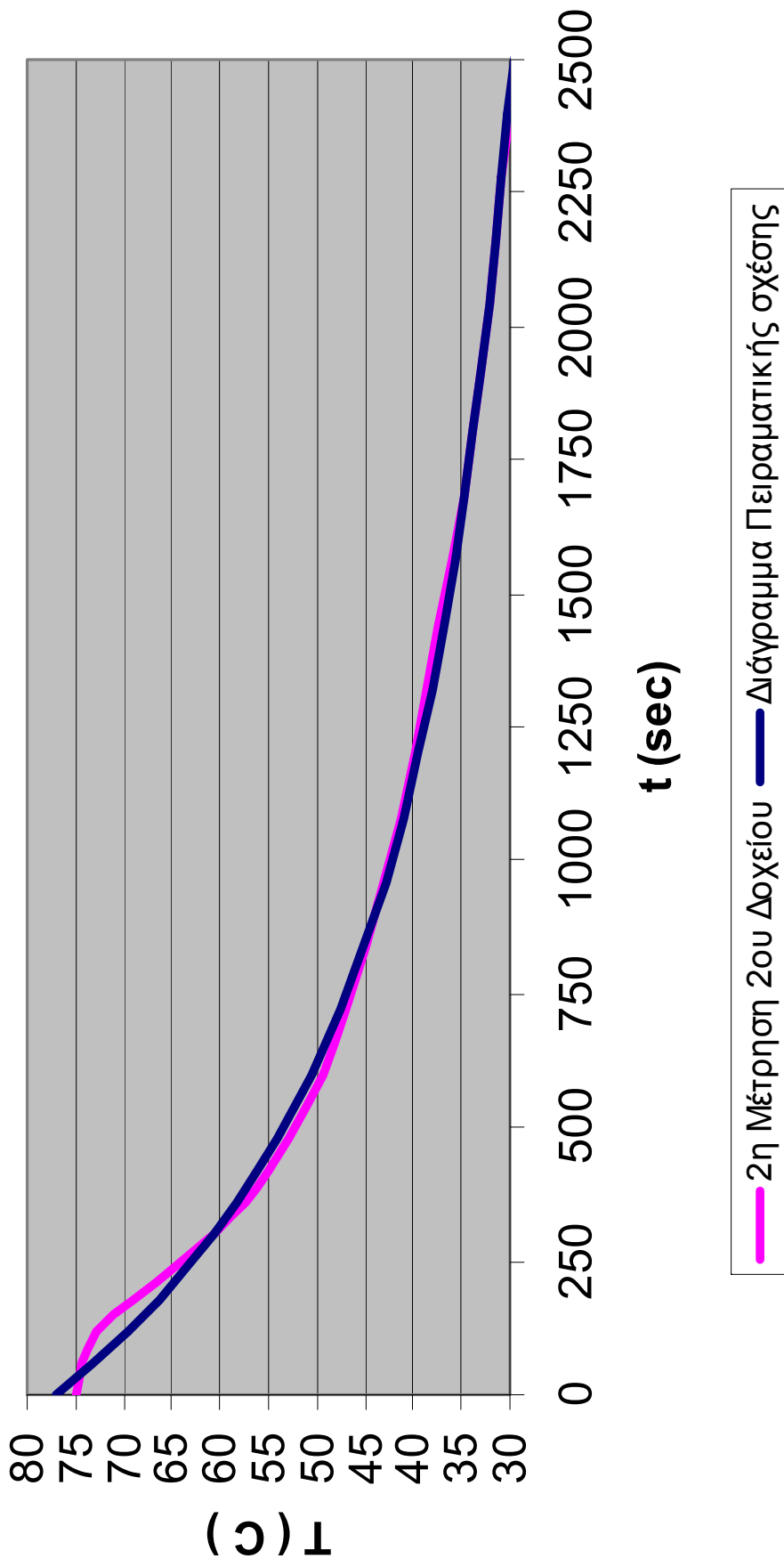
Παίρνουμε την πρόβλεψη της θερμοκρασίας T από την σχέση (Εξ.112) και την συγκρίνουμε με τα πραγματικά δεδομένα που έχουμε μετρήσει.



