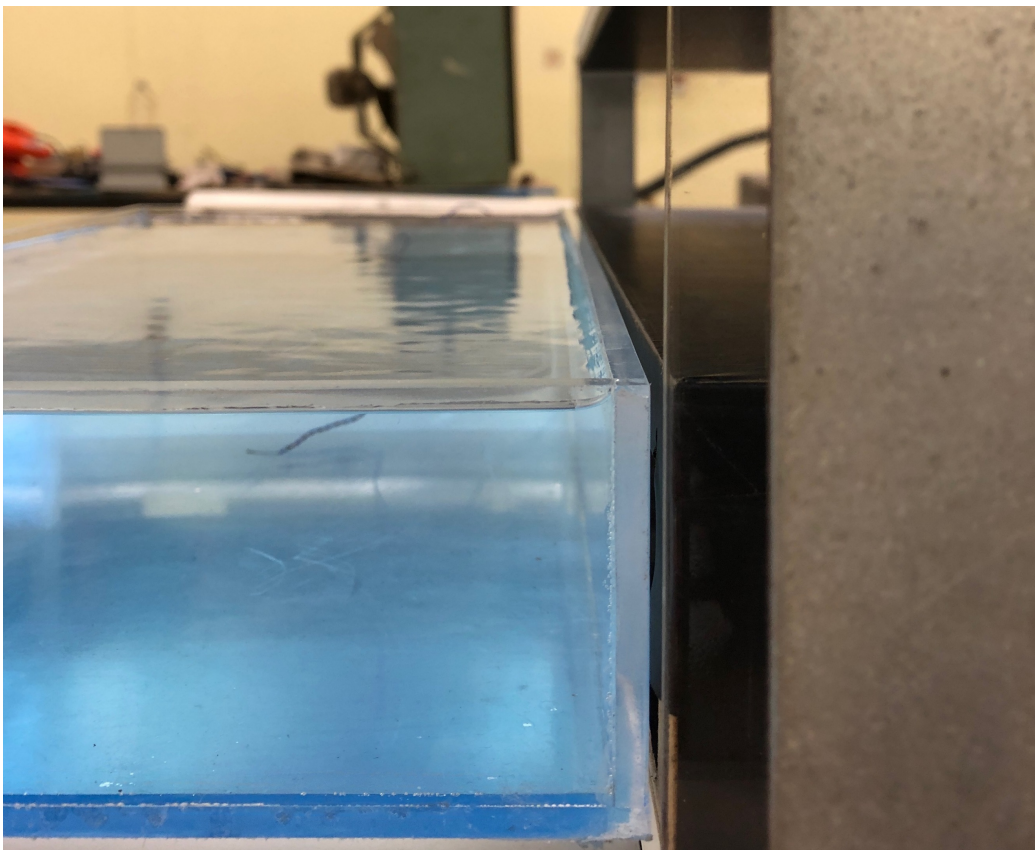


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΞΑΤΜΙΣΤΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΝΕΡΟΥ



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΜΑΝΙΑΤΗΣ ΦΟΙΒΟΣ (Α.Μ. 6881)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΑΔΑΚΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2020

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου στο εργαστήριο θέρμανσης ψύξης κλιματισμού και αναφέρεται στον υπολογισμό σχέσεων μέσω πειράματος για τον καθορισμό του ρυθμού εξατμιστικής ψύξης πάνω από ελεύθερες επιφάνειες νερού. Η εξατμίσση του νερού αποτελεί μια πολυπαραμετρική διαδικασία η οποία υπολογίζεται από εμπειρικές σχέσεις και σκοπός αυτής της εργασίας είναι η δημιουργία τέτοιων σχέσεων για τις διαφορετικές συνθήκες των πειραμάτων και η σύγκρισή τους με υπάρχοντες από την διεθνή βιβλιογραφία.

Αρχικά αναλύεται το ενεργειακό ισοζύγιο για τις κολυμβητικές δεξαμενές και η επίδραση των απωλειών θερμότητας. Στην συνέχεια αναπτύσσονται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για την καταγραφή των μετρήσεων και οι υπολογισμοί οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με ανάλυση των θερμικών απωλειών και ο υπολογισμός του ρυθμού εξατμίσσης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις εμπειρικές σχέσεις οι οποίες επιλέχθηκαν.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Γιανναδάκη Αθανάσιο για την βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθώς επίσης και τον καθηγητή Ρωμαίο Αλέξανδρο για την πολύτιμη βοήθειά του στην διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων.

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής (Ονοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την ανάλυση των θερμικών απωλειών σε κολυμβητικές δεξαμενές με έμφαση στο φαινόμενο της εξάτμισης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα στις διαφορετικές παραμέτρους του πειράματος.

Οι στόχοι αυτής της εργασίας είναι:

1. Ο προσδιορισμός του καθεστώτος ροής και του είδους της συναγωγής ανάλογα με τις παραμέτρους της ταχύτητας του αέρα και του προσανατολισμού.
2. Ο υπολογισμός των απωλειών και ο υπολογισμός του ποσοστού των απωλειών κάθε μηχανισμού.
3. Η σύγκριση του ρυθμού εξάτμισης του νερού ανάμεσα στις παραμέτρους του πειράματος οι οποίες επιλέχθηκαν να είναι: η ταχύτητα του αέρα, ο προσανατολισμός του μοντέλου της δεξαμενής σε σχέση με το ρεύμα αέρα και η αρχική θερμοκρασία του νερού. Η παραμετρική μελέτη της επίπτωσης της μεταβολής της ταχύτητας του αέρα και του προσανατολισμού της δεξαμενής στον ρυθμό εξάτμισης του νερού.
4. Η ανάπτυξη σχέσεων για τον ρυθμό εξάτμισης αδιατάρακτης επιφάνειας νερού, μέσω της πειραματικής διάταξης που έχει χρησιμοποιηθεί και σύγκρισή του με ήδη εμπειρικές που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία.
5. Η συσχέτιση μεταξύ της απώλειας μάζας και πτώσης θερμοκρασίας

Η ανάπτυξη της εργασίας γίνεται σε 6 κεφάλαια. Στην εισαγωγή και στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται οι μηχανισμοί μεταφοράς μάζας και θερμότητας που επηρεάζουν το πείραμα το οποίο πραγματοποιήθηκε και οι διαφορετικοί τύποι του μηχανισμού της συναγωγής. Επίσης αναλύεται το ενεργειακό ισοζύγιο για κολυμβητικές δεξαμενές με μία περιγραφή για τις απώλειες οι οποίες αναλύονται σε αυτήν την εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναγράφονται οι στόχοι της εργασίας. Οι υπολογισμοί οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα και τα αποτελέσματα τα οποία αναμένουμε.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάπτυξη και λεπτομερής περιγραφή της πειραματικής μεθόδου. Αυτό συμπεριλαμβάνει την πειραματική διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εργασία, με αναφορά σε συσκευές, μετρητικά όργανα και εργαλεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις. Αναγράφεται επίσης λεπτομερώς η διαδικασία με την οποία καταγράφηκαν οι μετρήσεις και οι διαφορετικές παράμετροι του πειράματος οι οποίες είναι ο προσανατολισμός της κολυμβητικής δεξαμενής και η ταχύτητα του αέρα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η διαδικασία για την επεξεργασία των δεδομένων που καταγράφηκαν. Πραγματοποιείτε αναφορά στους υπολογισμούς οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν για να προσδιοριστούν τα μεγέθη τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών και του ρυθμού

εξάτμισης όπως αδιάστατοι αριθμοί για τον προσδιορισμό ροής και συντελεστές θερμικών απωλειών. Γίνεται περεταίρω ανάπτυξη του ενεργειακού ισοζυγίου το οποίο αναφέρθηκε στην πρώτη ενότητα και αναπτύσσονται οι θερμικές απώλειες με τις σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό τους. Τέλος αναφέρονται τα εμπειρικά μοντέλα Smith, Shah, Carrier τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση με τα αποτελέσματα και συμπεράσματα αυτής της εργασίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, ο υπολογισμός των θερμικών απωλειών και η παρουσίαση τους σε σχέση με το ενεργειακό ισοζύγιο της δεξαμενής αλλά και σύγκριση των πειραματικών μεγεθών με τα εμπειρικά μοντέλα τα οποία παρουσιάστηκαν στο 4ο κεφάλαιο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ.....
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Μεταφορά Θερμότητας.....	1
Ο Μηχανισμός της Συναγωγής	1
Φυσική συναγωγή.....	1
Εξαναγκασμένη συναγωγή	2
Μικτή συναγωγή	3
1.2 Μεταφορά Μάζας	3
Τάση Ατμών.....	3
Εξάτμιση	4
Εξατμιστική ψύξη	5
2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΚΟΛΥΜΒΗΤΙΚΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ	6
2.1 Θερμικές απώλειες.....	6
2.2 Θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής	6
2.3 Θερμικές απώλειες λόγω εξάτμισης.....	7
2.4 Θερμικές απώλειες λόγω ακτινοβολίας.....	8
2.5 Θερμικές απώλειες λόγω αναπλήρωσης	8
2.6 Θερμικές απώλειες λόγω αγωγής με το έδαφος και τα τοιχώματα.....	9
2.7 Θερμικά κέρδη	9
2.8 Θερμικά κέρδη λόγω ακτινοβολίας.....	9
2.9 Θερμικά κέρδη μέσω συστημάτων θέρμανσης	10
3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	11
3.1 Πειραματική διάταξη.....	11
3.2 Πειραματική διαδικασία	18
3.3 Πειραματικοί περιορισμοί	19
4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	20
4.1 Πειραματικές μετρήσεις.....	20
4.2 Ιδιότητες και σταθερές.....	21
4.3 Διαστάσεις δεξαμενής και σταθερές.....	22
4.4 Χαρακτηρίστηκα ροής, μεταφοράς θερμότητας και υπολογισμός αδιάστατων αριθμών.....	24
4.5 Μεταφοράς θερμότητας και μάζας	26
4.6 Εμπειρικές σχέσεις κατά Shah, Smith, Carrier.....	29

5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	31
5.1	Καθεστώς ροής, συναγωγή.....	31
5.2	Αριθμός Nusselt, συντελεστής συναγωγής	32
5.3	Θερμικές απώλειες και ποσοστά θερμικών απωλειών	35
5.3.1	Πτώση θερμοκρασίας	35
5.3.2	Θερμικές απώλειες	37
	Ελεύθερη Ροή	37
	Κάθετος προσανατολισμός, ταχύτητα αέρα 4.4 m/s	39
	Παράλληλος προσανατολισμός, ταχύτητα αέρα 4.4m/s.....	41
	Κάθετος προσανατολισμός, ταχύτητα αέρα 2.2m/s.	43
	Παράλληλος προσανατολισμός, ταχύτητα αέρα 2.2 m/s.....	44
5.4	Ρυθμός εξάτμισης	51
5.4.1	Απώλεια μάζας.....	51
5.4.2	Ρυθμός εξάτμισης.....	54
5.5	Εμπειρικές σχέσεις Shah, Smith, Carrier	57
5.5.1	Ρυθμός εξάτμισης.....	57
5.5.2	Θερμικές απώλειες	61
	Παράλληλος προσανατολισμός	61
	Κάθετος προσανατολισμός	63
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	65
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	66

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Re	= Αριθμός Reynolds
A	= Επιφάνεια
T	= Θερμοκρασία
Q	= Θερμικό φορτίο
h_{fg}	= Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης
ρ	= Πυκνότητα
E	= Ρυθμός εξάτμισης
h	= Συντελεστής συναγωγής
VP	= Τάση ατμών
v	= Ταχύτητα
L_c	= Χαρακτηριστικό μήκος
t	= Χρόνος

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Μεταφορά Θερμότητας

Ο Μηχανισμός της Συναγωγής

Συναγωγή ονομάζεται ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα σε ένα στερεό και ένα γειτονικό υγρό ή αέριο που βρίσκεται σε κίνηση. Ο μηχανισμός της συναγωγής χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη πολυπλοκότητα, λόγω του ότι περιλαμβάνει τις συνδυασμένες επιδράσεις της αγωγής και της κίνησης ενός ρευστού. Απουσία οποιουδήποτε βαρυσήμαντου όγκου ρευστού που βρίσκεται σε κίνηση, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ μιας στερεάς επιφάνειας και του παρακείμενου σε αυτήν ρευστού γίνεται εξολοκλήρου με τον μηχανισμό της αγωγής. Η μεταφορά θερμότητας με τον μηχανισμό της συναγωγής υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = h A (T_{body} - T_{\infty}) \quad (1)$$

Όπου h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή σε ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$). A είναι η επιφάνεια στην οποία λαμβάνει μέρος η μεταφορά θερμότητας, T_{body} είναι η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στερεού σώματος και T_{∞} η θερμοκρασία του ρευστού σε μεγάλη απόσταση από την διεπιφάνεια επαφής με το στερεό σώμα.

Κρίνοντας από τις μονάδες του, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μπορεί να ερμηνευθεί ως ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα σε μια στερεή επιφάνεια και ένα ρευστό, ως προς το εμβαδό του και ανά μονάδα διαφοράς θερμοκρασίας. Ο συντελεστής h δεν είναι ιδιότητα του ρευστού. Είναι μια παράμετρος που προσδιορίζεται πειραματικά οι τιμές της οποίας εξαρτώνται από το πλήθος των τιμών που επηρεάζουν την διεργασία της συναγωγής. Όπως είναι οι συνθήκες του οριακού στρώματος, η γεωμετρία της επιφάνειας και ένα πλήθος θερμοδυναμικών και ροϊκών ιδιοτήτων του ρευστού. Το h θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα καθώς ο υπολογισμός του είναι κομβικής σημασίας για τον προσδιορισμό των απωλειών και του ρυθμού εξάτμισης. (Lienhard IV & Lienhard V, 2018)

Ο μηχανισμός της συναγωγής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε 3 κατηγορίες οι οποίες είναι, η φυσική συναγωγή, η εξαναγκασμένη συναγωγή και η μικτή συναγωγή.

Φυσική συναγωγή

Ο μηχανισμός της φυσικής συναγωγής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την βαρύτητα και σε δυνάμεις που ασκούνται από το σώμα απευθείας στο ρευστό ως αποτέλεσμα της θέρμανσης ή της ψύξης του. Γνωρίζουμε πως ένα ζεστό αντικείμενο, όπως για

παράδειγμα η επιφάνεια του νερού σε ένα πιο ψυχρό περιβάλλον μετά από κάποιο χρονικό διάστημα θα φτάσει την θερμοκρασία του αέρα που το περικλείει. Η ψύξη αυτή που θα λάβει μέρος συμβαίνει μέσω του μηχανισμού της φυσικής συναγωγής και ερμηνεύεται ως εξής:

Μόλις η ζεστή επιφάνεια του νερού εκτεθεί στον ψυχρότερο αέρα, η θερμοκρασία της επιφάνειάς της θα μειωθεί και η θερμοκρασία του παρακείμενου αέρα που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια θα αυξηθεί. Επομένως, σύντομα το νερό θα περιβάλλεται από μια λεπτή μεμβράνη αέρα θερμότερου από αυτού του περιβάλλοντος και κατά συνέπεια θα αρχίσει να συμβαίνει μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στην μεμβράνη του αέρα που βρίσκεται σε επαφή με την νερό και τα εξωτερικά στρώματα του αέρα. Κατά συνέπεια η θερμοκρασία του αέρα που περιβάλλει την επιφάνεια όντας υψηλότερη θα έχει χαμηλότερη πυκνότητα, λόγω της ιδιότητας των αερίων σε σταθερή πίεση η θερμοκρασία και η πυκνότητά να είναι αντιστρόφως ανάλογες. Βρισκόμαστε λοιπόν σε μια θέση όπου το αέριο χαμηλής πυκνότητας περιβάλλεται από ένα αέριο υψηλής πυκνότητας και όπως αναμένουμε το αέριο με την χαμηλότερη πυκνότητα θα αρχίσει να κινείται προς τα πάνω. Ο χώρος γειτονικά της θερμής επιφάνειας που καταλαμβάνονταν από τον αέρα χαμηλής πυκνότητας “αδειάζει” και καταλαμβάνεται από τον ψυχρότερο αέρα. Η άνοδος του θερμού αέρα και η ροή του ψυχρότερου προς την κατεύθυνση της επιφάνειας της θερμής επιφάνειας συνεχίζεται έως ότου να επιτευχθεί θερμοδυναμική ισορροπία και η θερμοκρασία της πλάκας να γίνει ίδια με την θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα. Η κίνηση που είναι αποτέλεσμα της διαρκούς αντικατάστασης του θερμαινόμενου αέρα γειτονικά της επιφάνειας της επιφάνειας του νερού από τον ψυχρότερο αέρα ονομάζεται ρεύμα φυσικής συναγωγής και η μεταφορά θερμότητας που ενισχύεται λόγω του ρεύματος αυτού ονομάζεται μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγή. (Çengel & Ghajar, Μεταφορά Θερμότητας και Μάζας , 2012)

Φυσική συναγωγή συναντάται τόσο στην θέρμανση όσο και στην ψύξη μια επιφάνειας και είναι το ίδιο αποτελεσματική, με μοναδική διαφορά ότι αντιστρέφεται η φορά κίνησης του ρευστού. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως εφόσον η αφορμή να εκκινήσει αυτός ο μηχανισμός είναι η διαφορά της πυκνότητας που δημιουργείται σε ένα ρευστό, παρουσία ενός σώματος σε υψηλότερη θερμοκρασία έχει ως κινητήρια δύναμη το βαρυτικό πεδίο και οφείλεται στο φαινόμενο της άνωσης.

Εξαναγκασμένη συναγωγή

Ο μηχανισμός της εξαναγκασμένης συναγωγής ονομάζεται ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας που οφείλεται σε μια εξωτερικά επιβαλλόμενη ροή. Ροή, η οποία σε αντίθεση με αυτήν στην ελεύθερη συναγωγή, δεν οφείλεται στην διαφορά πυκνότητας και στις δυνάμεις της άνωσης. Αλλά σε μεγάλες διαφορές στην πίεση ενός ρευστού που περιβάλλει ένα σώμα και σε εξωτερικά επιβαλλόμενο έργο στο ρευστό όπως για παράδειγμα με μια αντλία η έναν ανεμιστήρα.

Ένας σημαντικός συντελεστής που χρησιμοποιείται κυρίως στην εξαναγκασμένη συναγωγή είναι ο αριθμός **Reynolds**. Ο αριθμός Reynolds είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας ως προς

τις δυνάμεις ιξώδους του ρευστού και ο υπολογισμός του μας βοηθάει να προσδιορίσουμε το καθεστώς της ροής του υπό μελέτη ρευστού.

$$Re = \frac{\text{Δυνάμεις αδράνειας}}{\text{Δυνάμεις ιξώδους}} = \frac{vL_c}{\nu} = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad (2)$$

Όπου V είναι η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος του ρευστού, L_c το χαρακτηριστικό μήκος της γεωμετρίας που έρχεται σε επαφή με το ρευστό και $\nu = \mu / \rho$ είναι το κινητικό ιξώδες του ρευστού.

Μικτή συναγωγή

Στα περισσότερα προβλήματα, συμπεριλαμβανομένου και το πείραμα αυτής της εργασίας, οι μηχανισμοί της ελεύθερης και στην εξαναγκασμένης συναγωγής είναι ταυτοχρόνως παρόντες. Ασκώντας και οι δυο αξιοσημείωτη επίδραση στον φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας. Σε μια τέτοια περίπτωση υπάρχει ο τρίτος και τελευταίος τύπος του μηχανισμού της συναγωγής, η μικτή συναγωγή.

Η πλειοψηφία των μελετών για το φαινόμενο της μεικτής συναγωγής γίνεται με αυστηρούς περιορισμούς στις παραμέτρους του προβλήματος, όπως για παράδειγμα επίπεδες πλάκες που διατηρούν σταθερή θερμοκρασία και βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον τους. Η διεπιφάνεια νερού-αέρα είναι όμοια με μια επίπεδη πλάκα επομένως σχέσεις για την κίνηση ρευστού πάνω από μια πλάκα θα χρησιμοποιηθούν για να κατανοήσουμε τα επιφανειακά φαινόμενα. Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι μια πολυπαραμετρική μελέτη της εξάτμισης και της συναγωγής διεπιφάνεια νερού-αέρα .

1.2 Μεταφορά Μάζας

Τάση Ατμών

Η τάση ατμών ορίζεται ως η πίεση που ασκεί μια ουσία σε αέρια φάση όταν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με τις συμπυκνωμένες φάσεις της, υγρές η αέριες, σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Η τάση ατμών είναι μια ένδειξη του ρυθμού εξάτμισης μιας ουσίας και εκφράζει την τάση των μορίων μιας ουσίας να μεταπηδήσουν από την υγρή η στερεή στην αέρια φάση. Όταν η θερμοκρασία μιας ουσίας αυξάνεται η τάση ατμών επίσης αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει διότι η τάση ατμών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την μέση κινητική ενέργεια των μορίων η αύξηση της οποίας ωθεί περισσότερα μόρια να αλλάξουν στην αέρια φάση. Κάτι πολύ σημαντικό είναι ότι η τάση ατμών είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο, δηλαδή δεν συμβαίνει σε ολόκληρο τον όγκο μιας ουσίας αλλά λαμβάνει μέρος στην λεπτή επιφάνεια όπου τα μόρια μιας υγρής η στερεάς

ουσίας συναντούν τα μόρια στην αέρια φάση της. Ο προσδιορισμός της τάσης ατμών θα μας απασχολήσει διότι είναι το φαινόμενο το οποίο είναι υπεύθυνο για την εξάτμιση.

Εξάτμιση

Η εξάτμιση το φαινόμενο κατά το οποίο μια ουσία αλλάζει από υγρή, σε αέρια φάση. Πολλές εφαρμογές μεταφοράς μάζας λαμβάνουν μέρος ισόθερμα και δεν απαιτούν κάποια μεταφορά θερμότητας, κάτι τέτοιο δεν ισχύει όμως για τις εφαρμογές που περιλαμβάνουν αλλαγή φάσης μίας ουσίας. Οι εφαρμογές που περιλαμβάνουν το φαινόμενο της εξάτμισης ενός υγρού και την διάχυση των μορίων της αέριας φάσης του στο περιβάλλον αέριο απαιτούν την μεταφορά ενός ποσού λανθάνουσας θερμότητας στην υγρή φάση ώστε αυτή να αρχίσει να εξατμίζεται. Επομένως στην εφαρμογή που μελετάται συμβαίνει ταυτόχρονη μεταφορά μάζας και θερμότητας.

Για να λάβει μέρος η εξάτμιση ενός υγρού το περιβάλλον της ουσίας πρέπει να μην είναι κορεσμένο με την εξατμιζόμενη ουσία. Στην περίπτωση που ο περιβάλλον αέρας είναι κορεσμένος με το εξατμιζόμενο υγρό, δηλαδή η σχετική υγρασία $RH=100\%$, και έχει την ίδια θερμοκρασία με το υγρό δεν θα υπάρχει καμία μεταφορά μάζας η θερμότητας όσο παραμένουν οι ισόθερμες συνθήκες. Στην περίπτωση όμως που ο αέρας δεν είναι κορεσμένος ($RH<100\%$), θα υπάρχει διαφορά ανάμεσα στην συγκέντρωση ατμού στον περιβάλλοντα αέρα και στην διεπιφάνεια του υγρού με τον αέρα όπου ο αέρας είναι πάντα κορεσμένος. Η διαφορά στην συγκέντρωση είναι αυτό που ωθεί την μεταφορά μάζας, και κατά συνέπεια αυτή η διαφορά συγκέντρωσης θα ωθήσει την μεταφορά του υγρού στον αέρα. Τα μόρια του υγρού όμως θα πρέπει πρώτα να υποστούν αλλαγή φάσης και να εξατμιστούν και για να συμβεί αυτό θα πρέπει να απορροφήσουν λανθάνουσα θερμότητα. Όταν μόρια σε υγρή φάση συγκρούονται, ανταλλάσσουν ενέργεια μεταξύ τους, αν κάποιο από τα μόρια στην επιφάνεια του υγρού έχει απορροφήσει αρκετή ενέργεια, υπερβαίνει την τάση ατμών και "δραπετεύει" ως αέριο. Η εξάτμιση είναι φαινόμενο το οποίο συμβαίνει στην επιφάνεια ενός υγρού και χαρακτηρίζεται ως ενδοθερμική διεργασία, δηλαδή για να λάβει μέρος απορροφάτε θερμότητα. Αυτό σημαίνει πως όταν ένα μόριο που βρίσκεται στην επιφάνεια αλλάζει φάση, το ποσό λανθάνουσας θερμότητας που θα απορροφήσει θα κάνει την θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια να μειωθεί. Κατά συνέπεια θα υπάρχει μείωση στην πίεση κορεσμού και στην συγκέντρωση ατμών στην επιφάνεια. Η πτώση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια θα δημιουργήσει με την σειρά της διαφορές θερμοκρασίας στον κύριο όγκο του υγρού, αυτές οι διαφορές θερμοκρασίας θα κινήσουν μεταφορά θερμότητας προς την επιφάνεια. Αν ο ρυθμός εξάτμισης είναι πολύ μεγάλος και η μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον και από τον κύριο όγκο του υγρού δεν είναι αρκετή ώστε να συνεχιστεί η εξάτμιση με τον ίδιο ρυθμό, η θερμότητα που χρειάζεται ώστε να συνεχιστεί η εξάτμιση θα παρέχεται από την αισθητή θερμότητα του υγρού στην επιφάνεια. Άρα η θερμοκρασία του υγρού στην επιφάνεια θα συνεχίσει να μειώνεται.