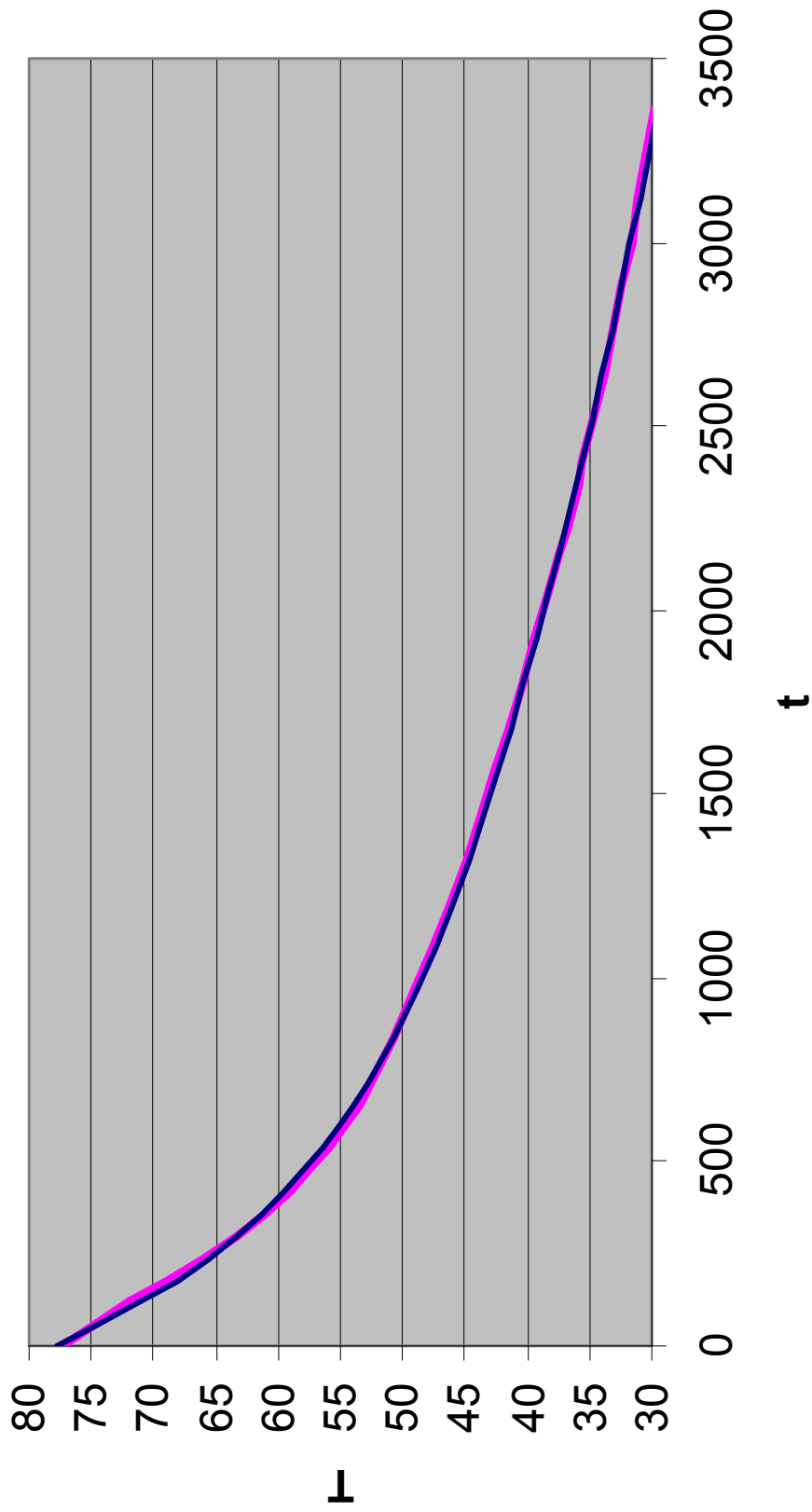
## Σύγκριση Πραγματικό Διαγράμμα-Διάγραμμα Πειραματικής σχέσης