Η διαδικασία αυτή θα συνεχιστεί έως ότου η λανθάνουσα θερμότητα που απορροφάτε γίνει ίση με την μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια του υγρού. Όταν

επιτευχθούν συνθήκες θερμικής ισορροπίας και σταθεροποιηθούν οι θερμοκρασίες στην επιφάνεια, το ισοζύγιο ενέργειας μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση:

$$q_{sensible,transferred} = q_{latent,absorbed} \quad (3)$$

$$q = \dot{m} h_{fg} \quad (4)$$

Όπου \dot{m} είναι ο ρυθμός απώλειας μάζας μέσω της εξάτμισης και h_{fg} η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του υγρού για συνθήκες στην επιφάνεια.

Εξατμιστική ψύξη

Μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της αναλογίας μεταφοράς μάζας και θερμότητας, όπως και το κύριο ενδιαφέρον αυτής της εργασίας, είναι η διεργασία της *εξατμιστικής ψύξης*. Όταν ένα αέριο ρέει πάνω από ένα υγρό λαμβάνει μέρος το φαινόμενο της εξάτμισης από την επιφάνεια του υγρού, με την ενέργεια που είναι υπεύθυνη για την αλλαγή φάσης του υγρού να είναι η λανθάνουσα θερμότητα.

Η αλλαγή φάσης θα συμβεί όπως προαναφέρθηκε όταν τα μόρια στην επιφάνεια του υγρού μέσω των συγκρούσεων τους με τα υπόλοιπα μόρια του υγρού συσσωρεύσουν αρκετή ενέργεια ώστε να υπερβούν την τάση ατμών. Η απαιτούμενη ενέργεια για να συντηρηθεί η διαδικασία της εξάτμισης παρέχεται από την εσωτερική ενέργεια του υγρού, στο οποίο για να συμβεί αυτό θα πρέπει να υπάρχει πτώση στην θερμοκρασία του. Ωστόσο, για να διατηρηθεί ισορροπία στην αντίδραση, οι απώλειες λανθάνουσας θερμότητας που χάνονται από το υγρό θα πρέπει να αντισταθμιστούν από το περιβάλλον του. Αμελώντας τις επιδράσεις της ακτινοβολίας, αυτή η μεταφορά θερμότητας θα γίνει μέσω συναγωγής με το αέριο ή με προσθήκη θερμότητας από εξωτερικές πηγές, όπως για παράδειγμα μια ηλεκτρική αντίσταση βυθισμένη στο υγρό.

2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΚΟΛΥΜΒΗΤΙΚΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ

2.1 Θερμικές απώλειες

Η συντριπτική πλειοψηφία των μελετών μικτής συναγωγής σε επίπεδες γεωμετρίες αναφέρονται σε κίνηση ρευστού πάνω από κάθετες οριζόντιες θερμαινόμενες πλάκες. Το φαινόμενο της ταυτόχρονης μεταφοράς μάζας και θερμότητας μέσω της εξατμιστικής ψύξης αν και λίαν διαδεδομένο, μετά από μια εκτενή μελέτη σε ελληνική αλλά και ξενόγλωσση βιβλιογραφία είναι ένα φαινόμενο ελάχιστα κατανοητό. Η μελέτη της ψύξης του νερού κατά την εξάτμιση του σε ανοικτές δεξαμενές νερού είναι βαρυσήμαντη για τον προσδιορισμό της απώλειας θερμότητας σε πολλές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων των ανοιχτών κολυμβητικών δεξαμενών αλλά και σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως ανοικτές δεξαμενές και αγωγοί νερού για αποθήκευση και ψύξη η και δεξαμενές αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων.

Εάν αναλογιστούμε μια ανοιχτή δεξαμενή νερού εκτεθειμένη στο περιβάλλον χωρίς κάποια κάλυψη με την θερμοκρασία του νερού να είναι υψηλότερη από αυτή του αέρα θα προκύψει η παρακάτω ισότητα για τις απώλειες.

$$q_{total} = q_{conv} + q_{evap} + q_{rad} + q_{rep} + q_{cond} - q_{solar} - q_{heat} \quad (2.1)$$

Όπου η συνολικές απώλειες q_{total} θα είναι ίσες με το άθροισμα των απωλειών μέσω συναγωγής q_{conv} , των απωλειών λόγω εξάτμισης q_{evap} , των απωλειών λόγω ακτινοβολίας q_{rad} , των απωλειών λόγω αναπλήρωσης του νερού q_{rep} , και των απωλειών λόγω αγωγής με τα τοιχώματα και το έδαφος q_{cond} . Τέλος q_{solar} θα είναι τα θερμικά κέρδη λόγω ηλιασμού και q_{heat} τα θερμικά κέρδη μέσω των συστημάτων θέρμανσης που είναι εγκατεστημένα στην δεξαμενή.

2.2 Θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής

Μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής σε μια κολυμβητική δεξαμενή εμφανίζεται στην διεπιφάνεια αέρα- νερού και λόγω αυτής υπάρχει τόσο μεταφορά θερμότητας αλλά και μάζας. Σε αυτή την εργασία θα εξετάζεται η περίπτωση που η θερμοκρασία του αέρα είναι χαμηλότερη από αυτήν του νερού. Στην περίπτωση όπου η θερμοκρασία του νερού είναι υψηλότερη από αυτήν του αέρα, το θερμότερο νερό θα ζεστάνει το στρώμα αέρα στην διεπιφάνεια τους προκαλώντας την ύψωση του του θερμότερου πλέον και λιγότερο πυκνού αέρα, δημιουργώντας έτσι μια ροή αέρα προς τα πάνω. Ταυτόχρονα το νερό στην επιφάνεια θα αρχίσει να ψύχεται με αποτέλεσμα το ψυχρότερο και πυκνότερο νερό της επιφάνειας να αρχίσει να βυθίζεται στον κύριο

όγκο του νερού και έτσι να εμφανίζεται ο μηχανισμός της φυσικής συναγωγής και στις δυο πλευρές της επιφάνειας νερού- αέρα. Στην περίπτωση που υπάρχει προσθήκη ρεύματος αέρα, για να μελετήσουμε το πρόβλημα θα πρέπει να θεωρήσουμε εξαναγκασμένη η μικτή συναγωγή εξαρτημένη από την δύναμη του ρεύματος άνωσης λόγω της διαφοράς πυκνότητας αλλά και της ταχύτητας του ανέμου. Στην περίπτωση στην οποία ο αέρας έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από αυτή του νερού, δεν εμφανίζεται ροή λόγω άνωσης και υπάρχει τέλεια διαστρωμάτωση, για αυτό το λόγω παρουσία ανέμου η μηχανισμός της εξαναγκασμένης συναγωγής είναι ο μοναδικός που ευθύνεται για την μεταφορά θερμότητας όμως ως θερμικό κέρδος.

Το φαινόμενο της συναγωγής και της κίνησης του ρευστού μέσα στον κύριο όγκο νερού δεν αναλύεται σε αυτήν την εργασία. Λόγο του μικρού μεγέθους του μοντέλου θεωρήθηκε ότι το νερό της κολυμβητικής δεξαμενής είναι στάσιμο και συμπεριφέρεται σαν ένας συμπαγής όγκος.

2.3 Θερμικές απώλειες λόγω εξάτμισης

Ανεξαρτήτως από την χρήση της εκάστοτε κολυμβητικής δεξαμενής οι ποιο βαρυσήμαντες απώλειες θερμότητας είναι αυτές που οφείλονται στην εξάτμιση του νερού. Προκειμένου να υπάρξει οποιοδήποτε σημαντικό ποσό εξάτμισης, θα πρέπει να υπάρχει κίνηση του αέρα.

Η κίνηση του αέρα μπορεί να ξεκινήσει λόγω των δύο παρακάτω μηχανισμών:

1. Κίνηση του αέρα που αποδίδεται ως εξαναγκασμένη συναγωγή και προκαλείται από την κίνηση του ανέμου σε ανοιχτές κολυμβητικές δεξαμενές και από την κίνηση του αέρα λόγω των συστημάτων εξαερισμού σε κλειστές κολυμβητικές δεξαμενές.
2. Ο μηχανισμός της φυσικής συναγωγής προκαλείται από τα φυσικά ρεύματα αέρα που προκαλούνται από την διαφορά στην πυκνότητα και η κίνησή τους οφείλεται στο φαινόμενο της άνωσης. Ο αέρας που έρχεται σε επαφή με το νερό γίνεται κορεσμένος και κατά συνέπεια ελαφρύτερος, άρα αρχίζει να κινείται προς τα πάνω. Ο βαρύτερος και ποιο στεγνός αέρας κινείται προς τα κάτω για να καταλάβει την θέση του.

Για την περίπτωση των ανοιχτών κολυμβητικών δεξαμενών ο μηχανισμός της εξαναγκασμένης συναγωγής είναι ο κύριος μηχανισμός που ευθύνεται για την εξάτμιση ενώ για τις κλειστές κολυμβητικές δεξαμενές συνήθως η κίνηση του αέρα και η εξάτμιση προκαλούνται λόγω της φυσικής συναγωγής. Στην περίπτωση των κλειστών δεξαμενών οι απώλειες μέσω εξάτμισης μπορούν να καταπολεμηθούν εν μέρη μέσω του ελέγχου της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντα χώρου. Στις ανοιχτές δεξαμενές όμως οι απώλειες λόγω εξάτμισης εντείνονται λόγω της άμεσης επίδρασης του ανέμου και της μη ικανότητας ελέγχου της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του χώρου. (Czarnecki, 1978)

Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, οι απώλειες λόγω εξάτμισης σε ανοιχτές δεξαμενές ευθύνονται για το (50-60)% τω συνολικών απωλειών. (ASHRAE, 1999). Οι απώλειες λόγω εξάτμισης είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις τέσσερις παρακάτω αιτίες:

1. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ νερού και περιβάλλοντα αέρα.

2. Σχετική υγρασία περιβάλλοντα αέρα.
3. Επιφάνεια της δεξαμενής
4. Ταχύτητα του αέρα στην επιφάνεια.

Προκειμένου να εξατμιστεί αυτό το ποσό νερού από την δεξαμενή πρέπει να απορροφήσει κάποιο ποσό θερμότητας. Το κύριο μέρος της θερμότητας αυτής παρέχεται από το ίδιο το νερό, για να διατηρηθεί η θερμοκρασία της δεξαμενής θα πρέπει επομένως να παρέχεται θερμότητα στο νερό ώστε να συμπληρωθεί αυτή που χάθηκε λόγω της εξάτμισης. Το ποσό της θερμότητας υπολογίζεται αυτής υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$Q_{evap} = \dot{m} h_{fg} \quad (2.2)$$

2.4 Θερμικές απώλειες λόγω ακτινοβολίας

Όπως κάθε στερεό σώμα το οποίο έχει θερμοκρασία πάνω από αυτήν των μηδέν βαθμών Κελνίν έτσι και το νερό που μελετάμε θα εκπέμπει κάποιο ποσό θερμότητας μέσω της θερμικής ακτινοβολίας. Σε σύγκριση με τις απώλειες μέσω συναγωγής και μέσω εξάτμισης οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι τάξεις μεγέθους μικρότερες, παρόλα αυτά είναι μετρήσιμες και καταγράφονται.

Η μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια του νερού της δεξαμενής γίνεται μέσω ανταλλαγής ακτινοβολίας μακρών μηκών κύματος ανάμεσα του νερού με την ατμόσφαιρα. Ο τύπος μέσω του οποίου υπολογίζουμε τις απώλειες είναι ο γενικός τύπος για μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας του Stephan – Boltzmann :

$$Q_{rad} = A_s \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) \quad (2.3)$$

Όπου η θερμοκρασία ουρανού (T_{sky}) είναι όρος που εξαρτάται από τις συνθήκες τις ατμόσφαιρας, για αυτό για τους υπολογισμούς θα λαμβάνεται ως $T_{sky} = \sqrt{0.92} T_{\infty}$. Η ικανότητα εκπομπής ε του νερού είναι ίση με $\varepsilon = 0.9$ και σ η σταθερά Stephan – Boltzmann είναι ίση με $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ και A_s είναι η επιφάνεια εκπομπής, δηλαδή η επιφάνεια της δεξαμενής.

2.5 Θερμικές απώλειες λόγω αναπλήρωσης

Οι απώλειες λόγω αναπλήρωσης είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις απώλειες λόγω εξάτμισης, καθώς είναι το ποσό της θερμότητας που απαιτείται ώστε να θερμανθεί το νερό που εισάγεται στην πισίνα ώστε να συμπληρωθεί το νερό που έχει εξατμιστεί. Μια μετρήσιμη ποσότητα απώλειας μάζας επίσης υπάρχει λόγω της κίνησης των κολυμβητών σε μια πισίνα οι οποίες οδηγούν το νερό εκτός της πισίνας στο δάπεδο

και στην υπερχειλίση. Ο υπολογισμός των απωλειών λόγω αναπλήρωσης γίνεται μέσω του τύπου:

$$Q = \dot{m} c_p (T_{water,pool} - T_{water,supply}) \quad (2.4)$$

Όπου c_p η ειδική θερμότητα του νερού στους 15 βαθμούς κελσίου ($c_p = 4187 \frac{kJ}{kg K}$), η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο νερό της δεξαμενής και το νερό παροχής από το δίκτυο και τέλος η απώλεια μάζας μέσω εξάτμισης που υπολογίζεται από τον τύπο:

2.6 Θερμικές απώλειες λόγω αγωγής με το έδαφος και τα τοιχώματα

Οι απώλειες θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων και του εδάφους απαρτίζεται από δύο στάδια μεταφοράς θερμότητας. Την μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής από το νερό στα τοιχώματα της δεξαμενής και στην συνέχεια την μεταφορά θερμότητας από τα τοιχώματα προς το έδαφος. Το μοντέλο της πισίνας που χρησιμοποιήθηκε για αυτή την εργασία είναι κατασκευασμένο από plexiglass (polymethylmethacrylate) με θερμική αγωγιμότητα στους 23 βαθμούς κελσίου $k=0.17-0.19 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Goodfellow, n.d.). Οι απώλειες είναι συνήθως πού μικρές για να υπολογιστούν και σύμφωνα με την βιβλιογραφία δεν ξεπερνούν ποτέ το 5% των συνολικών απωλειών.

2.7 Θερμικά κέρδη

Θερμικά κέρδη σε μια κολυμβητική δεξαμενή εμφανίζονται όταν υπάρχει άμεσο η έμμεσο ηλιακό φορτίο ή όταν είναι εγκατεστημένα συστήματα θέρμανσης του νερού. Κατά την σχεδίαση μιας κολυμβητικής δεξαμενής λαμβάνονται υπόψιν τα θερμικά κέρδη και το ενεργειακό ισοζύγιο που εξετάζεται έχει την μορφή αυτού στην ενότητα (2.1). Το ενεργειακό ισοζύγιο αφορά μόνον το νερό της δεξαμενής και λειτουργεί ως ένα αδιαβατικό σύστημα. Οι απώλειες που προαναφέρθηκαν στα υποκεφάλαια (2.1) θα πρέπει να αντισταθμιστούν από τα παρακάτω θερμικά κέρδη έτσι ώστε να είναι επιστημονικά ορθό το ενεργειακό ισοζύγιο.

2.8 Θερμικά κέρδη λόγω ακτινοβολίας

Τα κέρδη λόγω ηλιακής ακτινοβολίας έχουν την δυνατότητα να συμβάλουν σημαντικά στην θέρμανση μιας κολυμβητικής δεξαμενής. Με τα κέρδη λόγω ακτινοβολίας μπορεί να αναφερόμαστε σε άμεσα η έμμεσα κέρδη.

Τα άμεσα αναφέρονται στην περίπτωση που σε ανοιχτές κολυμβητικές δεξαμενές η θέρμανση του νερού γίνεται λόγω της απευθείας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο νερό και της απορρόφησής της από το νερό και τα τοιχώματα. Στις κλειστές κολυμβητικές δεξαμενές η επίδραση της ακτινοβολίας μελετάται ως το ποσό το οποίο προσπίπτει και διαπερνά οριζόντιες επιφάνειες συνήθως στην οροφή του κτιρίου που στεγάζεται η δεξαμενή και την επίδραση που έχει στην θέρμανση του χώρου στέγασης.

Τα έμμεσα κέρδη αναφέρονται σε διατάξεις θέρμανσης της πισίνας οι οποίες αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία. Τέτοιες διατάξεις αποτελούνται από έναν συλλέκτη ο οποίος απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και μεταφέρει την θερμότητα αυτής είτε σε κάποιο ρευστό το οποίο μεταφέρει την θερμότητα στο νερό της δεξαμενής ή κατευθείαν στο νερό της δεξαμενής.

Τα θερμικά κέρδη λόγω ακτινοβολίας λόγω άμεσης πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο νερό της δεξαμενής υπολογίζονται από την σχέση:

$$Q_{solar} = a G A_s \quad (2.7)$$

Όπου A_s το εμβαδό της δεξαμενής, G η στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία σε $(\frac{W}{m^2K})$ και $a=0.85$ είναι συντελεστής η τιμή του οποίου καθορίζεται σύμφωνα με (ISO/TC, 1995).

2.9 Θερμικά κέρδη μέσω συστημάτων θέρμανσης

Τα θερμικά κέρδη μέσω συστημάτων θέρμανσης είναι τα θερμικά κέρδη τα οποία προσδίδει ο μηχανολογικός εξοπλισμός που είναι εγκατεστημένος έτσι ώστε να λειτουργεί η εκάστοτε κολυμβητική δεξαμενή.

Προσθήκη θερμότητας γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω του λέβητα, ο οποίος λειτουργεί με την καύση υδρογονανθράκων. Τα συστήματα θέρμανσης που λειτουργούν με υδρογονάνθρακες και δεν εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα καθώς πρέπει να αντισταθμιστούν όλες οι υπόλοιπες απώλειες. Ενδεικτικά προκειμένου να θερμανθεί το νερό μιας πισίνας ολυμπιακών διαστάσεων, η οποία έχει όγκο 2500 κυβικά μέτρα άρα χωράει νερό μάζας 2500000 κιλά νερού, κατά έναν βαθμό θα υπολογιστεί από την σχέση: $Q = m c(\Delta\theta)$ με μάζα $m=2500000$ kg, $c=4200$ J/kgC και διαφορά θερμοκρασίας 1° βαθμό κελσίου. Το συνολικό ποσό θερμότητας θα είναι ίσο με 10.5 GJ.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

3.1 Πειραματική διάταξη

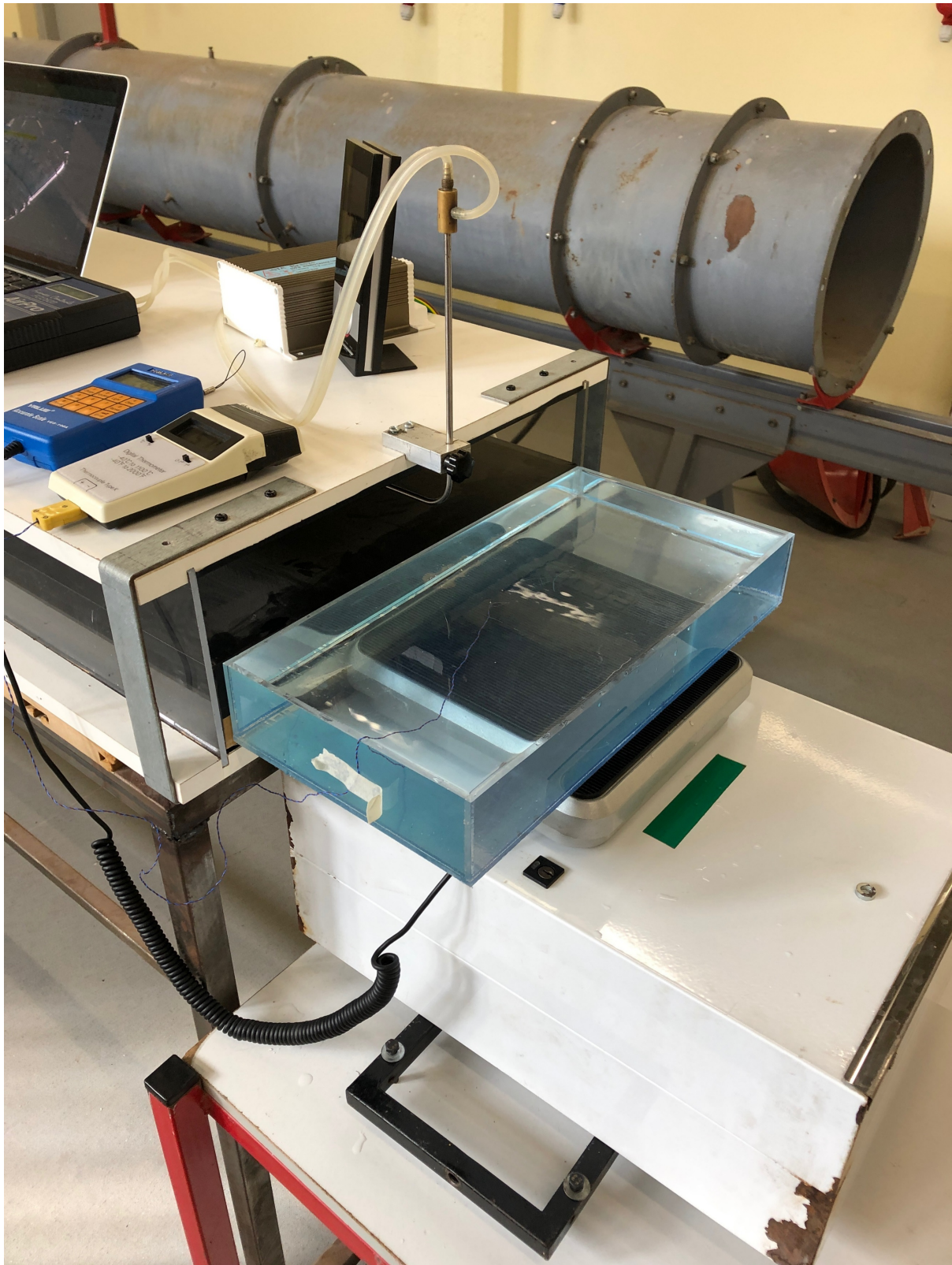
Τα πειράματα για αυτή την εργασία πραγματοποιήθηκαν στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου θέρμανσης-ψύξης-κλιματισμού στο ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας. Η πειραματική διάταξη αεροσήραγγας-μοντέλου κολυμβητικής δεξαμενής αποτελούνταν από τον αγωγό της αεροσήραγγας, έναν ανεμιστήρα στην αρχή του αγωγού, δύο κυψελοειδείς διαχωριστές ροής και το μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής. Τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των μετρήσεων ήταν ένα ροόμετρο, ένα θερμοζεύγος τύπου K, δύο θερμομέτρα χώρου, μια ζυγαριά και έναν φορητό υπολογιστή για να καταγράφονται οι ενδείξεις των οργάνων.

Ο αγωγός της αεροσήραγγας είναι κατασκευασμένος από πλεξιγκλάς στα πλαϊνά μέρη, ξύλο στην άνω και κάτω πλευρά και έχει μεταλλικό σκελετό. Ένας ανεμιστήρας που ελεγχόταν με ροοστάτη για την ρύθμιση των στροφών ήταν συνδεδεμένος στην αρχή της αεροσήραγγας. Αρχικά δημιουργήθηκε το πρόβλημα ότι το εύρος λειτουργίας του ανεμιστήρα ήταν μεγαλύτερο από την επιθυμητή ταχύτητα αέρα για να πραγματοποιηθεί το πείραμα. Η επιθυμητή ταχύτητα του αέρα ήταν 5 m/s και η ροή του αέρα στην ελάχιστη τάση του ροοστάτη ήταν 6.5 m/s. Η εγκατάσταση 2 κυψελοειδών διαχωριστών ροής έλυσαν αυτό το πρόβλημα και οι ταχύτητες περιορίστηκαν σε 4.4 m/s για τα δύο πειράματα και 2.2 m/s για τα άλλα δύο. Οι κυψελοειδείς διαχωριστές ροής εγκαθίστανται επειδή εξομαλύνουν την ροή σε μία αεροσήραγγα, είναι μια διάταξη μικρών αγωγών σε ένα πάνελ με εξαγωνικό κυψελοειδές σχήμα, που τοποθετούνται στον αγωγό μίας αεροσήραγγας για να ελαχιστοποιήσουν τα εγκάρσια διανύσματα ταχύτητας που δημιουργούνται από την περιστροφική κίνηση του αέρα κατά την είσοδό του στον αγωγό.