## Σύγκριση Πραγματικό Διαγράμμα-Διάγραμμα Πειραματικής σχέσης



## Σύγκριση Πραγματικό Διαγράμμα-Διάγραμμα Πειραματικής σχέσης



Από τα τρία παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι η πειραματική σχέση μας , προσεγγίζει πάρα πολύ καλά τις πραγματικές μετρήσεις.

Ο στόχος μας όμως ήταν να καταστρώσουμε μία σχέση η οποία θα είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας σε δοχεία μεγαλύτερα από αυτά που κατασκευάσαμε. Όποτε αφού επαληθεύσαμε ότι η (Εξ.112) προσεγγίζει τα δεδομένα μας θα προσπαθήσουμε να βρούμε το άνω όριο της τιμής του ύψους για το οποίο η σχέση, μας δίνει λογικά αποτελέσματα.

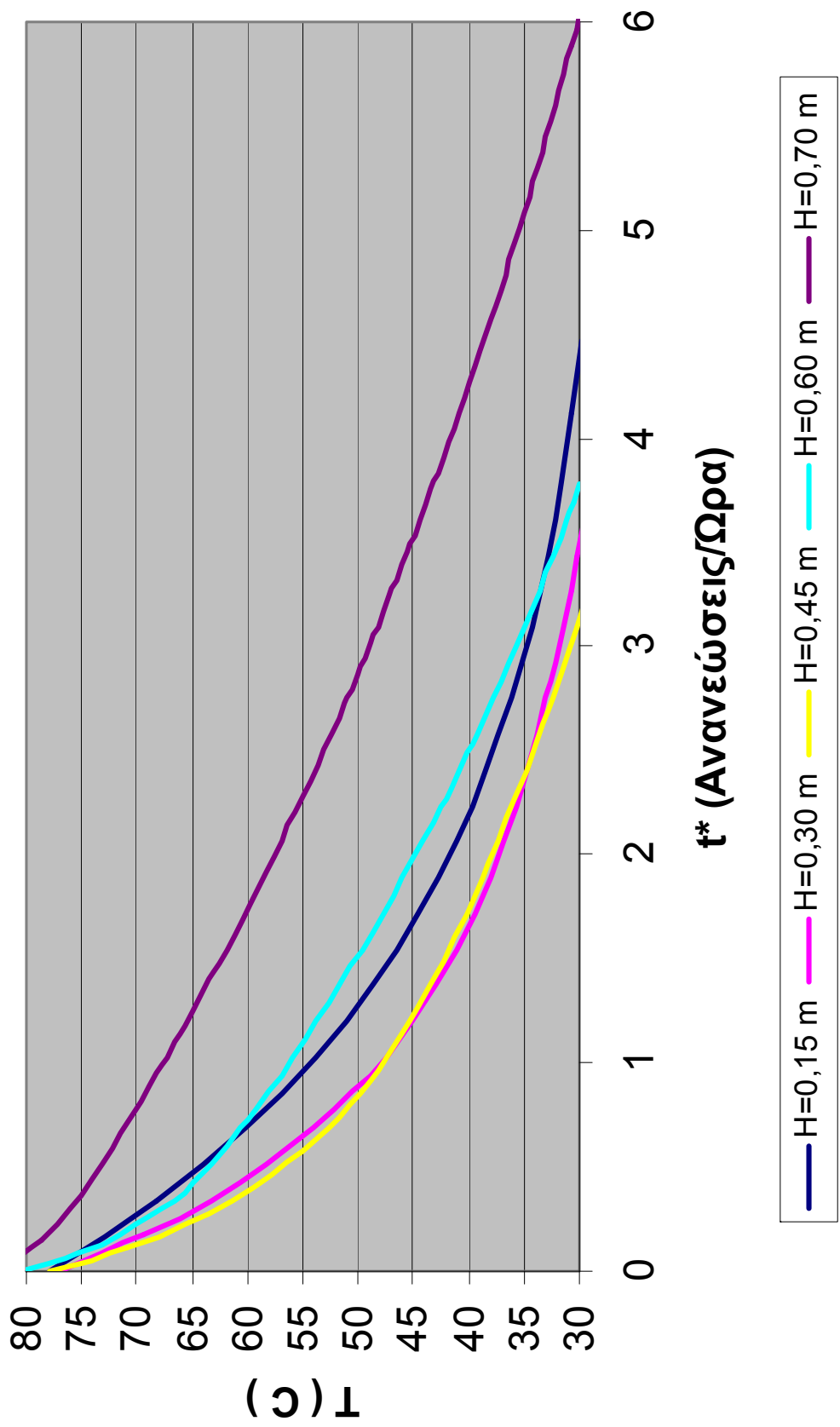
Οπότε κάνουμε χρήση της (Εξ.112) για την κατασκευή διαγράμματος στο οποίο θα φαίνεται η συγκρίσει των δοχείων με ίδια παροχή και:

- $H=0,15 \text{ m}$  ,  $t=0 - 1750 \text{ sec}$  (Μέτρηση 7<sup>η</sup> Δοχείο 1<sup>ο</sup>)
- $H=0,30 \text{ m}$  ,  $t=0 - 2500 \text{ sec}$  (Μέτρηση 2<sup>η</sup> Δοχείο 2<sup>ο</sup>)
- $H=0,45 \text{ m}$  ,  $t=0 - 3500 \text{ sec}$  (Μέτρηση 7<sup>η</sup> Δοχείο 3<sup>ο</sup>)
- $H=0,60 \text{ m}$  ,  $t=0 - 5280 \text{ sec}$  (Πρόβλεψη για μεγαλύτερο Δοχείο)
- $H=0,70 \text{ m}$  ,  $t=0 - 9840 \text{ sec}$  (Πρόβλεψη για μεγαλύτερο Δοχείο)

Και για να μπορούμε να συγκρίνουμε τα δοχεία μεταξύ τους θα κάνουμε χρήση της (Εξ.109) αδιαστατοποιώντας τον χρόνο αποφόρτισης και χρησιμοποιώντας έτσι στον άξονα «y» αντί για χρόνο τις ανανεώσεις ανά ώρα ( $t^*$ ) του εκάστοτε δοχείου

*Ακολουθεί το διάγραμμα*

**Αποφόρτιση Δοχείων με RCM που Προκύπτει από την  
Πειραματική Σχέση (Εξ.112)**



### 9.9.3 Συμπεράσματα

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα η συμπεριφορά των δοχείων με  $H=0,15m$  ,  $H=0,30m$  ,  $H=0,45m$  ,  $H=0,60m$  είναι παρόμοια αφού για την ίδια παροχή η θερμοκρασία εξόδου του νερού κυμαίνεται περίπου στα ίδια όρια σε σχέση με τις ανανεώσεις του όγκου του νερού.

Παρολαυτά βλέπουμε ότι η σχέση δεν είναι αξιόπιστη για δοχεία με ύψος μεγαλύτερο από  $0,6m$  αφού το διάγραμμα του δοχείου με ύψος  $0,7m$  έχει εντελώς διαφορετική κλήση από τα άλλα τέσσερα διαγράμματα οπότε το σφάλμα στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς αυτού του δοχείου είναι μεγάλο.

Τέλος τα αποτελέσματα που δίνει η σχέση για  $H>0.75m$  δεν έχουν φυσική σημασία αφού η συνάρτηση δεν είναι πια φθίνουσα αλλά αύξουσα, που σημαίνει ότι η θερμοκρασία συνεχώς αυξάνεται το οποίο είναι άτοπο.