Η τοποθέτηση ενός τέτοιου πάνελ θα γινόταν για την εκμετάλλευση των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων και με την τοποθέτηση δύο τέτοιων πάνελ, λόγω της τριβής που δημιουργούν με στον αέρα, μειώθηκε η ταχύτητα στο επιθυμητό επίπεδο. Για να ελέγχει η λειτουργία των κυψελοειδών πάνελ χρησιμοποιήθηκε ένα αερόθερμο που βρισκόταν στο εργαστήριο το οποίο τοποθετήθηκε στην δεξιά πλευρά της αναρρόφησης του ανεμιστήρα στην αρχή της αεροσήραγγας. Στην αριστερή και στην δεξιά πλευρά στην έξοδο της αεροσήραγγας, εκεί που θα τοποθετούσαν το μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής, μετρήθηκε η θερμοκρασία με το θερμοζεύγος τύπου K. Στην δεξιά πλευρά η θερμοκρασία ήταν ίση με του περιβάλλοντος και στην αριστερή στην ευθεία με το αερόθερμο, 2 C υψηλότερη με πολύ απότομη διαφορά στην ένδειξη του θερμομέτρου. Αυτό είναι δείγμα ότι το καθεστώς της ροής ήταν στρωτό, οι ροϊκές γραμμές έρεαν ομαλά στο μήκος της αεροσήραγγας, και δεν υπήρχε ανάμιξη και εγκάρσιες κινήσεις του αέρα στο μήκος της αεροσήραγγας. Το μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής ήταν κατασκευασμένο ώστε να έχει τον ίδιο λόγω μήκους-πλάτους με μία πισίνα ολυμπιακών προδιαγραφών, οι οποίες είναι 50 μέτρα και 25 μέτρα αντίστοιχα. Το μοντέλο της πισίνας είχε διαστάσεις μήκους 0.4 μέτρα και πλάτους 0.2 μέτρα και το ύψος ήταν 0.06 μέτρα. Η κατασκευή έγινε από πλεξιγκλάς

και είχε αυτές τις διαστάσεις ώστε το μήκος του μοντέλου της πισίνας να είναι ίδιο με το πλάτος της αεροσήραγγας και το ύψος δεν τέθηκε υπό κλίμακα αληθινής πισίνας ολυμπιακών προδιαγραφών ώστε η συνολική μάζα συμπεριλαμβανομένου του νερού και του μοντέλου από πλεξιγκλάς να μην υπερβαίνει τα 6 kg. Το μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής έγινε έξω από το κανάλι της αεροσήραγγας για τον λόγο ότι δεν χώραγε μαζί με την ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε. Το νερό με το οποίο γέμιζε το μοντέλο έφτανε μέχρι το πάνω χείλος ώστε να είναι μην προκληθούν αναταράξεις στην ροή του αέρα λόγω της γεωμετρίας και το νερό που ήταν το υπό μελέτη μέσο να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερο σε μια επίπεδη πλάκα. Μια αυτοσχέδια βάση κατασκευάστηκε με ένα κουτί, μια ράγα, τέσσερις βίδες και παξιμάδια. Αυτή η διάταξη χρησιμοποιήθηκε και για την ρύθμιση του ύψους, επιπέδου σε σύγκριση με το χείλος του καναλιού της αεροσήραγγας και της οριζόντιωσης του μοντέλου της κολυμβητικής δεξαμενής χρησιμοποιώντας το νερό που ήταν γεμισμένη σαν αλφάδι. Το χείλος του μοντέλου της κολυμβητικής δεξαμενής τοποθετούνται όσο το δυνατό πιο κοντά στο άκρο της αεροσήραγγας για να μην υπάρχουν αναταράξεις στην ροή του αέρα, χωρίς όμως να ακουμπάει για να μην μεταφέρονται ταλαντώσεις από την λειτουργία του ανεμιστήρα (βλ. Εικόνα 3-2).

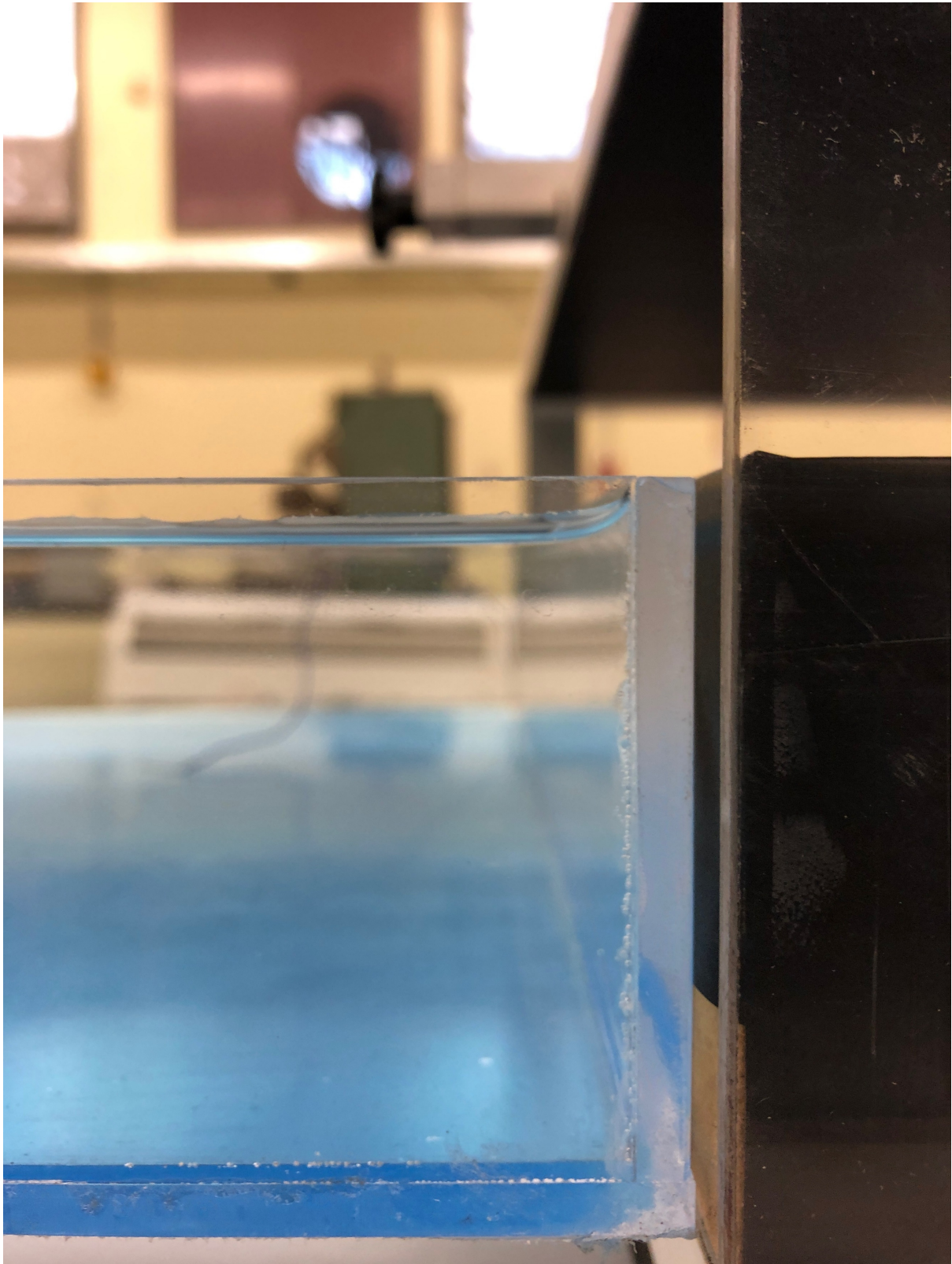
Το ροόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της ταχύτητας του αέρα στην αεροσήραγγας ήταν το μοντέλο AIRPRO FCO520 με τον σωλήνα Πιπότη MO521 ο οποίος ήταν εγκατεστημένος στην άκρη της αεροσήραγγας στο μέσο του ύψους της εξαγωγής της, πάνω από το μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής. Για το ακροφύσιο του θερμοζεύγους τύπου K επιλέχθηκε αυτό με το ελαφρύτερο καλώδιο για να μην επηρεάζει τις μετρήσεις της μάζας όταν έμπαινε στο νερό για να γίνει καταγραφή μέτρησης. Η άκρη του θερμοζεύγους τοποθετούνταν στο μέσο του μοντέλου της κολυμβητικής δεξαμενής χωρίς να ακουμπάει στον πυθμένα. Η μέτρηση της θερμοκρασίας ήταν επιθυμητό να εκφράζει αυτήν του κύριου όγκου του νερού. Πριν από την αρχή κάθε πειράματος ο έλεγχος που πραγματοποιούνταν ότι οι ενδείξεις του θερμοζεύγους τύπου K και των δύο θερμομέτρων χώρου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι ίδιες. Τα δύο θερμομέτρα χώρου ήταν τοποθετημένα το ένα στην αναρρόφηση του ανεμιστήρα στην αρχή της αεροσήραγγας και το δεύτερο πάνω από την έξοδο, δίπλα στο ροόμετρο. Τα δύο θερμομέτρα παρείχαν ενδείξεις θερμοκρασίας, αλλά και σχετικής υγρασίας του χώρου. Η ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε, ήταν το μοντέλο VALUE VES-100 A. Το μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής ήταν ακουμπισμένο πάνω στην ζυγαριά και μετρήσεις λαμβάνονταν κατευθείαν από την ολική μάζα του μοντέλου μαζί με το νερό. Οι ενδείξεις των οργάνων καταγράφονταν στο Excel σε έναν φορητό υπολογιστή. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



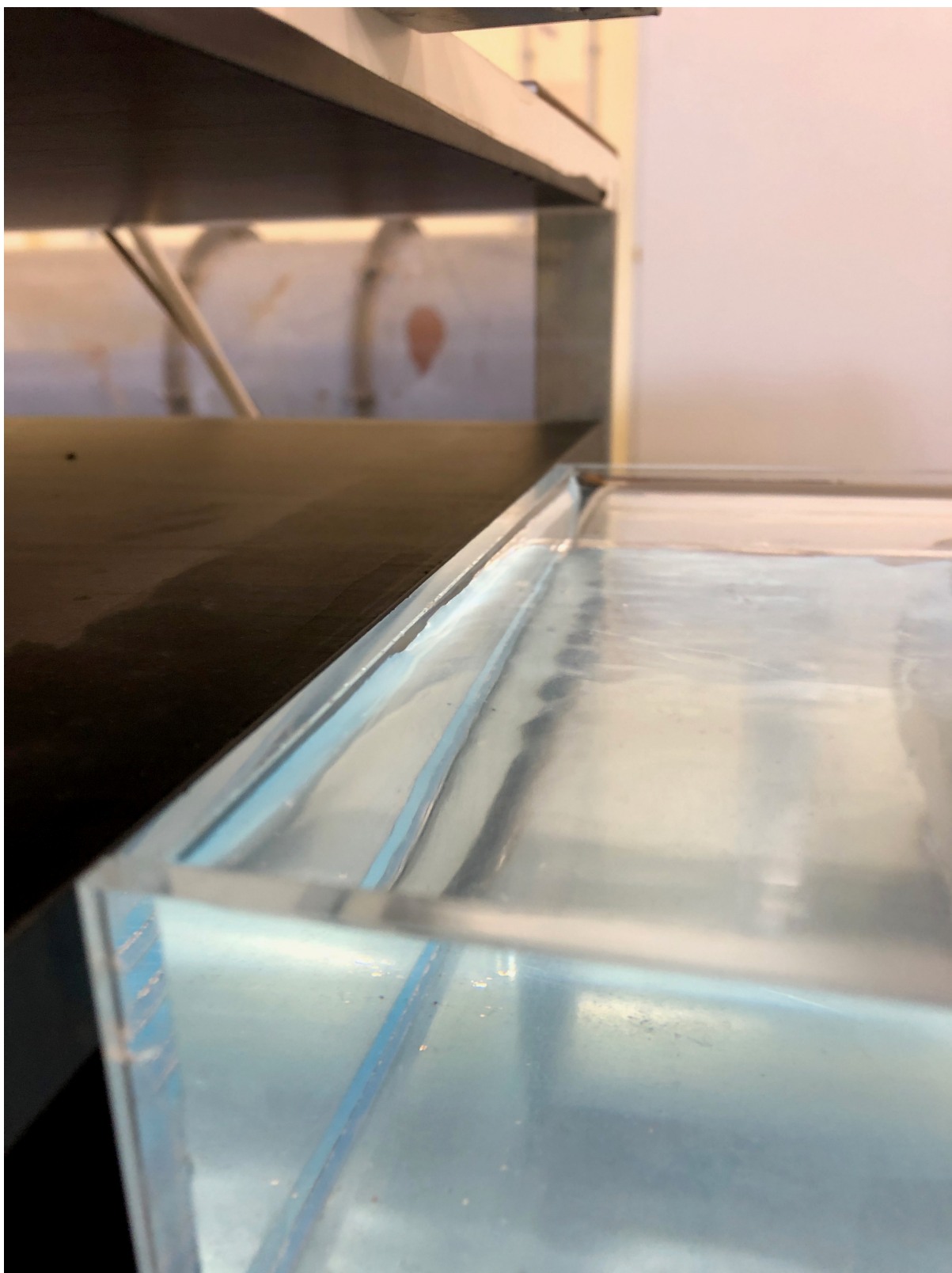
Εικόνα 3-1

Στην εικόνα παραπάνω φαίνεται η δεξαμενή, τα μετρητικά όργανα, η εξαγωγή της αεροσήραγγας, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής στον οποίο καταγράφηκαν οι μετρήσεις και η βάση της ζυγαριάς. Η βάση της ζυγαριάς χρησιμοποιήθηκε για να φτάσει η

δεξαμενή στο επίπεδο της εξαγωγής της αεροσήραγγας όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-2

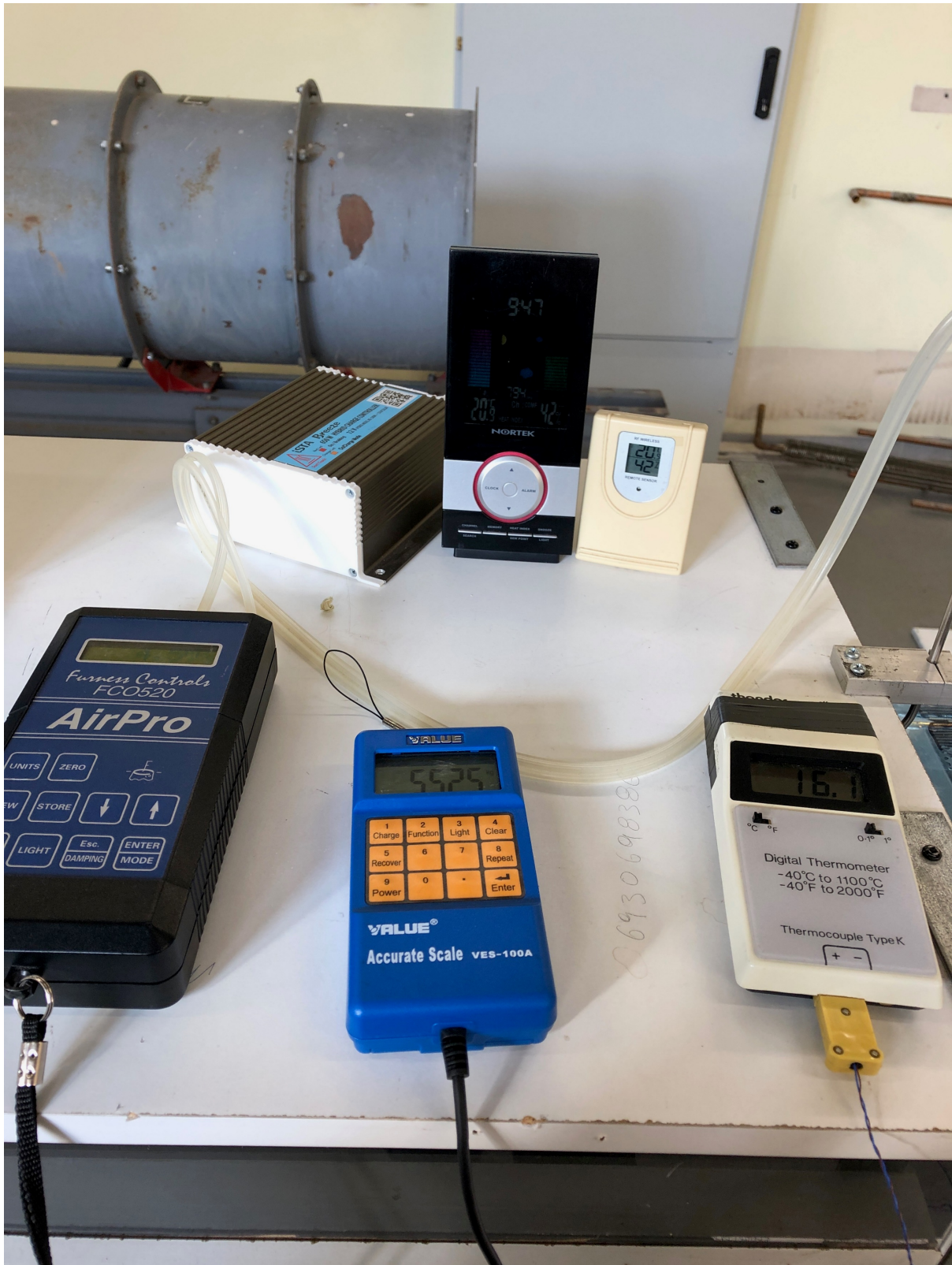


Εικόνα 3-2



Εικόνα 3-3

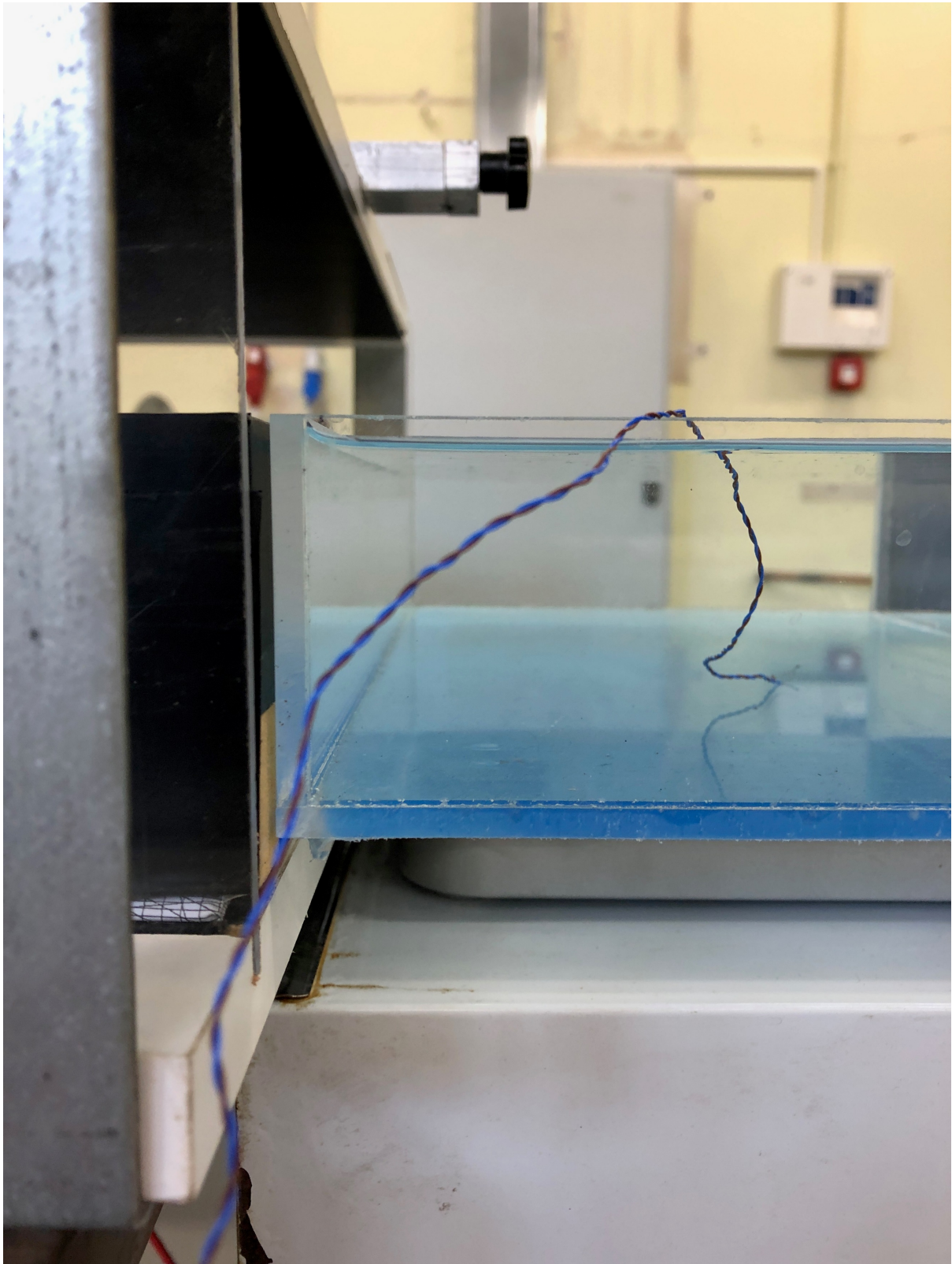
Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα μετρητικά όργανα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα.



Εικόνα 3-4

Αριστερά βρίσκεται το ηλεκτρονικό μανόμετρο το οποίο ήταν συνδεδεμένο με τον σωλήνα Pitot και γινόταν η μέτρηση της ταχύτητας του αέρα. Στο κέντρο η οθόνη για την ανάγνωση ένδειξης της ζυγαριάς, δεξιά το ψηφιακό θερμόμετρο το οποίο ήταν

συνδεδεμένο με το θερμοζεύγος τύπου Κ το οποίο βρισκόταν βυθισμένο μέσα στο νερό (βλ. Εικόνα 3-5). Στο πάνω μέρος βρίσκονται τα δύο θερμομέτρα χώρου τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή της θερμοκρασίας του χώρου και της σχετικής υγρασίας.



Εικόνα 3-5

3.2 Πειραματική διαδικασία

Τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν αναγράφονται στον Πίνακας 3-1 με χρονολογική σειρά. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό με αρχική θερμοκρασία 50 °C. Το πρώτο από τα πειράματα πραγματοποιήθηκε με αρχική θερμοκρασία 50 °C βαθμούς κελσίου πραγματοποιήθηκε χωρίς ροή αέρα, ως σημείο αναφοράς για να μελετηθούν οι επιδράσεις που έχει η ταχύτητα του αέρα στα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Το μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής γέμιζε με νερό μέχρι το πάνω μέρος, ρυθμιζόταν με τα παξιμάδια της βάσης πάνω στην οποία στεκόταν μαζί με την ζυγαριά, έτσι ώστε να βρίσκεται στην άκρη του χείλους της αεροσήραγγας για να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότερες αναταράξεις στην ροή. Με τον ίδιο τρόπο ρυθμιζόταν και η ομοιομορφία της στάθμης του νερού. Το πείραμα ξεκινούσε αφότου είχαν δουλέψει τα κλιματιστικά, για περίπου 2 ώρες, και είχε σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του χώρου, ο ανεμιστήρας είχε λειτουργήσει για μία ώρα και σιγουρευόταν πως δεν υπήρχαν διακυμάνσεις στην ταχύτητα του αέρα. Για την θέρμανση του νερού χρησιμοποιήθηκε ένας συμβατικός βραστήρας και με την έκχυση του νερού στο μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής με διαρκή ανάδευση και παρακολούθηση της θερμοκρασίας από το θερμόμετρο το νερό έφτανε στην επιθυμητή θερμοκρασία. Η θερμοκρασία του νερού στο μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής πρώτου αρχίσει το κάθε πείραμα ήταν μεγαλύτερη από 55 βαθμούς κελσίου, προκειμένου να αρχίσει το νερό εξατμίζεται και να υπάρξει μια σταθεροποίηση των φαινομένων μεταφοράς μάζας και θερμότητας για περίπου 5 λεπτά πριν ξεκινήσει η καταγραφή των μετρήσεων.

Η καταγραφή των μετρήσεων ξεκινούσε όταν η θερμοκρασία του νερού ήταν ίση με 50 °C βαθμούς κελσίου. Τότε καταγράφονταν εκτός της θερμοκρασίας του νερού, η μάζα του νερού, η θερμοκρασία του χώρου, η ταχύτητα του αέρα, η σχετική υγρασία του αέρα και η ώρα που ξεκίνησε το πείραμα. Η θερμοκρασία του νερού μετριόταν στο μέσω της κολυμβητικής δεξαμενής, χωρίς η άκρη του θερμοζεύγους να ακουμπάει στο κάτω μέρος του, στο πλεξιγκλάς, για να υπάρχει η καλύτερη απεικόνιση της θερμοκρασίας του κύριου όγκου νερού. Η θερμοκρασία του χώρου μετριόταν σε δύο σημεία, στην αναρρόφηση του ανεμιστήρα στην αεροσήραγγα και στην έξοδο της αεροσήραγγας πάνω από το μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής. Σε περίπτωση που οι δύο αυτές τιμές δεν συμπίπταν μεταξύ τους σαν θερμοκρασία χώρου καταγραφόταν ο μέσος όρος αυτών των δύο θερμοκρασιών. Ένα πείραμα διαρκούσε 2 ώρες και καταγραφή μετρήσεων πραγματοποιούνταν κάθε 5 λεπτά. Οι τιμές που καταγράφονταν κάθε πέντε λεπτά ήταν η θερμοκρασία του νερού, η θερμοκρασία του αέρα, η μάζα του νερού και η σχετική υγρασία του αέρα. Τα μετρητικά όργανα για την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία του αέρα ήταν τοποθετημένα στην αναρρόφηση του ανεμιστήρα της αεροσήραγγας και δίπλα στο μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής για έλεγχο ότι δεν υπάρχουν διακυμάνσεις στις συνθήκες του χώρου λόγω του κλιματισμού. Η ταχύτητα του αέρα στην αεροσήραγγα είχε σταθερή τιμή καθόλου το πέρασ των 2 ωρών, για αυτό δεν γινόταν μέτρηση κάθε 5 λεπτά.

A/A Πειράματος	Θέση Δεξαμενής ως προς τον διαμήκη άξονα της ροής	Ταχύτητα Ροής (m/s)	Αρχική Θερμοκρασία Νερού (°C)	Αρχική Θερμοκρασία Αέρα (°C)
1	Παράλληλη	0	50,0	20,8
2	Κάθετη	4,4	50,0	20,3
3	Παράλληλη	4,4	50,0	23,1
4	Κάθετη	2,2	50,0	20,0
5	Παράλληλη	2,2	50,0	22,1

Πίνακας 3-1

3.3 Πειραματικοί περιορισμοί

Τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας τα οποία είναι υπό μελέτη σε αυτή την εργασία καθώς και ο προσδιορισμός των αδιάστατων αριθμών που χαρακτηρίζουν τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας όπως και το καθεστώς της ροής, συμβαίνουν εξαιτίας της διαφοράς συγκέντρωσης που είναι μηχανισμός ο οποίος πυροδοτείται από την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον περιβάλλοντα αέρα και στην επιφανειακή θερμοκρασία του νερού. Για την επεξεργασία δεδομένων και τα αποτελέσματα, η θερμοκρασία του κύριου όγκου του νερού χρησιμοποιήθηκε. Η μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας με την χρήση του θερμοζεύγους τύπου K που ήταν διαθέσιμο στο εργαστήριο που πραγματοποιήθηκε το πείραμα, καθώς η απροσδιοριστία της μέτρησης θα ήταν μεγαλύτερη από την ίδια την μέτρηση. Η επιλογή αυτή, της χρήσης της θερμοκρασίας του κύριου όγκου νερού για τους υπολογισμούς δικαιολογείται διότι ανεξάρτητα από την επιφανειακή θερμοκρασία, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στον περιβάλλοντα χώρο και τον κύριο όγκο νερού είναι αυτή που πυροδοτεί τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας.

4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Πειραματικές μετρήσεις

Όπως προαναφέρθηκε οι τιμές οι οποίες μετρήθηκαν στο πείραμα ήταν η θερμοκρασία του χώρου, η θερμοκρασία του νερού, η μάζα του νερού, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του αέρα στην αρχή κάθε πειράματος. Από την θερμοκρασία του κύριου όγκου νερού και του περιβάλλοντα αέρα υπολογίσθηκαν οι τάσεις ατμών του νερού σε υγρή μορφή στην επιφάνεια και των ατμών αέρα αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό της τάσης ατμών χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του Τατενς για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 0 °C. Το αποτέλεσμα αυτής της εξίσωσής είναι σε Pa:

$$VP_T = 611 * \exp \left(17,3 * \frac{T}{T + 238,3} \right) \quad (4.1)$$

Όπου T η θερμοκρασία του νερού ή του αέρα αντίστοιχα για την τάση ατμών την οποία θέλουμε να υπολογίσουμε.

Για την τάση ατμών του αέρα, πολλαπλασιάστηκε το αποτέλεσμα της παραπάνω εξίσωσης (4.1) με την τιμή της σχετικής υγρασία που είχε μετρηθεί στον χώρο

$$VP_w = VP_{T_w} * RH \quad (4.2)$$

Η διαφορά των αποτελεσμάτων για την τάση ατμών του νερού και του αέρα υπολογίστηκε μετέπειτα. Η διαφορά της τάσης ατμών είναι η κινητήρια δύναμη που ωθεί την μετάβαση των μορίων του νερού από την υγρή στην αέρια φάση και η τιμή της καθορίζει τον ρυθμό με τον οποίο γίνεται αυτή η μετάβαση. Για τον λόγο αυτό, η διαφορά της τάσης ατμών είναι μια τιμή η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού εξάτμισης από τις εμπειρικές σχέσεις των (Carrier, 1918; Smith, Löf, & Jones, 1994; Shah, 2014) που έχουν επιλεγεί για την σύγκριση των αποτελεσμάτων για τον ρυθμό εξάτμισης αυτής της εργασίας και, για τα αποτελέσματα των εμπειρικών σχέσεων που θα παρουσιαστούν σε αυτή την εργασία.

Ακόμα από τις μετρήσεις θερμοκρασίας νερού και αέρα υπολογίσθηκαν η μέση θερμοκρασία μεταξύ νερού και αέρα και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ κύριου όγκου νερού και αέρα:

$$\Delta T_{w-e} = T_w - T_o \quad (4.3)$$

Η μέση θερμοκρασία ανάμεσα σε νερό και περιβάλλον όπως θα δούμε παρακάτω χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό σταθερών που αφορούσαν την διεπιφάνεια νερού-αέρα, την αλληλεπίδραση των δύο ρευστών και τις ιδιότητες του ξηρού αέρα. Η διαφορά θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό αδιάστατων αριθμών

που προσδιορίζουν το καθεστώς ροής και των φαινομένων μεταφοράς μάζας και θερμότητας.

Από τις μετρήσεις για την απώλεια μάζας υπολογίστηκε ο ρυθμός απώλειας μάζας λόγω εξάτμισης από την επιφάνεια του νερού σε g/s:

$$m = \frac{dm}{dt} \quad (4.4)$$

4.2 Ιδιότητες και σταθερές

Τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας τα οποία ερευνά αυτή η εργασία αφορούν την αλληλεπίδραση του αέρα, ο οποίος είναι το εργαζόμενο μέσο και το ρευστό το οποίο ερευνάται, και την επιφάνεια του νερού. Αυτή η περιοχή στην οποία συμβαίνουν τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας είναι η διεπιφάνεια νερού-αέρα. Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων και σταθερών χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες του κορεσμένου νερού και ξηρού αέρα.

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του κορεσμένου νερού χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας από (Çengel, Thermodynamics an engineering approach). Από τον πίνακα αυτόν προσδιορίστηκαν οι τιμές της ενθαλπίας εξάτμισης και της πυκνότητας του νερού, με την χρήση της θερμοκρασίας του κύριου όγκου νερού που μετρήθηκε από στο πείραμα.

Επιπλέον, υπολογίστηκαν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του αέρα (Πανιδης, Φαινόμενα Μεταφοράς) προσδιορίστηκαν οι τιμές για το δυναμικό, κινηματικό ιξώδες και την θερμική αγωγιμότητα του αέρα, με την χρήση της μέσης θερμοκρασίας ανάμεσα στον κύριο όγκο νερού και την θερμοκρασία του χώρου.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (Πανιδης, Φαινόμενα Μεταφοράς) προσδιορίστηκε η πυκνότητα του κορεσμένου νερού στην διεπιφάνεια νερού-αέρα και η πυκνότητα του κορεσμένου αέρα στην διεπιφάνεια νερού-αέρα.

$$\rho = \frac{P_1 M_1}{RT} + \frac{P_2 M_2}{RT} \quad (4.5)$$

Όπου P_1, P_2 η τάση ατμών του νερού και η διαφορά τάσης ατμών του νερού με την ατμοσφαιρική πίεση (101325 Pa) αντίστοιχα. M_1 και M_2 τα μοριακά βάρη του νερού και του αέρα αντίστοιχα, R η παγκόσμια σταθερά των αερίων και T η θερμοκρασία του νερού σε μονάδες Kelvin.

4.3 Διαστάσεις δεξαμενής και σταθερές

Οι διαστάσεις της κολυμβητικής δεξαμενής και του ζυγού που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς μεταφοράς μάζας και θερμότητας, αδιάστατων αριθμών και συνθηκών ροής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

Διαστάσεις δεξαμενής						
Πλάτος (m)	Μήκος (m)	Ύψος (m)	Α εμβαδό επιφάνειας (m ²)	Εμβαδό εκτεθειμένης κάτω επιφάνειας (m ²)	V Όγκος (m ³)	Περίμετρος (m)
0,2	0,4	0,06	0,08	0,0326	0,0048	1,2

Πίνακας 4-1

Lc Χαρακτηριστικό μήκος (m)	Πάχος τοιχωμάτων (m)	Εμβαδό πλευρικών τοιχωμάτων (m ²)	Εμβαδό εκτεθειμένης επιφάνειας (m ²)	Εμβαδό επαφής με την ζυγαρία (m ²)
0,0667	0,005	0,208	0,2406	0,0474

Πίνακας 4-2

Οι διαστάσεις του πλάτους και του μήκους του μοντέλου της κολυμβητικής δεξαμενής είναι κατασκευασμένα σύμφωνα με τις διαστάσεις μιας κολυμβητικής δεξαμενής ολυμπιακών διαστάσεων σε κλίμακα 1:250. Το μήκος και το πλάτος έπαιξαν πού σημασία στους υπολογισμούς αδιάστατων αριθμών, Nu, Re και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή για το ερώτημα του κατά πόσο επηρεάζει ο προσανατολισμός της κολυμβητικής δεξαμενής την μεταφορά μάζας και θερμότητας αλλά και το αν αναπτύσσετε μικτή συναγωγή σε αυτές τις συνθήκες. Οι δυο προσανατολισμοί ήταν κάθετος και παράλληλος, συγκρίνοντας τον προσανατολισμό της κολυμβητικής δεξαμενής με τις ροϊκές γραμμές. Οι διαστάσεις μήκους $l=0,4$ και πλάτους $w=0,2$ που χρησιμοποιήθηκαν, είναι οι διαστάσεις της επιφάνειας του νερού. Για τον υπολογισμό των αδιάστατων αριθμών που βοηθούν στον χαρακτηρισμό της εξαναγκασμένης συναγωγής, Reynolds, Nusselt, Grashof και για τον συντελεστή συναγωγής h , εμφανίζετε στις εξισώσεις η τιμή του χαρακτηριστικού μήκους, το οποίο εκφράζει το μήκος στο οποίο κινείται το ρεύμα το αέρα. Το μήκος το οποίο “συναντούν” οι ροϊκές γραμμές. Για τοποθέτηση σε παράλληλο προσανατολισμό για τιμή του χαρακτηριστικού μήκους L_c χρησιμοποιήθηκε το μήκος του μοντέλου $l=0,4m$, ενώ για κάθετο προσανατολισμό χρησιμοποιήθηκε το πλάτος $w=0,2m$.

Το χαρακτηριστικό μήκος $L_c=0,66667$ χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό του αριθμού Grashof και του συντελεστή συναγωγής h για ελεύθερη συναγωγή.

Η ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε, η Value VES 100-A, σύμφωνα με το εγχειρίδιο λειτουργίας της έχει εμβαδό πλατφόρμας $237\text{mm} \times 237\text{mm} = 56169\text{mm}^2$. Το εμβαδό της επαφής της ζυγαριάς με το μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής που χρησιμοποιήθηκε για το εμβαδό στις θερμικές απώλειες μέσω αγωγής υπολογίστηκε πολλαπλασιάζοντας την μια πλευρά της ζυγαριάς $=0,237\text{m}$ με το πλάτος του μοντέλου $= 0,2\text{m}$.

Η εκτεθειμένη επιφάνεια στο κάτω μέρος του μοντέλου είναι το εμβαδό του κάτω μέρους μείον της επιφάνεια επαφής ζυγαριάς-μοντέλου. Αυτή η τιμή μαζί με το εμβαδό των τεσσάρων πλευρών του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς θερμικών απωλειών μέσω συναγωγής από τα τοιχώματα.

Στον Πίνακα 4-3 αναγράφονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών από τα τοιχώματα. Οι μηχανισμοί απωλειών θερμότητας από τα τοιχώματα περιγράφονται λεπτομερώς στην ενότητα 4.5.

Το υλικό κατασκευής του μοντέλου της κολυμβητικής δεξαμενής, όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 3.1 είναι πλεξιγκλάς πάχους $5\text{mm} = 0,005\text{m}$ και έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $k = 0,18\text{ (W/m}^2\text{K)}$. Το πάχος των τοιχωμάτων χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό των θερμικών απωλειών μέσω συναγωγής από τα τοιχώματα και για θερμικές απώλειες μέσω αγωγής από την επιφάνεια επαφής μοντέλου- ζυγαριάς.

Η αντίσταση θερμικής μεταβίβασης R_{out} είναι σύμφωνα με KENAK για κάθετες επιφάνειες σε εσωτερικούς χώρους. U είναι ο ολικός συντελεστής θερμοπερατότητας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν για τους πειραματικούς υπολογισμούς και για τις θερμικές απώλειες.

Σταθερές							
ϵ Συντελεστής εκπομπής νερού	ϵ Συντελεστής εκπομπής Plexiglass	σ Σταθερά Stephan Boltzman ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)	Μοριακό βάρος αέρα (g/mol)	Μοριακό βάρος νερού (g/mol)	Ατμοσφαιρική πίεση (Pa)	g Επιτάχυνση βαρύτητας (m/s^2)	R Σταθερά των αερίων (J/mol C)
0,96	0,86	5,67E-08	28,97	18,01528	101325	9,80665	8314,45

Πίνακας 4-3

Οι συντελεστές εκπομπής επιφάνειας νερού και πλεξιγκλάς ϵ (αδιάστατοι αριθμοί), όπως και η σταθερά Stephan -Boltzmann σ σε μονάδες ($\text{W/m}^2\text{K}^4$), χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς των θερμικών απωλειών μέσω ακτινοβολίας από την ελεύθερη επιφάνεια νερού και από τα εκτεθειμένα τοιχώματα του μοντέλου της κολυμβητικής δεξαμενής.

Το μοριακό βάρος νερού και μοριακό βάρος αέρα σε μονάδες g/mol χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των πυκνοτήτων των ατμών νερού και του

ξηρού αέρα αντίστοιχα, στην διεπιφάνεια νερού-αέρα. Στις ίδιες σχέσεις υπολογισμού εμφανίζεται και η ατμοσφαιρική πίεση του αέρα σε (Pa) και η σταθερά των αερίων R (J/mol°C).

Η επιτάχυνση της βαρύτητας g (m/s²) εμφανίζεται στην σχέση υπολογισμού του αριθμού Grashof.

4.4 Χαρακτηρίστηκα ροής, μεταφοράς θερμότητας και υπολογισμός αδιάστατων αριθμών

Οι αδιάστατοι αριθμοί βοηθούν στον προσδιορισμό και στην του τύπου της ροής, στην ευκολότερη αποτύπωση των φαινομένων συναγωγής και μεταφοράς θερμότητας και στον υπολογισμό συντελεστών που χαρακτηρίζουν αυτά τα φαινόμενα όπως ο συντελεστής συναγωγής.

Ο αριθμός Prandtl προσδιορίστηκε από τους πίνακες για τις ιδιότητες ξηρού αέρα πίνακα ιδιότητες αέρα (Πανιδης, Φαινόμενα Μεταφοράς) με την χρήση της μέσης θερμοκρασίας μεταξύ του νερού και του αέρα. Οι διακυμάνσεις στην τιμή του ήταν πάρα πολύ μικρές, 0,003 μονάδες, για τις συνθήκες στις οποίες διεξάχθηκε το πείραμα (μέση θερμοκρασία μεταξύ νερού και αέρα).

Ο αριθμός Grashof υπολογίστηκε από την σχέση όπου λόγω της ταυτόχρονης διαφοράς θερμοκρασίας και συγκέντρωσης χρησιμοποιήθηκαν όροι πυκνότητας ($\Delta\rho/\rho$) αντί του ($\beta\Delta T$). Η ίδια εξίσωση του αριθμού Grashof χρησιμοποιείται για συνθήκες ελεύθερης και εξαναγκασμένης συναγωγής.

$$Gr = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho} g L_c^3}{\nu^2} \quad (4.6)$$

Οι τιμές τις πυκνότητας $\Delta\rho$ και ρ υπολογίστηκαν όπως προαναφέρθηκε στην υποενότητα 4.1. Η εξίσωση για τον υπολογισμό του αριθμού Grashof είναι η ίδια για ελεύθερη και για εξαναγκασμένη συναγωγή.

Ο αριθμός Reynolds, για όλα τα πειράματα πλην του πειράματος ελεύθερης μεταφοράς, για οριακή τιμή αριθμού Reynolds χρησιμοποιήθηκε η τιμή Reynolds critical=10⁵ για ροή πάνω από επίπεδες πλάκες (Çengel & Ghajar, Μεταφορά Θερμότητας και Μάζας) μέσω του οποίου προσδιορίστηκε το καθεστώς της ροής. Ο αριθμός υπολογίστηκε από την σχέση:

$$Re = \frac{v L_c}{\nu} \quad (4.7)$$

Με v (m/s) την ταχύτητα του αέρα η οποία έχει σταθερή τιμή για το πέρας όλης της χρονικής διάρκειας του πειράματος, L_c (m) το χαρακτηριστικό μήκος ανάλογα με τον προσανατολισμό της κολυμβητικής δεξαμενής, ν είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα. Δηλαδή για τοποθέτηση σε παράλληλο προσανατολισμό για τιμή του χαρακτηριστικού

μήκους L_c χρησιμοποιήθηκε το μήκος του μοντέλου $l=0,4m$, ενώ για κάθετο προσανατολισμό χρησιμοποιήθηκε το πλάτος $w=0,2m$. Και τιμή ν το κινητικό ιξώδες του ρευστού. Η χρήση του αριθμού Reynolds ήταν ο προσδιορισμός του καθεστώτος της ροής πάνω από το νερό, συγκρίνοντάς τον με την κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds (Çengel & Ghajar, Μεταφορά Θερμότητας και Μάζας, 2012) για ροή πάνω από επίπεδες πλάκες. Οι εξισώσεις που θα παρουσιαστούν παρακάτω για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt του συντελεστή συναγωγής οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας για τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Όλες οι εξισώσεις για μεταφορά θερμότητας και μάζας που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την εργασία, ισχύουν για τον συνδυασμό καθεστώτος στρωτής ροής και εξαναγκασμένης συναγωγής.

Στον αριθμό Reynolds για το πείραμα ελεύθερης μεταφοράς η τιμή τέθηκε ίση 1. Η τιμή 1 είναι μια τιμή, 5 τάξεις μεγέθους μικρότερη από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για ροή πάνω από επίπεδες πλάκες, πολύ μικρή αλλά όχι 0. Στον προσδιορισμό του τύπου της συναγωγής που εμφανίζεται στο μοντέλο της κολυμβητικής δεξαμενής, συγκρίνονται οι αριθμοί Grashof και Reynolds, μέσω της σχέσης:

$$\frac{Gr}{Re^2} \quad (4.8)$$

Η τιμή για τον αριθμό Reynolds ίση με 1 επιλέχθηκε για να μην εμφανίζεται 0 στον παρονομαστή της παραπάνω σχέσης. Το αποτέλεσμα της σχέσης αυτής οδηγεί στον προσδιορισμό του τύπου της συναγωγής. Σε περίπτωση που η σχέση αυτή έχει αποτέλεσμα $Gr/Re^2 \gg 1$ τότε η συναγωγή χαρακτηρίζεται ως ελεύθερη, αν το αποτέλεσμα $Gr/Re^2 \ll 1$ η συναγωγή χαρακτηρίζεται ως εξαναγκασμένη και στην περίπτωση που $Gr/Re^2=1$ τότε έχουμε φαινόμενα μικτής συναγωγής. Για τον προσδιορισμό του τύπου της συναγωγής σε αυτήν την εργασία, ο λόγος Gr/Re^2 συγκρίθηκε με τιμές μίας τάξης μεγέθους μεγαλύτερες και μικρότερες από το 1. Δηλαδή $Gr/Re^2 > 10$ ελεύθερη συναγωγή και $Gr/Re^2 < 0,1$ εξαναγκασμένη συναγωγή. Ο προσδιορισμός του τύπου της συναγωγής και το ερώτημα αν αναπτύσσεται μικτή συναγωγή στις συνθήκες που πραγματοποιήθηκε το πείραμα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6.

Με την χρήση του αριθμού Grashof και του αριθμού Prandtl, το γινόμενο τους, μας δίνει τον αριθμό Rayleigh. Ο αριθμός Rayleigh χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt στην ελεύθερη συναγωγή και υπολογίζεται από το γινόμενο των αριθμών Grashof και Prandtl:

$$Ra = Gr * Pr \quad (4.9)$$

Ο αριθμός Nusselt εμφανίζεται σε ελεύθερη και σε εξαναγκασμένη συναγωγή και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής. Στα πειράματα όπου η συναγωγή ήταν εξαναγκασμένη και με προϋπόθεση ότι το καθεστώς ροής είναι στρωτό, ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από την σχέση:

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4.10)$$

Για το πείραμα της ελεύθερης συναγωγής, ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται με τον παρακάτω τρόπο, για την περίπτωση που η θερμοκρασία του νερού είναι μικρότερη από την θερμοκρασία του αέρα, ισχύει η παρακάτω σχέση:
Για αριθμό Ryleigh, $10^4 < Ra < 10^7$ ισχύει η σχέση:

$$Nu = 0,54 Ra^{1/4} \quad (4.11)$$

Για αριθμό Ryleigh, $10^7 < Ra < 10^{10}$ ισχύει η σχέση:

$$Nu = 0,15 Ra^{1/4} \quad (4.12)$$

Στην περίπτωση που η θερμοκρασία του νερού είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του αέρα και ο αριθμός Ryleigh να είναι: $3 \cdot 10^5 < Ra < 3 \cdot 10^{10}$. Τότε θα ισχύει η σχέση:

$$Nu = 0,27 Ra^{1/4} \quad (4.13)$$

Ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση για ελεύθερη και εξαναγκασμένη συναγωγή:

$$h = \frac{Nu k}{L_c} \quad (4.14)$$

Όπου k η θερμική αγωγιμότητα του αέρα και L_c το χαρακτηριστικό μήκος κίνησης του ρευστού. Το χαρακτηριστικό μήκος, αλλάζει ανάλογα με τον προσανατολισμό της δεξαμενής. Για παράλληλο προσανατολισμό το L_c έχει την τιμή του μήκους της δεξαμενής = 0,4m και για κάθετο προσανατολισμό, το L_c έχει την τιμή του πλάτους της δεξαμενής = 0,2m.

4.5 Μεταφοράς θερμότητας και μάζας

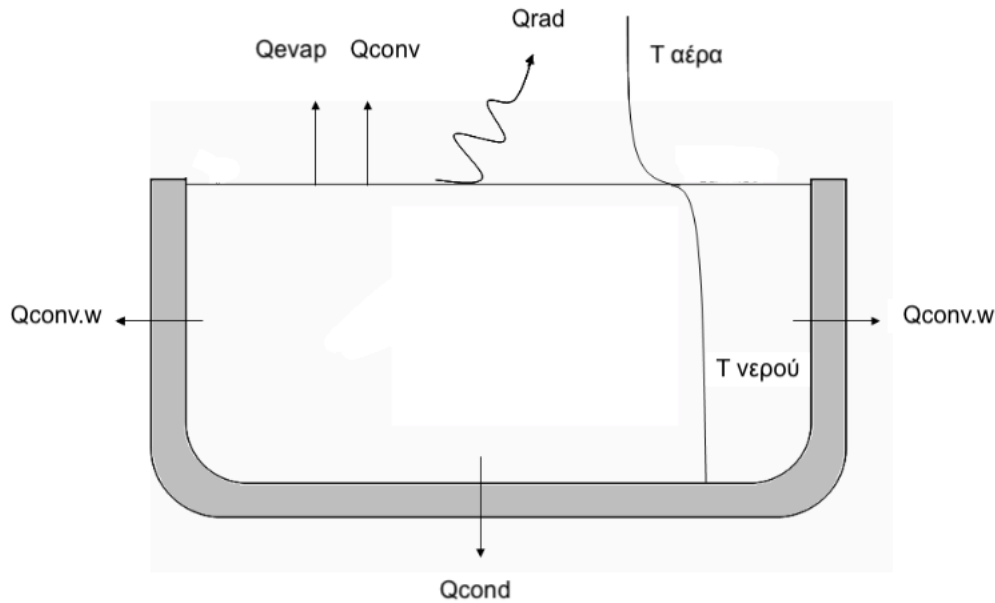
Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 1, το ενεργειακό ισοζύγιο της κολυμβητικής δεξαμενής είναι:

$$q_{total} = q_{conv} + q_{evap} + q_{rad} + q_{rep} + q_{cond} - q_{solar} - q_{heat} \quad (4.15)$$

Στο πείραμα το οποίο πραγματοποιήθηκε, δεν πραγματοποιούνταν πλήρωση στο νερό τις δεξαμενής, το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε κλειστό χώρο και η θερμοκρασία του νερού ήταν υψηλότερη από αυτήν του αέρα χωρίς να υπάρχει θέρμανση του νερού κατά την διάρκεια του πειράματος. Άρα, ο όρος για θερμικές

απώλειες q_{rep} και οι όροι για θερμικά κέρδη q_{solar} και q_{heat} είναι ίσοι πμε το μηδέν. Η εξίσωση 5.14 θα γίνει η ακόλουθη:

$$q_{total} = q_{evap} + q_{conv} + q_{conv,w} + q_{cond} + q_{rad} \quad (4.16)$$



Εικόνα 4-1

Ο πρώτος υπολογισμός θερμικών απωλειών είναι αυτός του λανθάνοντος θερμικού φορτίου που χάνετε λόγω εξάτμισης. Οι απώλειες αυτές υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για τον ρυθμό απώλειας μάζας λόγω εξάτμισης βλ. 4.1

$$Q_{evap} = \frac{dm}{dt} h_{fg} \quad (4.17)$$

Όπου h_{fg} είναι η ενθαλπία εξάτμισης.

Η θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής υπολογίστηκαν από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{conv} = A h dT \quad (4.18)$$

Όπου A η ελεύθερη επιφάνεια του νερού της κολυμβητικής δεξαμενής, h ο συντελεστής συναγωγής για το εκάστοτε πείραμα και dT η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του περιβάλλοντος και του νερού.

Για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών μέσω των τοιχωμάτων, οι υπολογισμοί χωρίστηκαν σε δύο μέρη. Το πρώτο είναι οι απώλειες μέσω αγωγή στην επιφάνεια που η δεξαμενή έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της ζυγαριάς.