Τα όρια στα οποία μπορεί να λειτουργήσει η (Εξ.112) μπορεί να είναι μικρά και μπορεί να μην μπορούν να προβλέψουν την συμπεριφορά δοχείων πολύ μεγαλύτερων από αυτά που εξετάστηκαν. Η σχέση θα είχε πολύ μεγαλύτερα όρια από αυτά που βρήκαμε αν είχαν γίνει περισσότερες πειραματικές μετρήσεις σε πολλά ακόμα δοχεία , πράγμα όμως το οποίο ήταν δύσκολο λόγω κυρίως της αύξησης του κόστους που θα είχαμε για την εκτέλεση του πειράματος το οποίο ήδη ήταν υψηλό.

Παρολαυτά το αποτέλεσμα του πειράματος που έγινε σε αυτήν την διπλωματική εργασία θεωρείται ικανοποιητικό και είναι ένα πρώτο βήμα για την περεταίρω ανάλυση της ομοιότητας στην συμπεριφορά αποφόρτισης των δοχείων της οποίας μπορεί να γίνει χρήση για την ακριβή πρόβλεψη της θερμοκρασίας εξόδου και του χρόνου αποφόρτισης δοχείων πολύ μεγαλύτερων διαστάσεων εξετάζοντας δοχεία πολύ μικρά σε μέγεθος.

### 9.10 Προτάσεις για Μελλοντική Μελέτη

Το πείραμα που εκτελέσαμε επιδέχεται αρκετές βελτιώσεις τις οποίες δεν μπορέσαμε να κάνουμε κυρίως λόγω κόστους και χρόνου.

Ένα μελλοντικό πείραμα θα μπορούσε να γίνει με την βέλτιστη κατασκευή (π.χ παραφίνη εγκιβωτισμένη σε σφαίρες, αντί για ορείχαλκο κάποιο άλλο υλικό που να μεταδίδει καλύτερα την θερμότητα) από την άποψη απόδοσης (μεγάλη αποθήκευση) η οποία θα είχε πολύ περισσότερη παραφίνη κατ' όγκο όπως και μεγαλύτερη επιφάνεια συναλλαγής έτσι ώστε και η διαφορές μεταξύ των δοχείων θερμού νερού και των δοχείων με PCM να είναι περισσότερο εμφανής αλλά και η ίδια η μελέτη να γίνεται πάνω σε ένα προϊόν το οποίο θα ήταν προσοδοφόρο να κατασκευαστεί και να πουληθεί.

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων συναντήσαμε αρκετά προβλήματα στην μέτρηση της παροχής, η οποία δεν κρατούσε μία σταθερή τιμή αλλά ήταν φθίνουσα όσο ελαττωνόταν η θερμοκρασία. Αυτό οφειλόταν είτε σε άλατα τα

οποία περιέχονται στο δίκτυο ύδρευσης του Ε.Μ.Π όπου και έγιναν οι μετρήσεις , είτε στην συστολή και την διαστολή της βελονοειδούς βάνας μιας και η ρυθμίσεις της παροχής ήταν πολύ μικρές είτε στην μεταβολή της πυκνότητας του νερού ανάλογα με την θερμοκρασία , είτε τέλος σε σφάλματα του μετρητικού οργάνου της μέτρησης της παροχής.

Σε ένα αντίστοιχο μελλοντικό πείραμα κάποιες λύσεις για αυτό το πρόβλημα θα ήταν η αγορά μίας βελονοειδούς βάνας με καλύτερες προδιαγραφές , όπως και ενός μετρητικού οργάνου με μεγαλύτερη ακρίβεια και ευαισθησία ενώ τέλος θα μπορούσε να γίνει χρήση νερού χωρίς πολλά άλατα.

Τέλος για μία πιο ολοκληρωμένη ανάλυση πάνω στην ομοιότητα παρεμφερών δοχείων με αυτά που έχουμε μελετήσει σε αυτή την διπλωματική εργασία, θα πρέπει να κατασκευαστούν και να μετρηθούν περισσότερα δοχεία από τρία, ενώ επίσης θα μπορούσε να γίνει τρισδιάστατη ανάλυση των δοχείων αυτών με υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης για την καλύτερη σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων.