Το δεύτερο είναι απώλειες μέσω συναγωγής από τα εκτεθειμένα στον αέρα τοιχώματα.

Για την περίπτωση των απωλειών μέσω αγωγής με την επαφή με την ζυγαριά, χρησιμοποιήθηκε η σχέση για την μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής.

$$Q_{cond} = k A dT \quad (4.19)$$

Θεωρήθηκε ότι η μεταφορά θερμότητας γίνεται μέσω του πλεξιγκλάς από το οποίο είναι κατασκευασμένη η δεξαμενή και ότι το πλεξιγκλάς έχει την ίδια θερμοκρασία με αυτή του κύριου όγκου νερού, δηλαδή ο όρος dT είναι η διαφορά θερμοκρασίας όπως αυτή μετρήθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος. Ο όρος k είναι η θερμική αγωγιμότητα του πλεξιγκλάς ($k=0,18$). Η επιφάνεια της πλατφόρμας της ζυγαριάς σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι τετράγωνου σχήματος και έχει διαστάσεις $237\text{mm} \times 237\text{mm}$. Για τον υπολογισμό της επιφάνειας επαφής της δεξαμενής με την πλατφόρμα της ζυγαριάς, χρησιμοποιήθηκε η τιμή του πλάτους της δεξαμενής ($w=0,2\text{m}$) και η τιμή της μίας πλευράς της ζυγαριάς ($0,237\text{m}$). Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει το αποτέλεσμα του εμβαδού $A= 0,0474\text{m}^2$.

Για το δεύτερο μέρος των θερμικών απωλειών μέσω των τοιχωμάτων, οι απώλειες μέσω των εκτεθειμένων στον αέρα τοιχωμάτων, έγινε η θεώρηση ότι το πλεξιγκλάς έχει την ίδια θερμοκρασία με τον κύριο όγκο νερού και ότι δεν εμφανίζεται μεταφορά μέσω συναγωγής στο εσωτερικό της δεξαμενής από το νερό στο πλεξιγκλάς. Αυτή η θεώρηση είναι αρκετά ρεαλιστική λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του νερού και των μικρών διαστάσεων της δεξαμενής, μεγάλη διαφορά πυκνότητας και κατά συνέπεια κίνηση ρευστού η οποία μπορεί να επηρεάσει την μεταφορά θερμότητας από το νερό στο τοίχωμα από πλεξιγκλάς είναι αμελητέα. Η μεταφορά θερμότητας η οποία θεωρήθηκε για αυτόν τον μηχανισμό είναι αγωγή διαμέσου του πάχους του πλεξιγκλάς και συναγωγή από τα τοιχώματα του πλεξιγκλάς στον αέρα. Υπάρχει λοιπόν σύνθετη μεταφορά αγωγής συναγωγής. Η σχέση με την οποία υπολογίστηκαν οι απώλειες είναι η παρακάτω:

$$Q_{conv,w} = k A dT \quad (4.20)$$

Ο όρος dT είναι η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον κύριο όγκο νερού και στο περιβάλλον. Όπου A το εμβαδό της εκτεθειμένης επιφάνειας της δεξαμενής στον αέρα, το οποίο είναι οι πλαϊνές επιφάνειες ($\text{πλάτος} \cdot \text{ύψος} \cdot 2$ και $\text{μήκος} \cdot \text{ύψος} \cdot 2$) και η εκτεθειμένη επιφάνεια του κάτω μέρους, η οποία είναι η επιφάνεια της δεξαμενής $A=0,08\text{m}^2$ μείον την επιφάνεια επαφής πλατφόρμας ζυγού-δεξαμενής που υπολογίστηκε παραπάνω ($A= 0,0474\text{m}^2$) δίνοντας μας το αποτέλεσμα ($A=0,08-0,0474=0,0326$). Το K ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας ο οποίος υπολογίστηκε από την σχέση:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_i} + \frac{d}{K}} \quad (4.21)$$

Ο όρος $1/\alpha_i=0,13$ είναι η ειδική αντίσταση θερμικής μεταβίβασης για τοίχους εσωτερικών επιφανειών η οποία χρησιμοποιήθηκε εδώ, $d=0,005\text{m}$ το πάχος του πλεξιγκλάς και $K=0,18$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του πλεξιγκλάς.

Για τον υπολογισμό των απωλειών μέσω ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε η σχέση για την μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας:

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_w^4 - T_a^4) \quad (4.22)$$

Η σχέση αυτή χρησιμοποιήθηκε δύο φορές και το άθροισμα των δύο ήταν το αποτέλεσμα για τις θερμικές απώλειες μέσω ακτινοβολίας. Μια φορά για την εκπομπή ακτινοβολίας από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού και μία για την εκτεθειμένη επιφάνεια των τοιχωμάτων από πλεξιγκλάς. Θεωρήθηκε ότι τα τοιχώματα από πλεξιγκλάς έχουν την ίδια θερμοκρασία με τον κύριο όγκο νερού. Οι όροι της σχέσεις είναι οι παρακάτω.

Όπου σ η σταθερά Stephan-Boltzmann ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), ο συντελεστής εκπομπής ε για το νερό ($\varepsilon=0,96$) και για το πλεξιγκλάς ($\varepsilon=0,86$), η επιφάνεια εκπομπής A για το νερό είναι η ελεύθερη επιφάνεια νερού ($A=0,08\text{m}^2$) και για το πλεξιγκλάς η εκτεθειμένη επιφάνεια όπως αυτή υπολογίστηκε παραπάνω για τις απώλειες μέσω συναγωγής τοιχωμάτων ($A=0,0326$). T_w η θερμοκρασία του κύριο όγκου νερού και T_a η θερμοκρασία του αέρα.

Μέσα από τα αποτελέσματα των παραπάνω εξισώσεων αθροιστήκαν οι απόλυτες τιμές τους. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίστηκε το ποσοστό το οποίο καταλαμβάνει ο κάθε μηχανισμός από τις συνολικές απώλειες καθώς και, από το πρόσημο που εμφανίζεται, την φορά της μεταφοράς θερμότητας.

Τέλος ο ρυθμός εξάτμισης, υπολογίστηκε διαιρώντας τον ρυθμό απώλειας μάζας (βλ.4.1) με το εμβαδό της δεξαμενής για να έχουμε το αποτέλεσμα E ($\text{g}/\text{m}^2\text{s}$). Πραγματοποιήθηκε μετατροπή στις μονάδες και ο ρυθμός εξάτμισης παρουσιάστηκε σε μονάδες ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$) διότι σε αυτές τις μονάδες έβγαιναν τα αποτελέσματα από τις εμπειρικές σχέσεις με τις οποίες συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας.

4.6 Εμπειρικές σχέσεις κατά Shah, Smith, Carrier

Οι εμπειρικές σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για να την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν με βάση της διεθνούς βιβλιογραφίας και τις οποίες είχαν σε εφαρμογές κολυμβητικών δεξαμενών και εξάτμισης νερού.

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν σύμφωνα με Shah (Shah, 2014) είναι οι παρακάτω:

Για ελεύθερη μεταφορά:

$$E = 0,00005 (p_w - p_r) \quad (4.23)$$

Για συνθήκες με ροή αέρα:

$$E = 0,00005 \left(\frac{v}{0,15}\right)^{0,7} (p_w - p_r) \quad (4.24)$$

Σύμφωνα με (Smith, Löff, & Jones, 1994) η σχέση για τον υπολογισμό εξάτμισης για συνθήκες εξαναγκασμένης και για ελεύθερης μεταφοράς είναι η παρακάτω:

$$E = \frac{0,76 (0,089 + 0,0782v)(p_w - p_r)}{h_{fg}} \quad (4.25)$$

Σύμφωνα με (Carrier, 1918) η σχέση για τον υπολογισμό εξάτμισης για συνθήκες εξαναγκασμένης και για ελεύθερης μεταφοράς είναι η παρακάτω:

$$E = \frac{(0,089 + 0,0782v)(p_w - p_r)}{h_{fg}} \quad (4.26)$$

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Καθεστώς ροής, συναγωγή

Το καθεστώς ροής και το είδος της συναγωγής προσδιορίστηκαν όπως αναγράφεται λεπτομερώς στην ενότητα 4.4. Τα αποτελέσματα για το καθεστώς της ροής και το είδος της συναγωγής ήταν υψίστης σημασίας για την επιλογή των σχέσεων για τον υπολογισμό των αριθμών *Nusselt* και του συντελεστή συναγωγής *h*, όπως αυτοί αναγράφονται λεπτομερώς στην υποενότητα 4.4, και κατά συνέπεια των υπολογισμών για τις θερμικές απώλειες. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων με την μέση τιμή των αριθμών Reynolds, Grashof και Grashof / Reynolds² για την διάρκεια του πειράματος παρουσιάζονται παρακάτω με την χρονολογική σειρά με την οποία πραγματοποιήθηκαν, όπως αυτή παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-1 πλην του πειράματος της ελεύθερης μεταφοράς.

Grashof	Reynolds	Grashof / Reynolds ²	Συναγωγή	Καθεστώς ροής
9,97E+06	5,21E+04	3,94E-03	Εξαναγκασμένη συναγωγή	Στρωτή ροή

Πίνακας 5-1 Κάθετα στην ροή 4.4 m/s

Grashof	Reynolds	Grashof / Reynolds ²	Συναγωγή	Καθεστώς ροής
7,35E+07	1,11E+05	6,37E-03	Εξαναγκασμένη συναγωγή	Στρωτή ροή

Πίνακας 5-2 Παράλληλα στην ροή 4.4 m/s

Grashof	Reynolds	Grashof / Reynolds ²	Συναγωγή	Καθεστώς ροής
1,23E+07	3,12E+04	1,33E-02	Εξαναγκασμένη συναγωγή	Στρωτή ροή

Πίνακας 5-3 Κάθετα στην ροή 2.2 m/s

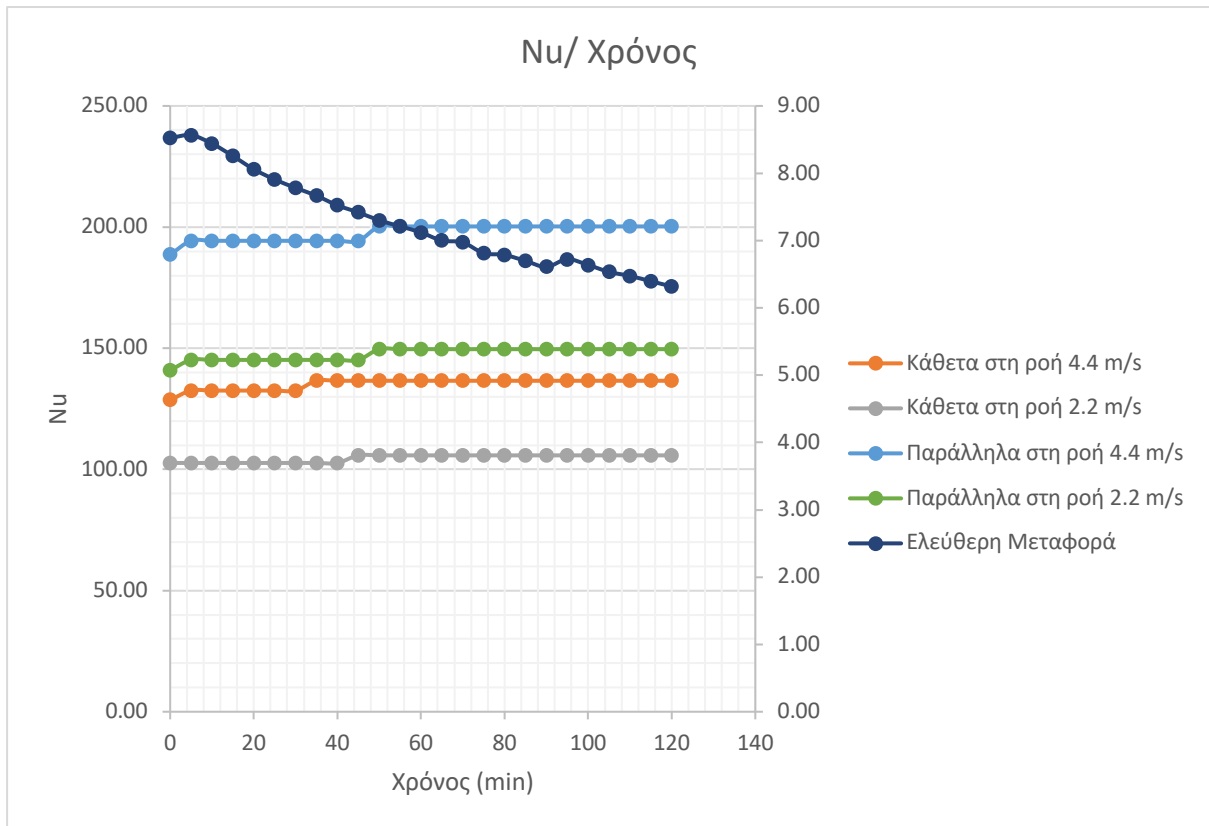
Grashof	Reynolds	Grashof / Reynolds ²	Συναγωγή	Καθεστώς ροής
8,55E+07	6,20E+04	2,37E-02	Εξαναγκασμένη συναγωγή	Στρωτή ροή

Πίνακας 5-4 Παράλληλα στην ροή 2.2 m/s

5.2 Αριθμός Nusselt, συντελεστής συναγωγής

Τύπος Ροής	Nusselt	h Συντελεστής συναγωγής
	(-)	(W/m ² *C)
Ελεύθερη μεταφορά	7,3	2,86
Κάθετα στη ροή (4,4 m/s)	135,3	17,50
Παράλληλα στη ροή (4,4 m/s)	197,7	12,83
Κάθετα στη ροή (2,2 m/s)	104,7	13,56
Παράλληλα στη ροή (2,2 m/s)	147,7	9,58

Πίνακας 5-5

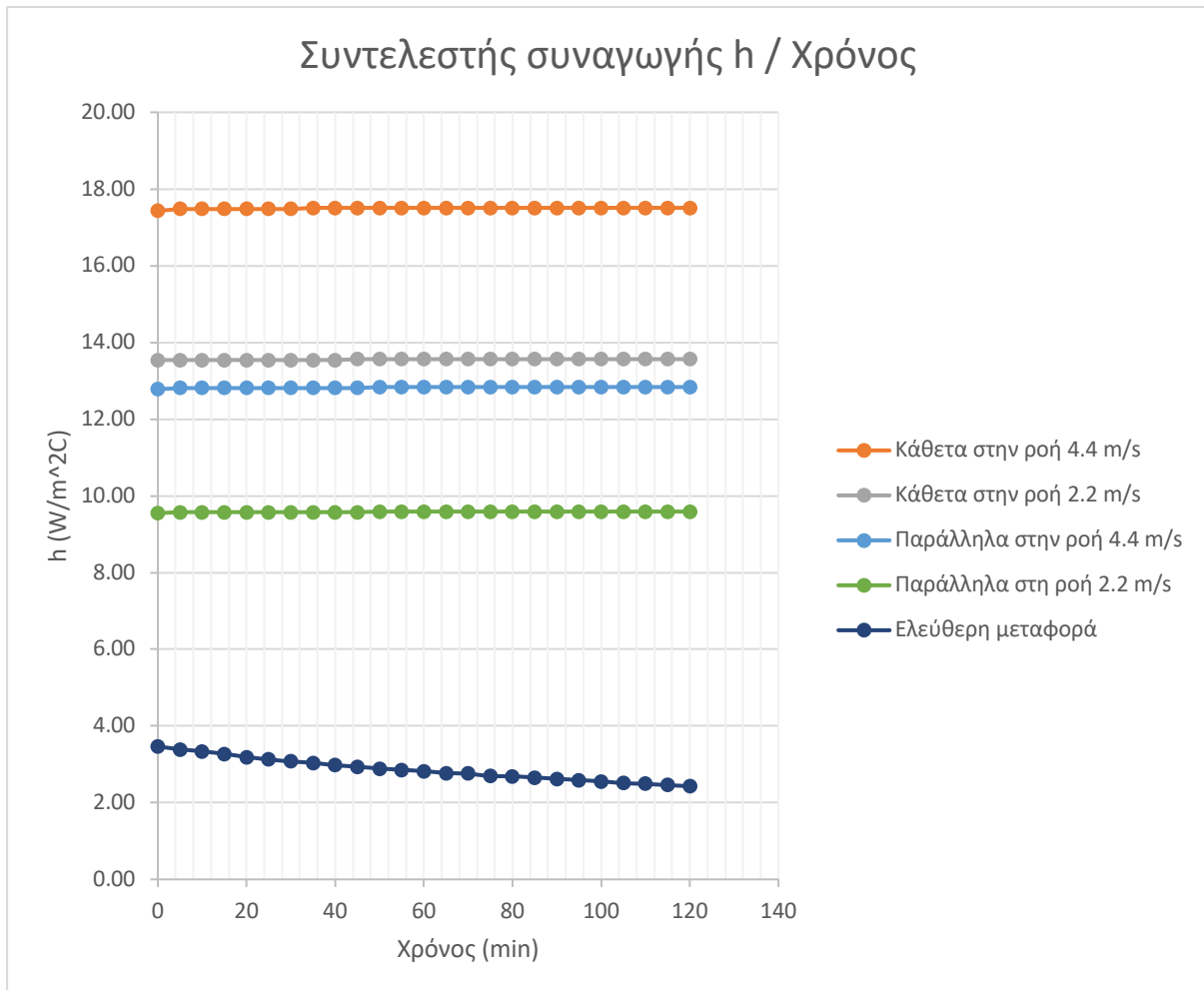


Διάγραμμα 5-1

Στον παραπάνω πίνακα 5.5 καθώς και στο Διάγραμμα 5-1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τον μέσο αριθμό Nusselt και τον συντελεστή συναγωγής κατά την διάρκεια του πειράματος. Ο αριθμός Nusselt και ο συντελεστής συναγωγής υπολογίστηκαν με την διαδικασία που αναγράφεται λεπτομερώς στην Ενότητα 4.4.

Παρατηρούμε ότι ο αριθμός Nusselt και ο συντελεστής συναγωγής, όπως αναμενόταν, παρουσιάζουν ραγδαία αύξηση για συνθήκες εξαναγκασμένης ροής. Επίσης όταν συγκρίνονται πειράματα ίδιου προσανατολισμού ο αριθμός Nusselt και ο συντελεστής συναγωγής αυξάνονται ανάλογα με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα.

Όσο αφορά τα πειράματα με την κολυμβητική δεξαμενή τοποθετημένη σε διαφορετικό προσανατολισμό, ο συντελεστής συναγωγής εμφανίζει υψηλότερες τιμές όταν η κολυμβητική δεξαμενή είναι τοποθετημένη κάθετα ως προς τον διαμήκη άξονα ροής. Κάτι το οποίο είναι εμφανές πιο ξεκάθαρα στους παρακάτω πίνακες.



Διάγραμμα 5-2

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5-2 ο συντελεστής συναγωγής είναι υψηλότερος στα δύο πειράματα στα οποία ο προσανατολισμός της κολυμβητικής δεξαμενής είναι κάθετος. Ανεξάρτητα από την ταχύτητα του αέρα, για ταχύτητα αέρα 2.2 m/s ο συντελεστής συναγωγής είναι υψηλότερος από όταν έχουμε ταχύτητα αέρα 4.4 m/s με παράλληλο προσανατολισμό. Επίσης παρατηρούμε συγκρίνοντας το Διάγραμμα 5-2 με το Διάγραμμα 5-1 ότι παρότι ο συντελεστής συναγωγής είναι άμεσα εξαρτώμενος από τον αριθμό Nusselt, τα δύο διαγράμματα έχουν την ίδια μορφή, αλλά οι τιμές τους δεν είναι ανάλογες.

Σύμφωνα με την σχέση 4.14 ο συντελεστής συναγωγής εξαρτάται και είναι αντιστρόφως ανάλογος του χαρακτηριστικού μήκους L_c . Για τον λόγο ότι το χαρακτηριστικό μήκος είναι αυτό το οποίο επηρεάζει τον συντελεστή συναγωγής και όχι το εμβαδό της επιφάνειας της κολυμβητικής δεξαμενής, παρατηρείται η διαφορά για την τοποθέτηση σε παράλληλο και σε κάθετο προσανατολισμό. Το χαρακτηριστικό μήκος L_c είναι το μήκος το οποίο διανύει το ρεύμα αέρα κατά την διάρκεια της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και η τιμή του είναι ίση με αυτήν από το σημείο πρόσπτωσης της επίπεδης επιφάνειας στο οποίο ξεκινάει η μεταφορά θερμότητας σημείο το οποίο είναι εμφανές στην Εικόνα 3-5.

Για τοποθέτηση σε παράλληλο προσανατολισμό το χαρακτηριστικό μήκος (L_c) με το οποίο υπολογίζεται ο συντελεστής συναγωγής είναι το μήκος της κολυμβητικής

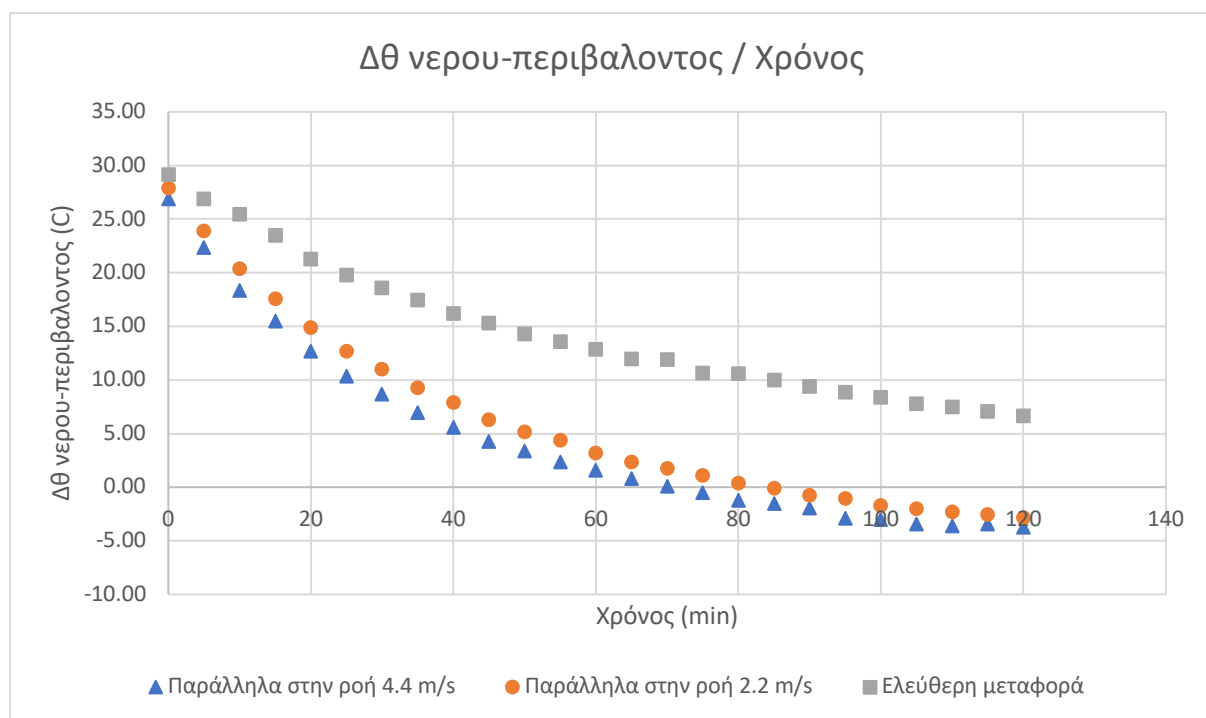
δεξαμενής $L=0,4$ m. Για τοποθέτηση σε κάθετο προσανατολισμό το χαρακτηριστικό μήκος (L_c) με το οποίο υπολογίζεται ο συντελεστής συναγωγής χρησιμοποιείται η τιμή του πλάτους της κολυμβητικής δεξαμενής $w=0,2$ m. Εφόσον ο συντελεστής συναγωγής όπως προαναφέρθηκε είναι αντιστρόφως ανάλογος του χαρακτηριστικού μήκους, έτσι θα παίρνει μεγαλύτερες τιμές για τα πειράματα στα οποία ο προσανατολισμός της κολυμβητικής δεξαμενής είναι κάθετος ως προς τον διαμήκη άξονα της ροής.

5.3 Θερμικές απώλειες και ποσοστά θερμικών απωλειών

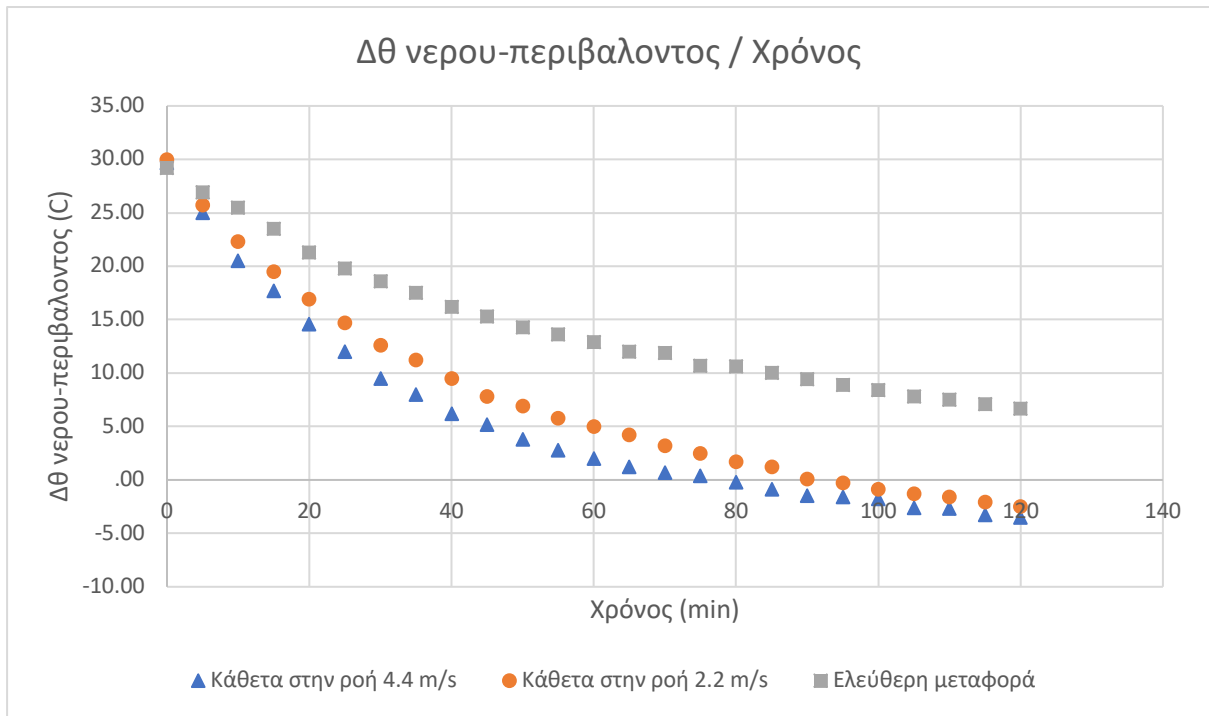
5.3.1 Πτώση θερμοκρασίας

Κινητήρια δύναμη για οποιαδήποτε μεταφορά θερμότητας είναι να υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά. Από το ενεργειακό ισοζύγιο του μοντέλου της κολυμβητικής δεξαμενής, Εξίσωση 4.16, όλες οι θερμικές απώλειες οφείλονται κατά συνέπεια στην θερμοκρασιακή διαφορά. Η θερμοκρασιακή διαφορά αυτή είναι η διαφορά ανάμεσα στην θερμοκρασία του κύριου όγκου νερού και του αέρα του περιβάλλοντος.

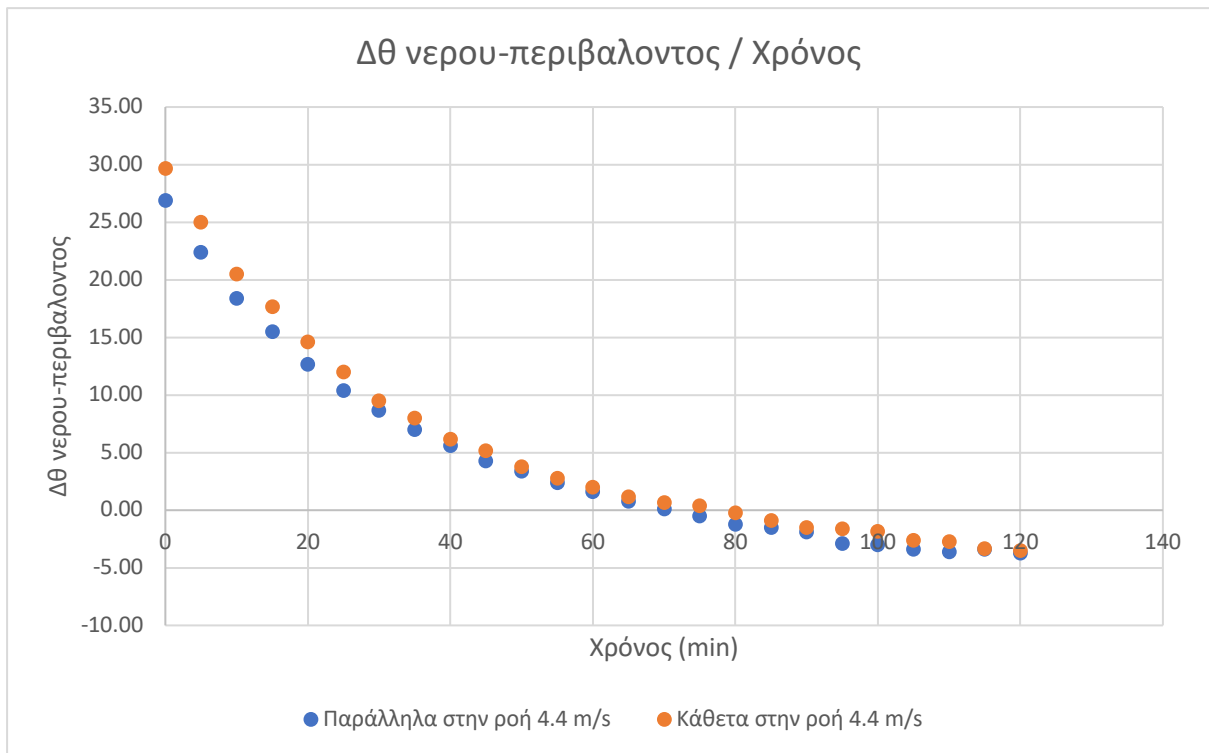
Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις για την θερμοκρασία του νερού κατά την διάρκεια των πειραμάτων, σε διαγράμματα ανάλογα με τον προσανατολισμό τους μαζί με την πτώση θερμοκρασίας απουσία ρεύματος αέρα.



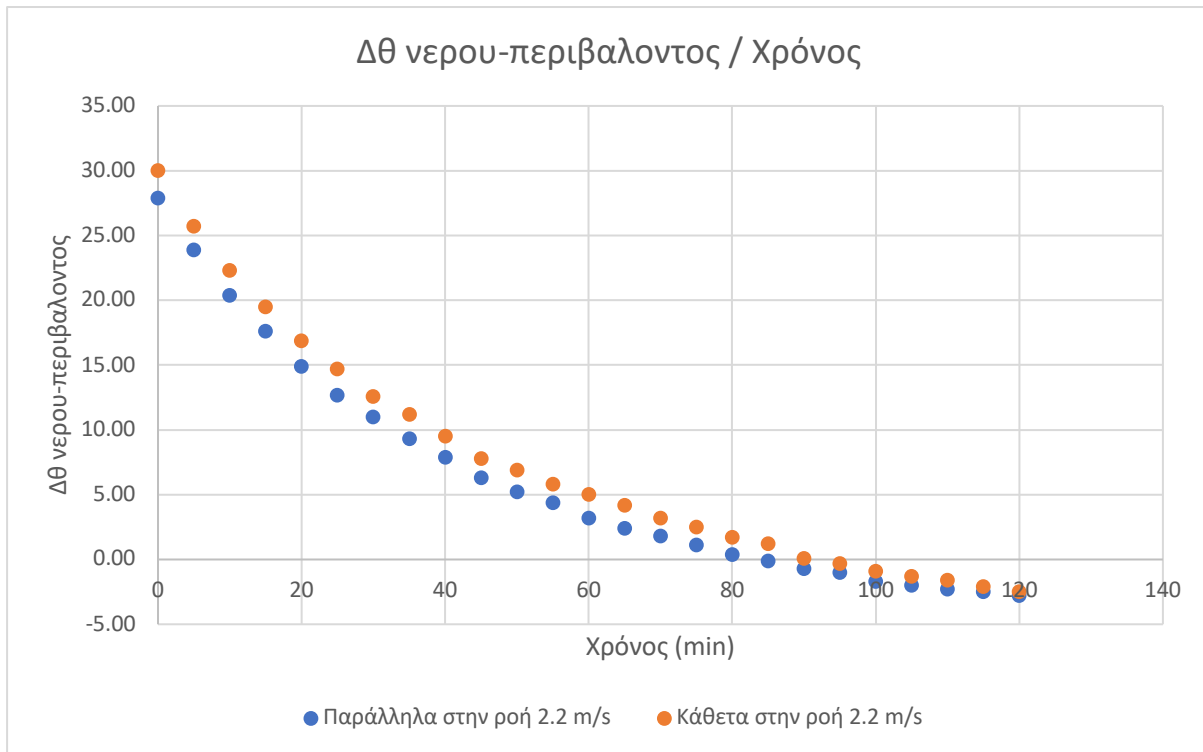
Διάγραμμα 5-3



Διάγραμμα 5-4



Διάγραμμα 5-5



Διάγραμμα 5-6

Παρατηρούμε ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ νερού και περιβάλλοντος έχει παρόμοια μορφή με γρήγορη μείωση στην αρχή του πειράματος όταν η διαφορά θερμοκρασίας και κατά συνέπεια οι απώλειες είναι μεγαλύτερες. Στο τέλος των πειραμάτων ο ρυθμός της πτώσης θερμοκρασίας γίνεται πιο αργός με όλα τα πειράματα εκτός του πειράματος ελεύθερης ροής η θερμοκρασία του νερού να φτάνει τιμή μικρότερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια οι θερμικές απώλειες γίνονται θερμικά κέρδη και η μοναδική θερμική απώλεια υπό αυτές τις συνθήκες είναι η εξάτμιση του νερού.

5.3.2 Θερμικές απώλειες

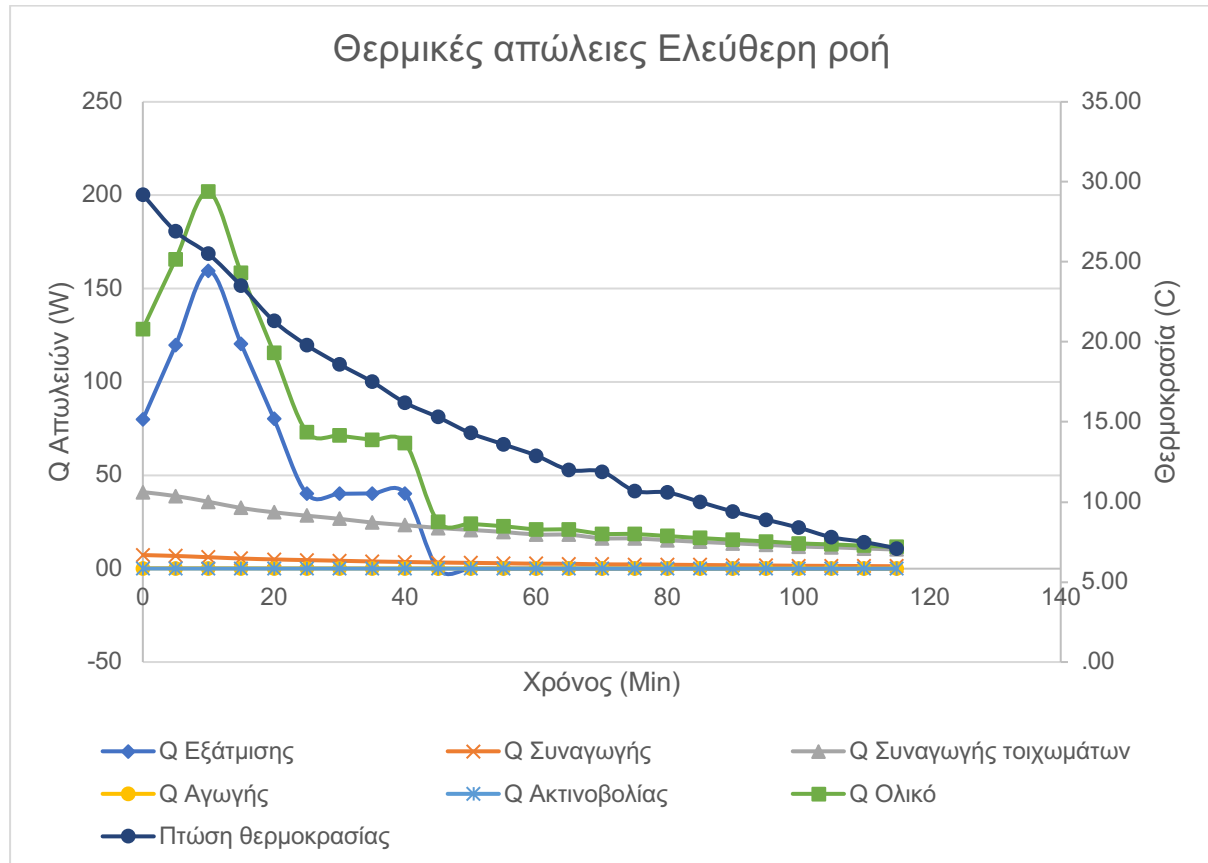
Τα αποτελέσματα για τις θερμικές απώλειες θα παρουσιαστούν ανά προσανατολισμό με το πείραμα της ελεύθερης ροής πρώτο. Μαζί με τα αποτελέσματα των υπολογισμών θα παρουσιαστεί και το ποσοστό για την εκάστοτε θερμική απώλεια.

Ελεύθερη Ροή

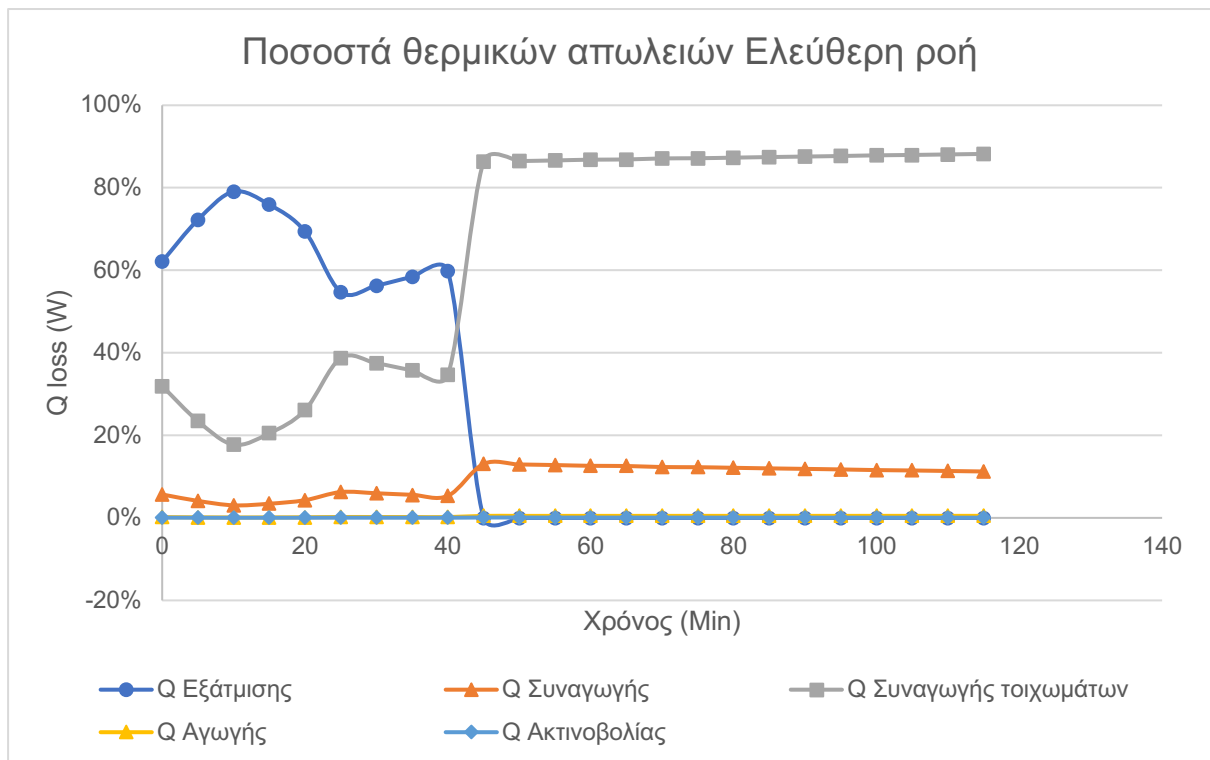
Για τις απώλειες από το πείραμα ελεύθερης μεταφοράς παρατηρούμε ότι οι απώλειες λόγω εξάτμισης φτάνουν έως 79%. Οι απώλειες λόγω συναγωγής από την

επιφάνεια του νερού είναι σε χαμηλό επίπεδο, απουσία ροής αέρα. Οι απώλειες μέσω συναγωγής από τα τοιχώματα είναι σταθερές όπως και οι απώλειες αγωγής μέσω της επαφής της δεξαμενής με την ζυγαριά και οι απώλειες μέσω ακτινοβολίας. Οι απώλειες μέσω αγωγής με την ζυγαριά και μέσω ακτινοβολίας είναι αμελητέες καθώς κατά την διάρκεια του πειράματος αθροιστικά δεν ξεπερνούν το 1% των συνολικών θερμικών απωλειών.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται όλες οι θερμικές απώλειες ως προς τον χρόνο για το πείραμα χωρίς ροή αέρα και τα ποσοστά θερμικών απωλειών.



Διάγραμμα 5-7

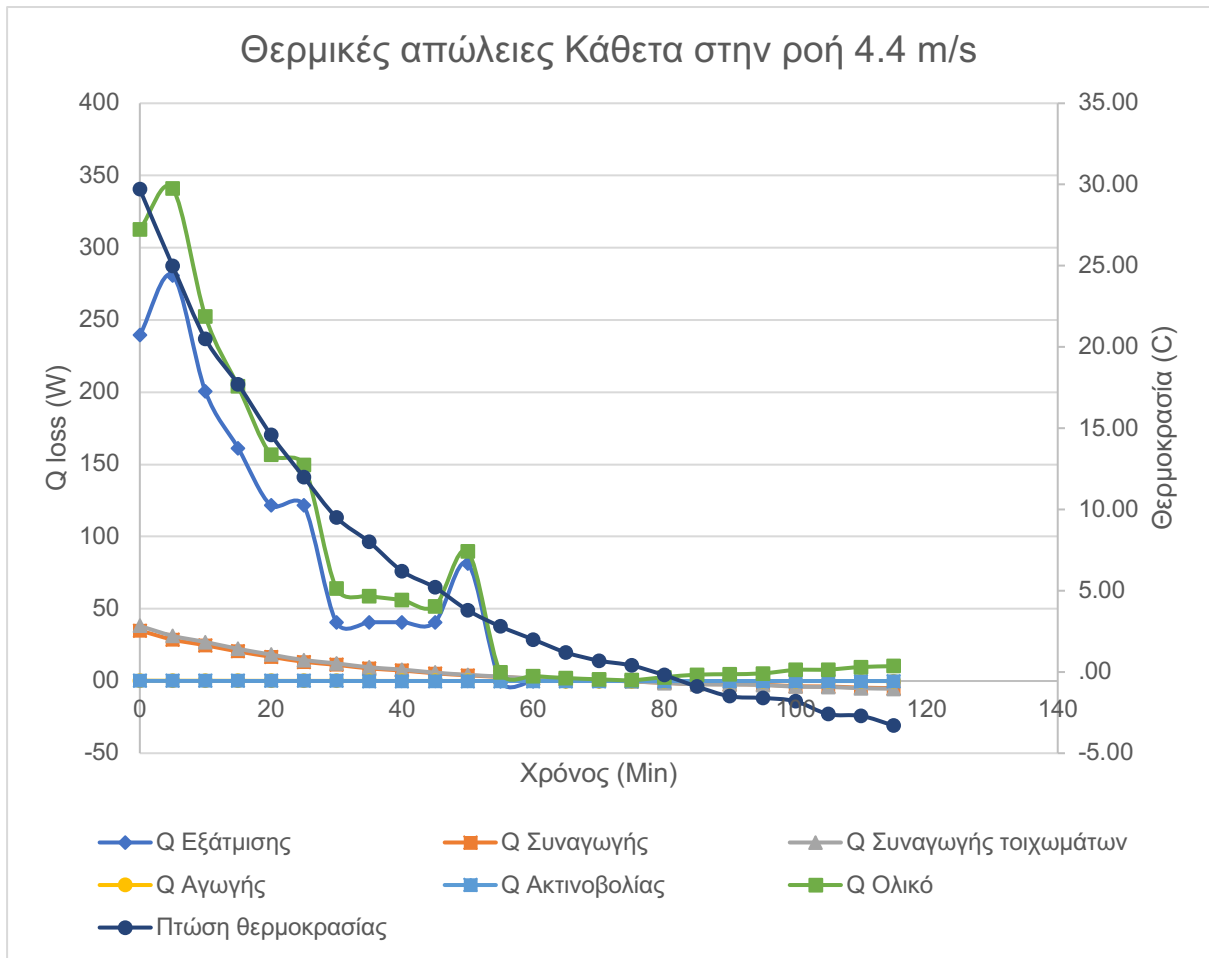


Διάγραμμα 5-8

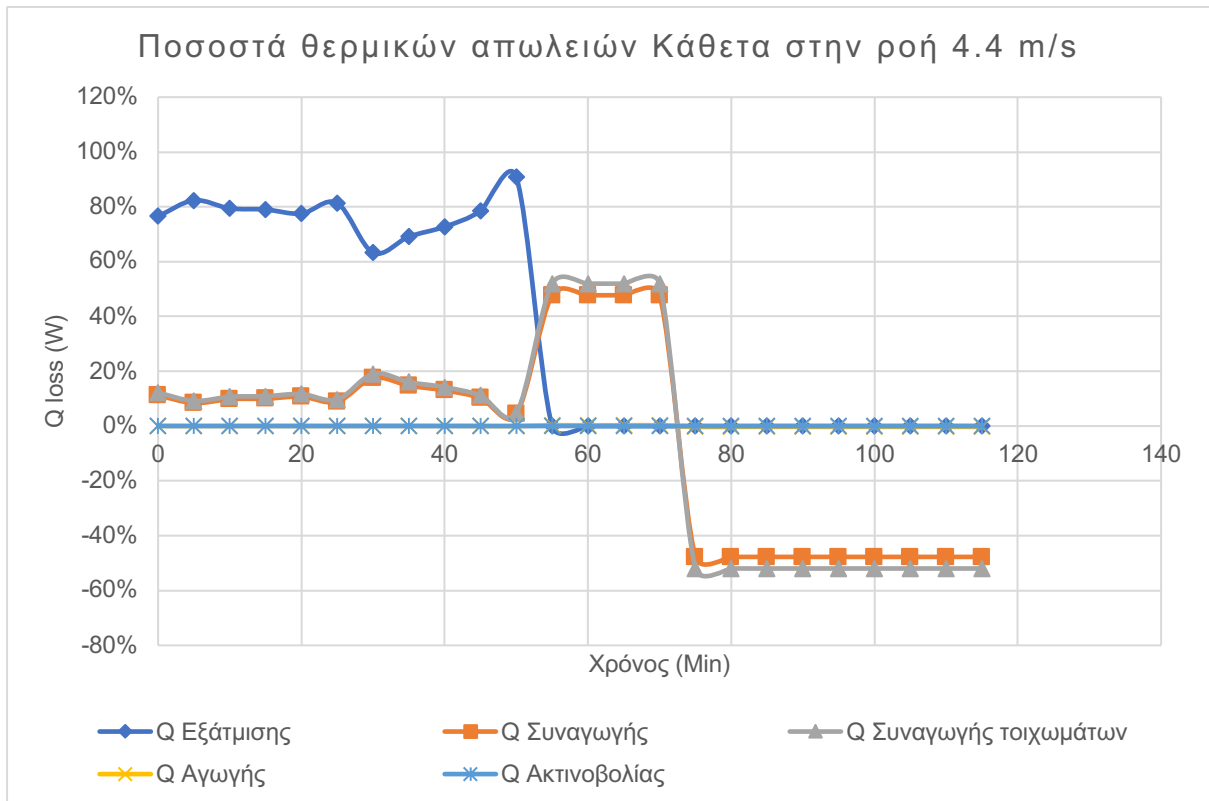
Κάθετος προσανατολισμός, ταχύτητα αέρα 4.4 m/s

Για τις απώλειες από το πείραμα σε κάθετο προσανατολισμό και ταχύτητα αέρα 4.4m/s παρατηρούμε ότι οι απώλειες λόγω εξάτμισης φτάνουν έως 82%. Οι απώλειες λόγω συναγωγής από την επιφάνεια του νερού είναι σε χαμηλό επίπεδο 10% των συνολικών απωλειών και είναι σε ίδιες τιμές με τις απώλειες συναγωγής μέσω των τοιχωμάτων. Οι απώλειες μέσω αγωγής με την ζυγαριά και μέσω ακτινοβολίας είναι αμελητέες καθώς κατά την διάρκεια του πειράματος αθροιστικά δεν ξεπερνούν το 1% των συνολικών θερμικών απωλειών.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται όλες οι θερμικές απώλειες ως προς τον χρόνο για το πείραμα με κάθετο προσανατολισμό και ταχύτητα αέρα 4.4 m/s.