## **Ευχαριστήριο Σημείωμα**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Λευτέρη Κραββαρίτη για την πολύτιμη βοήθεια του τόσο στον τομέα της κατασκευής της διάταξης όσο και στην γενική μορφή που πήρε αυτή η Διπλωματική εργασία , επιπλέον θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις ατελείωτες ώρες που ήταν μαζί μου στο εργαστήριο ακόμη και την παραμονή των Χριστουγέννων ώστε να γίνει σωστά η διεξαγωγή των μετρήσεων.

Ακόμη ιδιαίτερα ευχαριστώ στον Κύριο Κίμων Αντωνόπουλο (Επιβλέπων Καθηγητής Ε.Μ.Π) για τις πολύτιμες συμβουλές του, ιδιαίτερα στο κομμάτι τις ομοιότητας των δοχείων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κύριο Παναγιώτη Δεδεδήμο και τον κύριο Βασίλη Τεχνίτη που με την εμπειρία τους με βοήθησαν να κατασκευάσω τα δοχεία και να βρω τα διάφορα υλικά που χρειαζόντουσαν για την κατασκευή.



## **10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1)ΞΕΝΟΦΩΝ ΚΑΚΑΤΣΙΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π, Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης, Εκδόσεις Σημειών Αθήνα 2006

2)Harald Mehling-Luisa F. Cabeza, Heat and cold Storage with PCM, an up to date introduction into basics and applications, Springer 2008

3)Ibrahim Dincer & Marc a.Rosen, Thermal energy Storage and applications, Wiley Editions

4)Frank Kreith – Mark S.Bohn, Principles of Heat Transfer fifth edition, PWS Publishing Company

5)Hans Dieter Baehr-Karl Stephan, Heat and Mass Trasfer, Springer

6)Yunus A.Cengel, Heat and Mass Transfer a practical approach, McGawn Hill book company

7)ΑΝΔΡΕΑΣ Ε. ΜΟΣΧΑΤΟΣ, Ηλιακή Ενέργεια- Συνιστώσες της Ηλιακής θερμικής Διαδικασίας , Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδος

8)ΚΙΜΩΝ Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ, Κλιματισμός, Έκδοσης Ε.Μ.Π

9)Α.Χ.ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΙΔΗΣ-Β.ΧΡΥΣΑΦΙΔΗΣ-Β.ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ, Δυναμική Συμπεριφορά Αποθήκης Θερμότητας σε Στρώμα Υλικών που Αλλάζουν Φάση.

10)Μ.ΓΑΖΕΛΑ, Διεποχιακή Αποθήκευση Ηλιακής Ενέργειας, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π τμήμα Μηχ. Μηχ.

11)Amos Gilat, MATLAB an introduction with applications-Third edition, John Wiley and Sons

12) B.Zalba-J.MaMarin-Luisa F.Cabeza-H.Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering 2003

13) G.Lane, Solar Heat Storage Latent Heat Material, Vol I-II

14)D.M.Rohsenow-J.P.Hartnett-E.N.Ganic, Handbook of Heat Transfer Applications, McGraw Hill Book Company

### **Διαδικτυακοί Τόποι (Ιστοσελίδες)**

1) <http://www.epa.gov/airlinks>

2) <http://www.CSO.ie/statistics/acidrainozone.htm>

3) <http://www.Cristopia.com>

- 4) <http://www.Rubitherm.com>
- 5) <http://www.cres.gr>
- 6) <http://www.lib.ntua.gr>
- 7) <http://www.va-q-tec.de>
- 8) <http://www.deltat.de>
- 9) <http://findarticles.com>
- 10) <http://www.sciencedirect.com>
- 11) <http://www.mjm-engineering.com>
- 12) <http://www.climator.com>
- 13) <http://www.mongabay.com>
- 14) <http://www.epa.gov>

Από τις παραπάνω ιστοσελίδες πάρθηκαν φωτογραφίες καθώς και στατιστικά στοιχεία.