Διάγραμμα 5-9

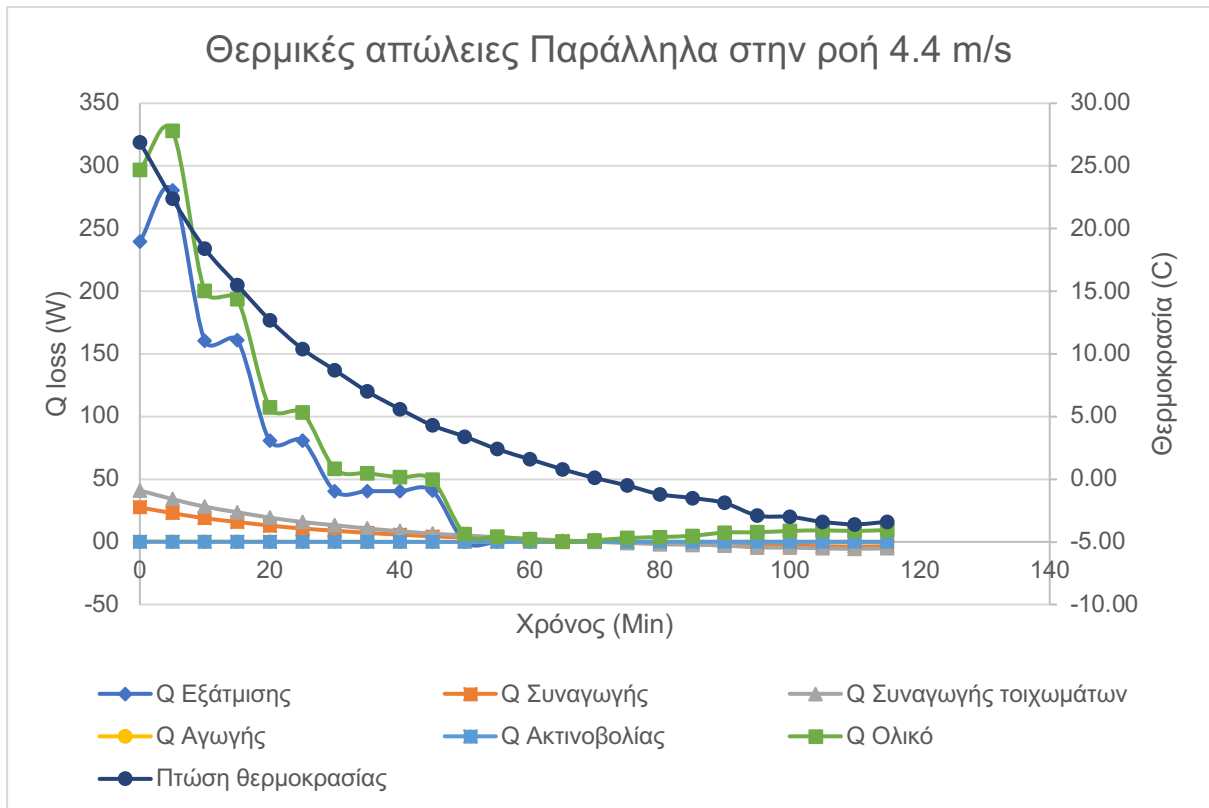


Διάγραμμα 5-10

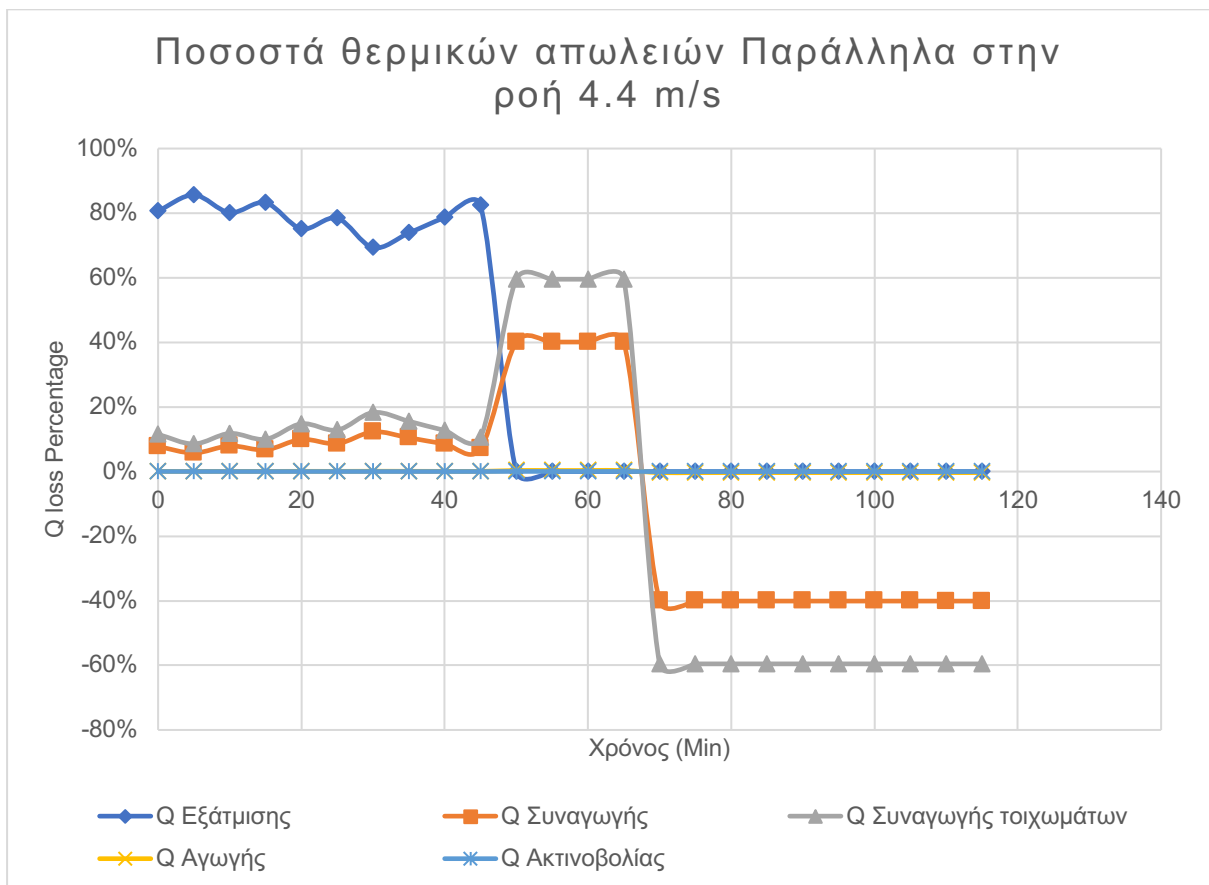
Παράλληλος προσανατολισμός, ταχύτητα αέρα 4.4m/s.

Για τις απώλειες από το πείραμα σε παράλληλο προσανατολισμό και ταχύτητα αέρα 4.4 m/s παρατηρούμε ότι οι απώλειες λόγω εξάτμισης φτάνουν έως 86%. Οι απώλειες λόγω συναγωγής από την επιφάνεια του νερού είναι σε χαμηλό επίπεδο <10% των συνολικών απωλειών και είναι σε μικρότερη τιμή από τις τιμές των απωλειών συναγωγής μέσω των τοιχωμάτων. Οι απώλειες μέσω αγωγής με την ζυγαριά και μέσω ακτινοβολίας είναι αμελητέες καθώς κατά την διάρκεια του πειράματος αθροιστικά δεν ξεπερνούν το 1% των συνολικών θερμικών απωλειών.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται όλες οι θερμικές απώλειες ως προς τον χρόνο για το πείραμα με παράλληλο προσανατολισμό και ταχύτητα αέρα 4.4 m/s.



Διάγραμμα 5-11

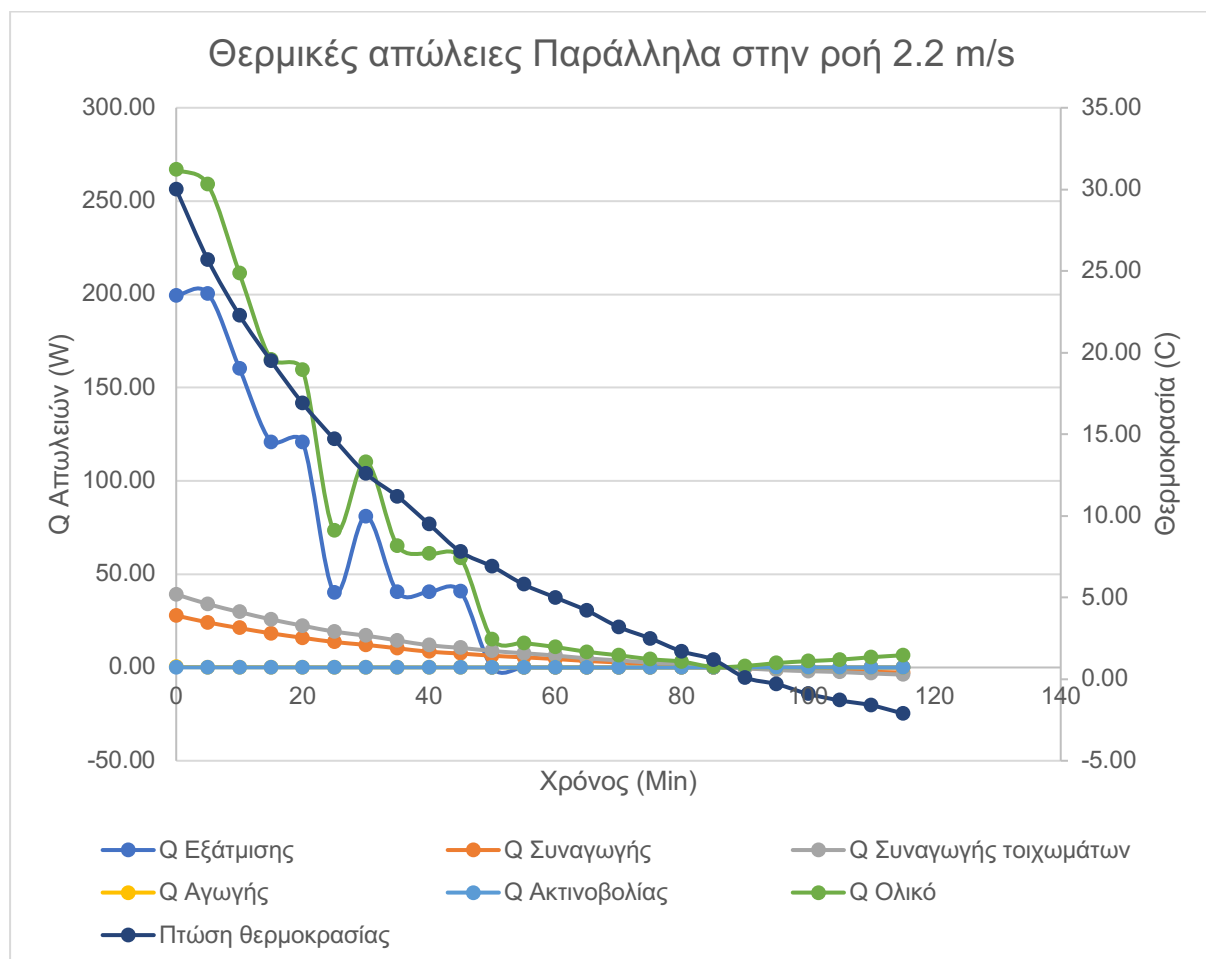


Διάγραμμα 5-12

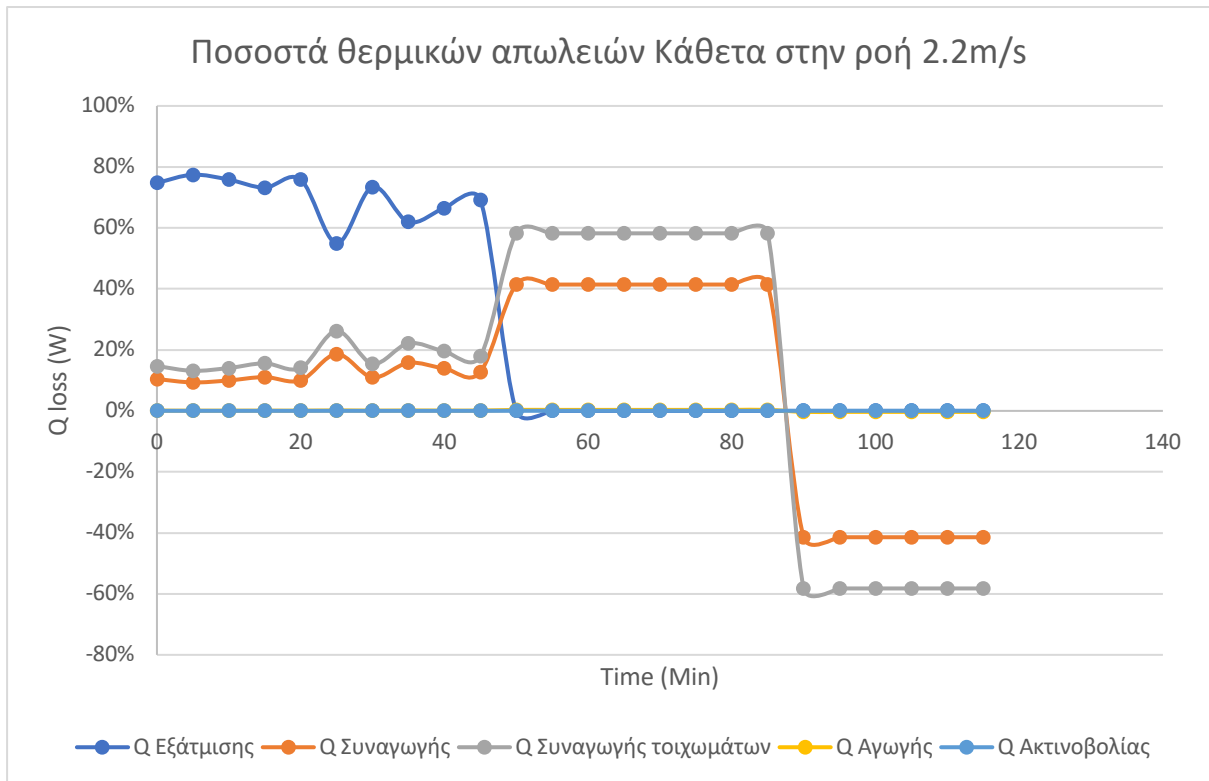
Κάθετος προσανατολισμός, ταχύτητα αέρα 2.2m/s.

Για τις απώλειες από το πείραμα σε κάθετο προσανατολισμό και ταχύτητα αέρα 2.2 m/s παρατηρούμε ότι οι απώλειες λόγω εξάτμισης φτάνουν έως 77% ποσοστό μειωμένο σε σχέση με τα πειράματα με μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα. Οι απώλειες λόγω συναγωγής από την επιφάνεια του νερού είναι σε χαμηλό επίπεδο <10% των συνολικών απωλειών και είναι σε μικρότερη τιμή από τις τιμές των απωλειών συναγωγής μέσω των τοιχωμάτων οι οποίες είναι μεγαλύτερες από 10%. Οι απώλειες μέσω αγωγής με την ζυγαριά και μέσω ακτινοβολίας είναι αμελητέες καθώς κατά την διάρκεια του πειράματος αθροιστικά δεν ξεπερνούν το 1% των συνολικών θερμικών απωλειών.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται όλες οι θερμικές απώλειες ως προς τον χρόνο για το πείραμα με κάθετο προσανατολισμό και ταχύτητα αέρα 2.2 m/s.



Διάγραμμα 5-13

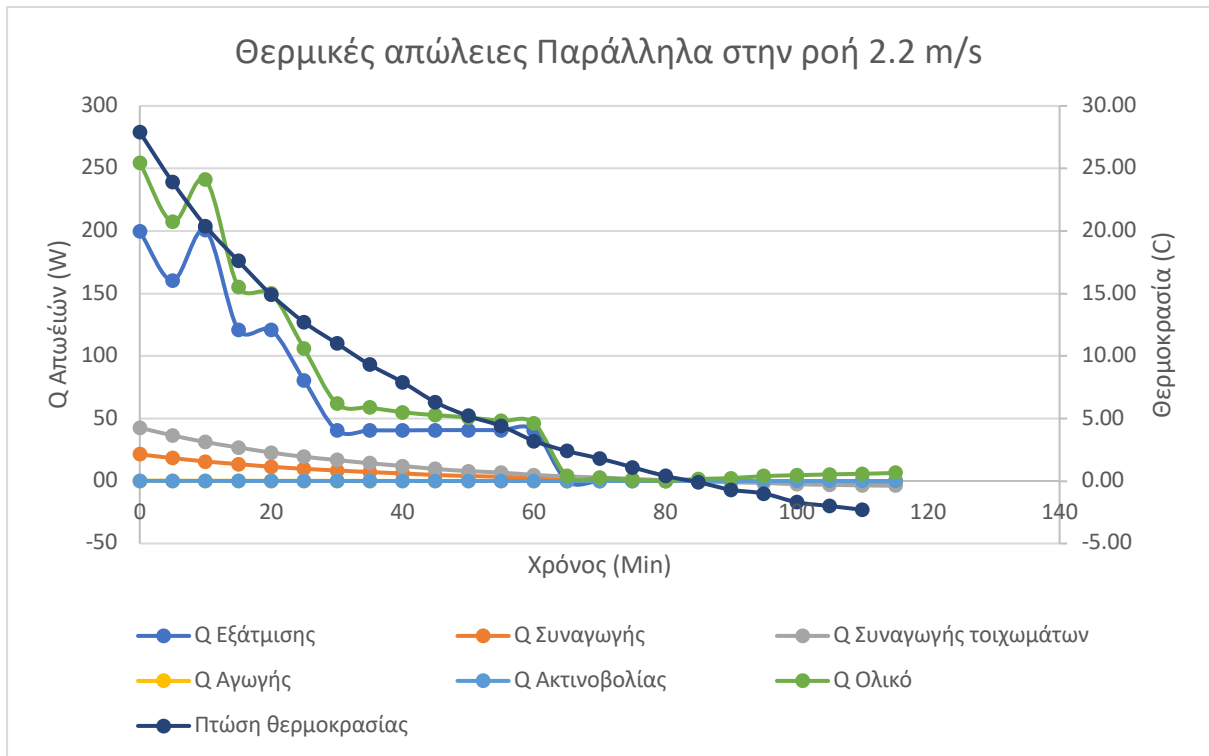


Διάγραμμα 5-14

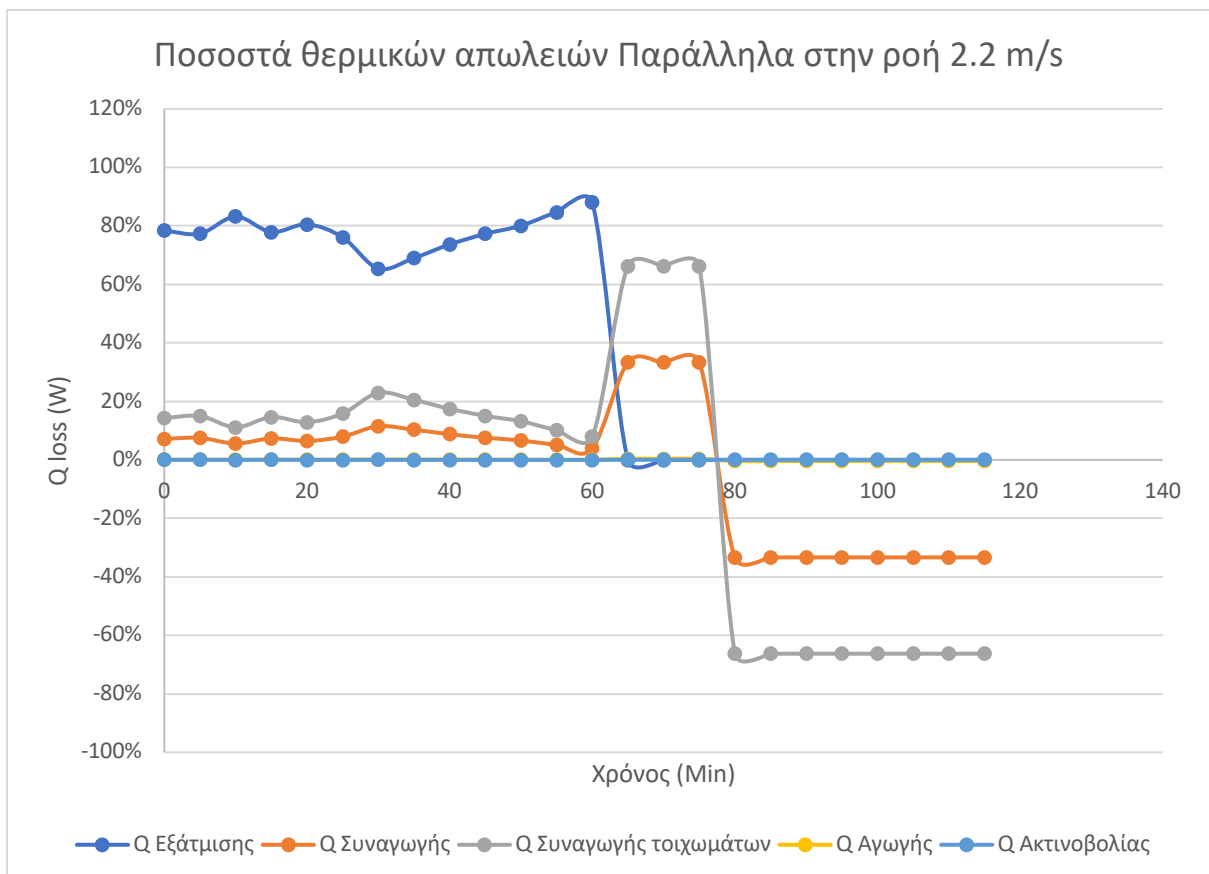
Παράλληλος προσανατολισμός, ταχύτητα αέρα 2.2 m/s.

Για τις απώλειες από το πείραμα σε παράλληλο προσανατολισμό και ταχύτητα αέρα 2.2 m/s παρατηρούμε ότι οι απώλειες λόγω εξάτμισης φτάνουν έως 83% ποσοστό μειωμένο σε σχέση με τα πειράματα με μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα. Οι απώλειες λόγω συναγωγής από την επιφάνεια του νερού είναι σε χαμηλό επίπεδο <10% των συνολικών απωλειών και είναι σε μικρότερη τιμή από τις τιμές των απωλειών συναγωγής μέσω των τοιχωμάτων οι οποίες είναι μεγαλύτερες από 10%. Οι απώλειες μέσω αγωγής με την ζυγαριά και μέσω ακτινοβολίας είναι αμελητέες καθώς κατά την διάρκεια του πειράματος αθροιστικά δεν ξεπερνούν το 1% των συνολικών θερμικών απωλειών.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται όλες οι θερμικές απώλειες ως προς τον χρόνο για το πείραμα με παράλληλο προσανατολισμό και ταχύτητα αέρα 2.2 m/s.



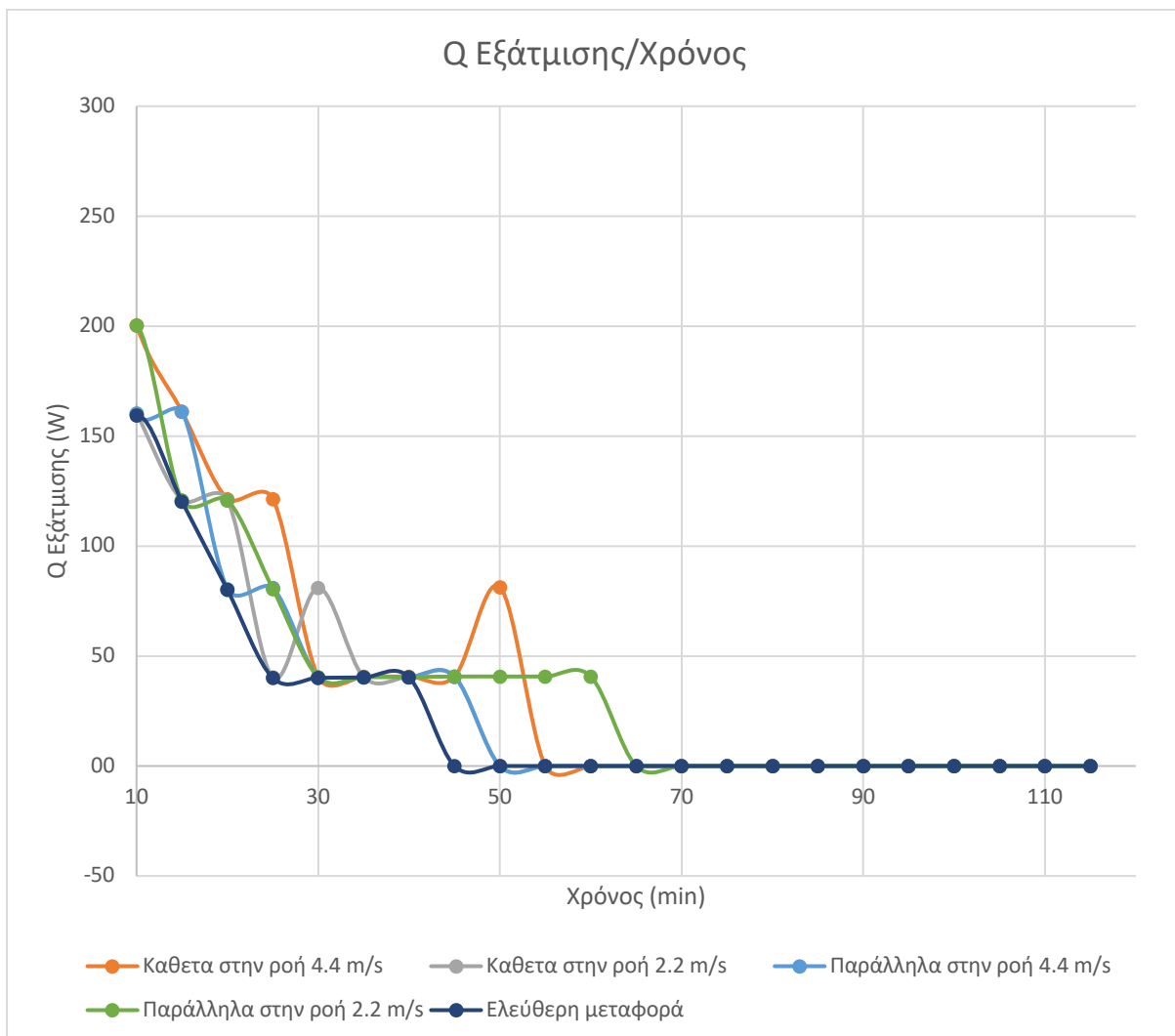
Διάγραμμα 5-15



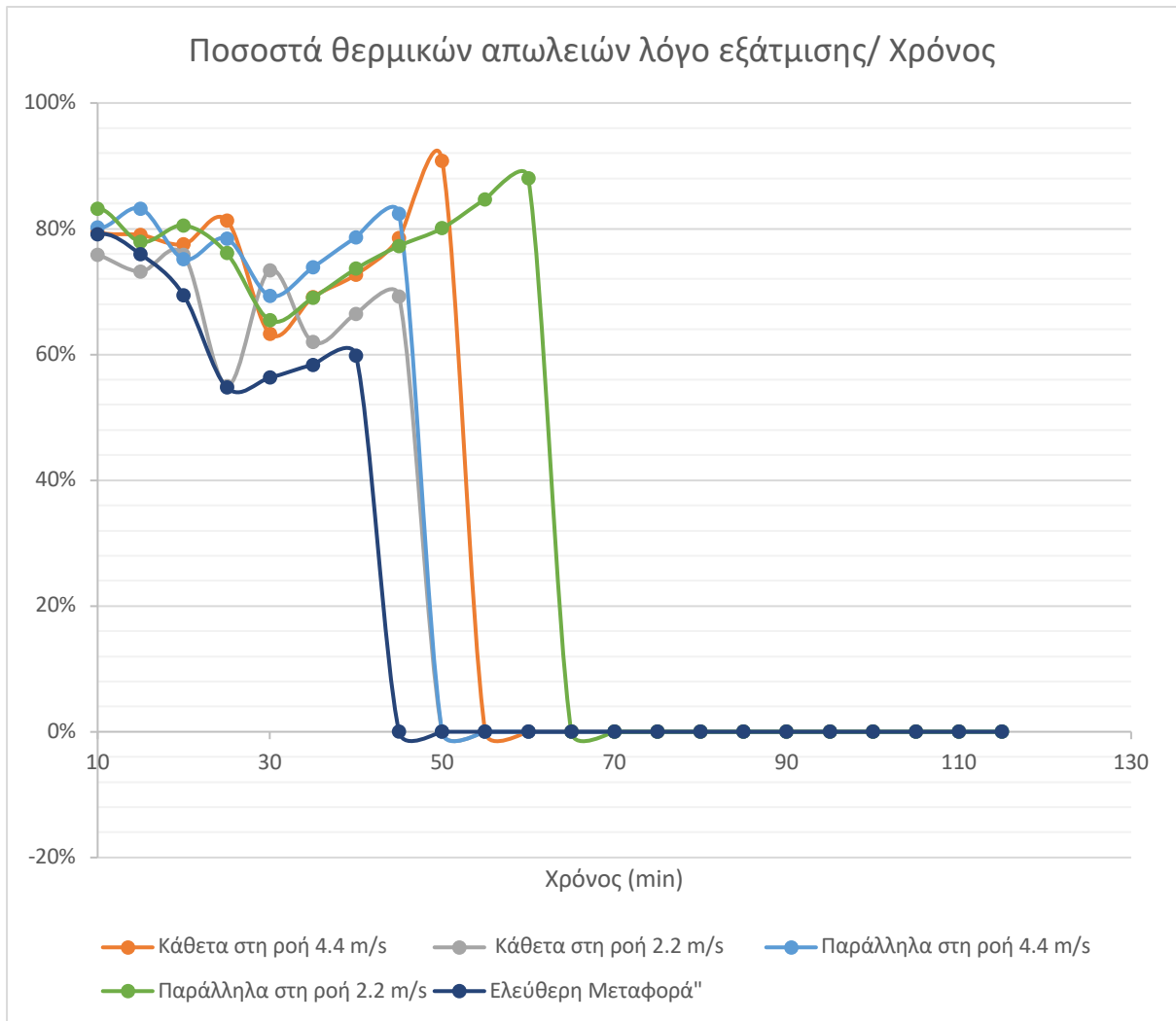
Διάγραμμα 5-16

Στα διαγράμματα Διάγραμμα 5-21, παρακάτω διαγράφονται οι θερμικές απώλειες για την διάρκεια των πειραμάτων για τις απώλειες μέσω εξάτμισης, μέσω συναγωγής από την επιφάνεια του νερού και τις ολικές θερμικές απώλειες για όλα τα πειράματα ως προς τον χρόνο.

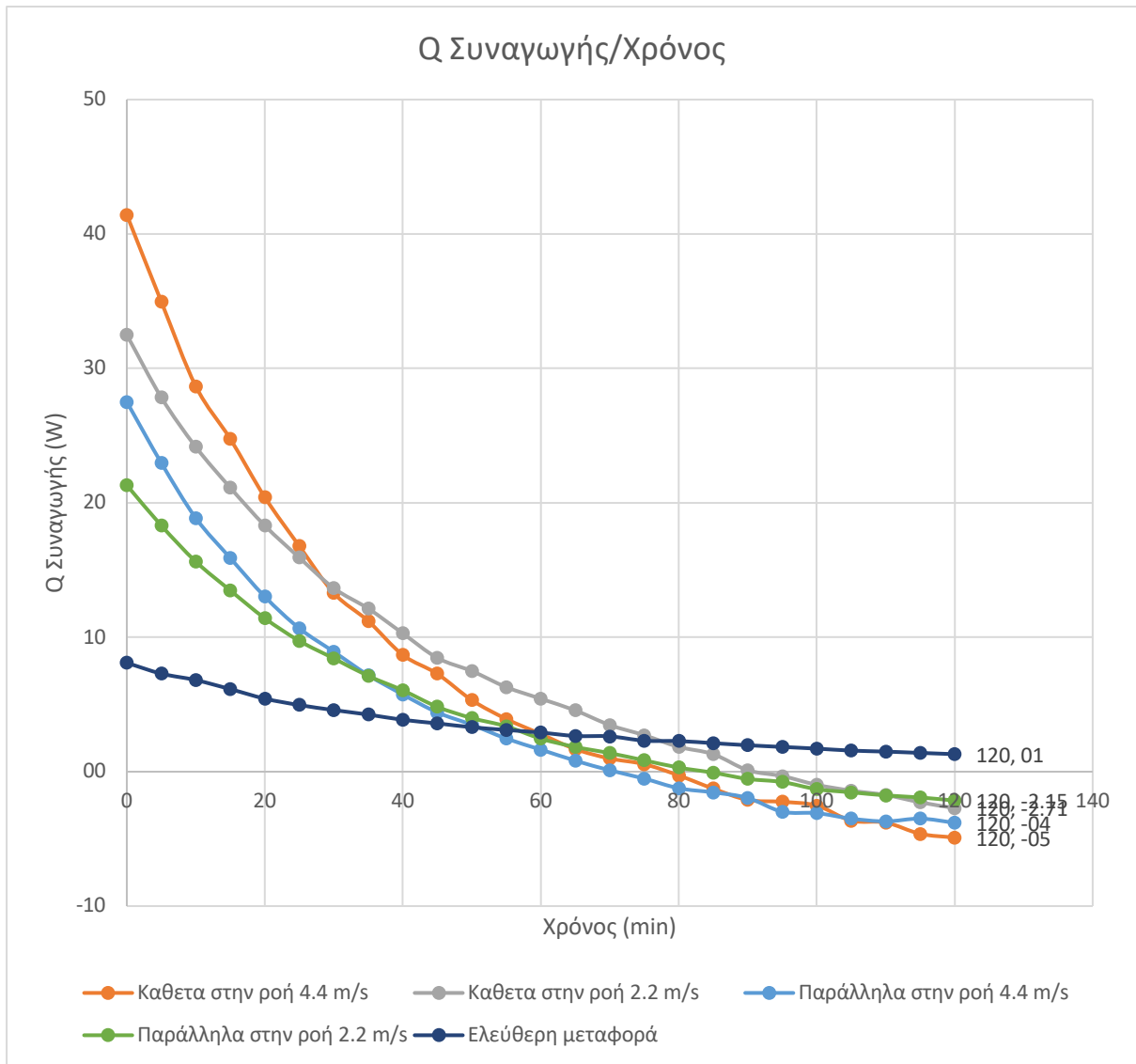
Από τα διαγράμματα για τις ολικές θερμικές απώλειες αλλά και για τις απώλειες μέσω συναγωγής παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται για κάθετο προσανατολισμό. Κάτι το οποίο προβλέφθηκε σύμφωνα με τα συμπεράσματα της ενότητας 5.3.2, ότι σε κάθετο προσανατολισμό παρουσιάζετε μεγαλύτερος συντελεστής συναγωγής.



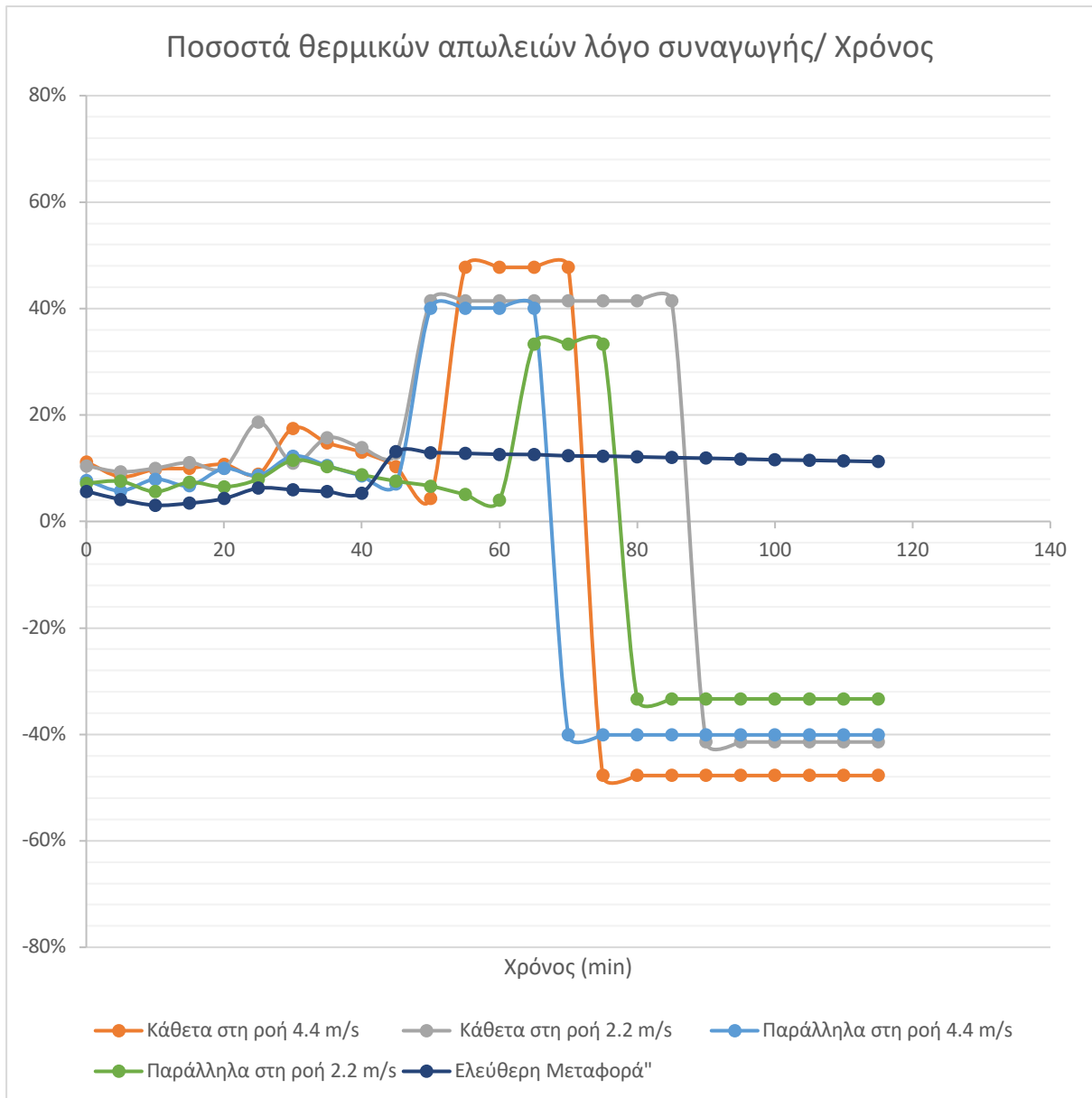
Διάγραμμα 5-17



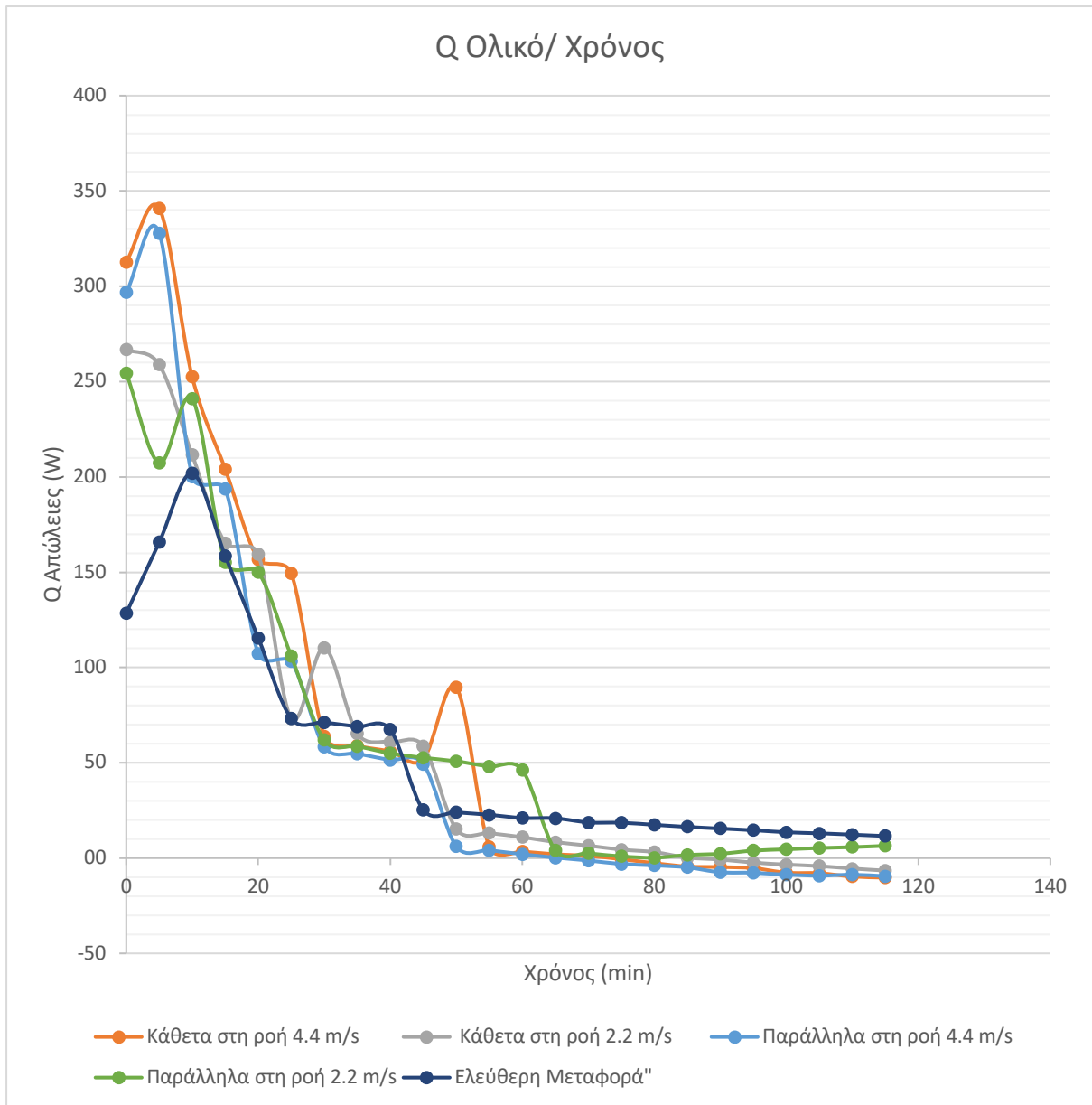
Διάγραμμα 5-18



Διάγραμμα 5-19



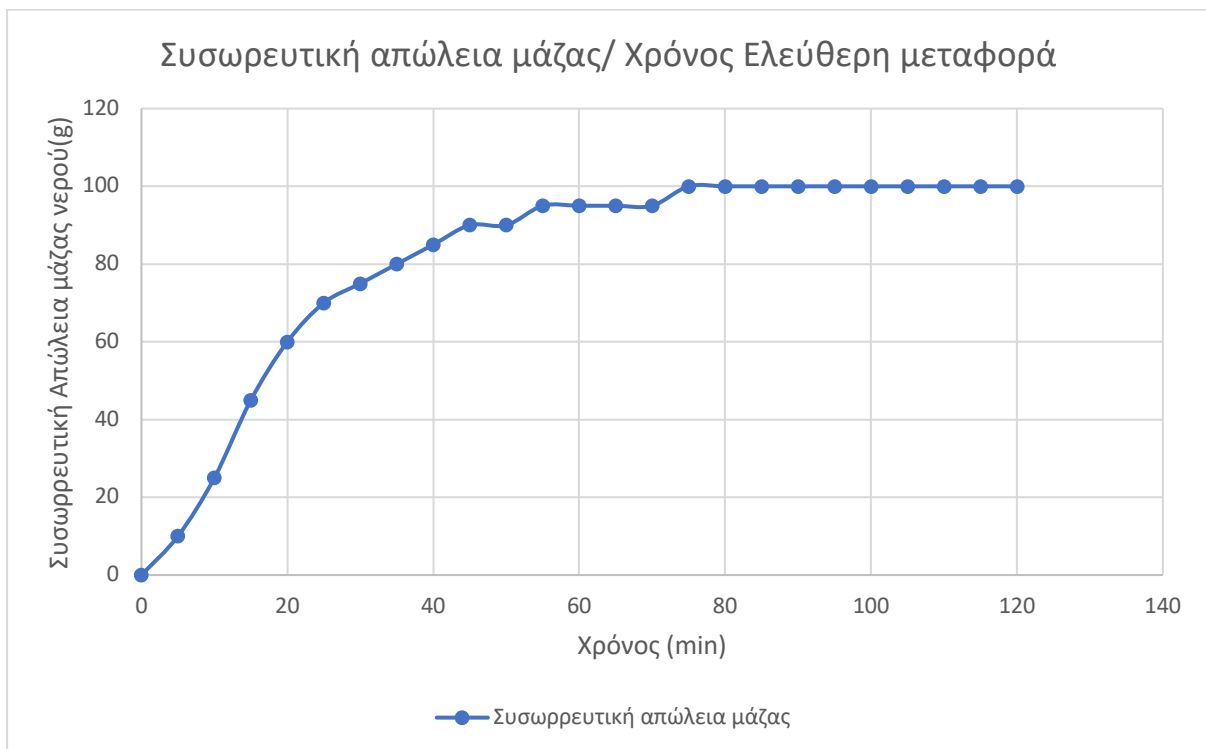
Διάγραμμα 5-20



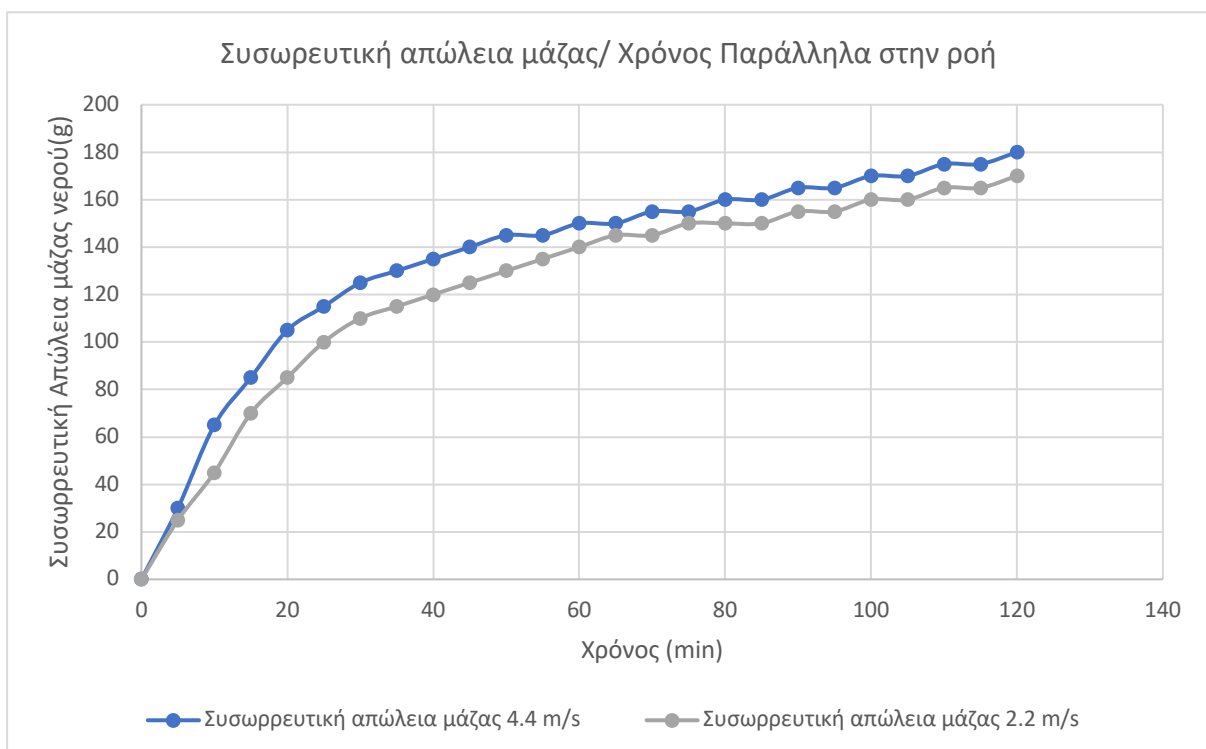
Διάγραμμα 5-21

5.4 Ρυθμός εξάτμισης

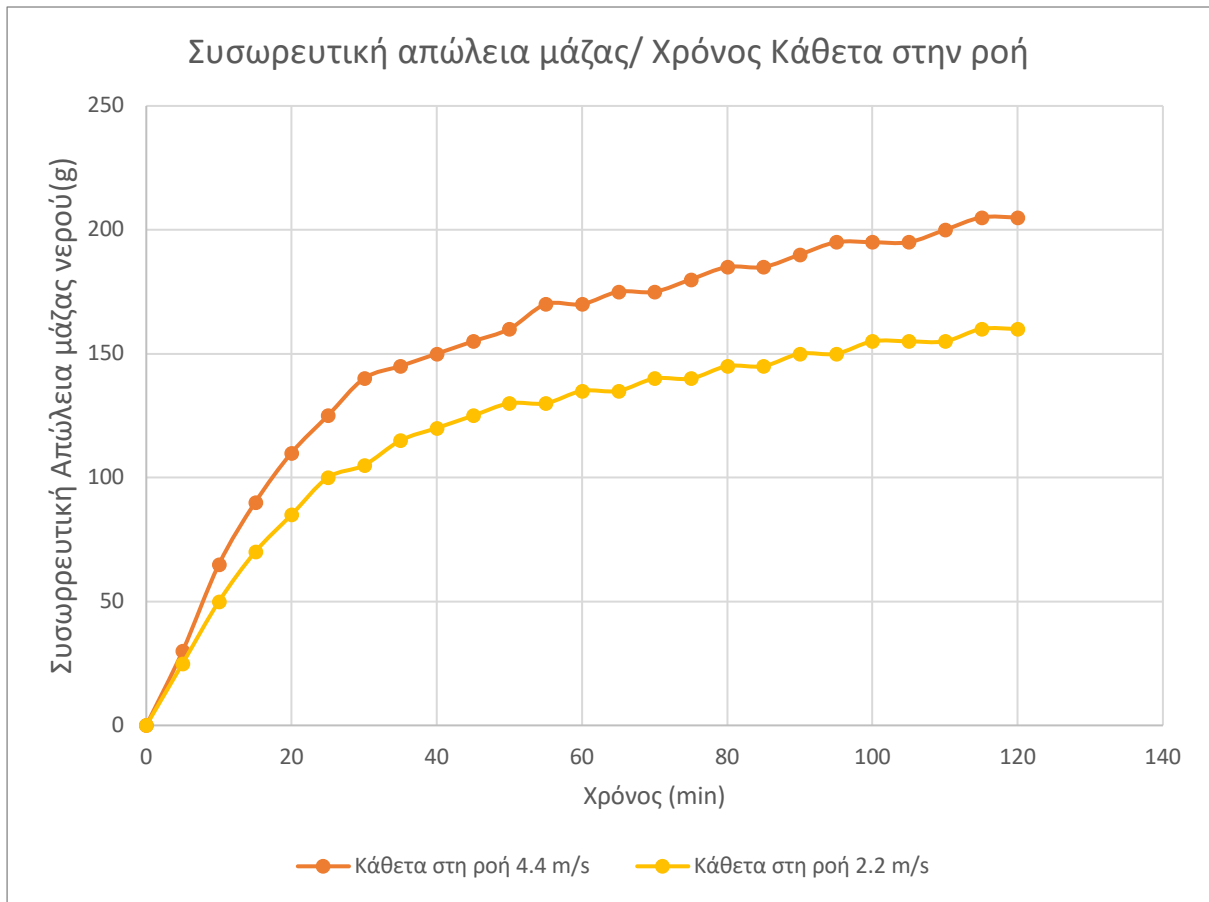
5.4.1 Απώλεια μάζας



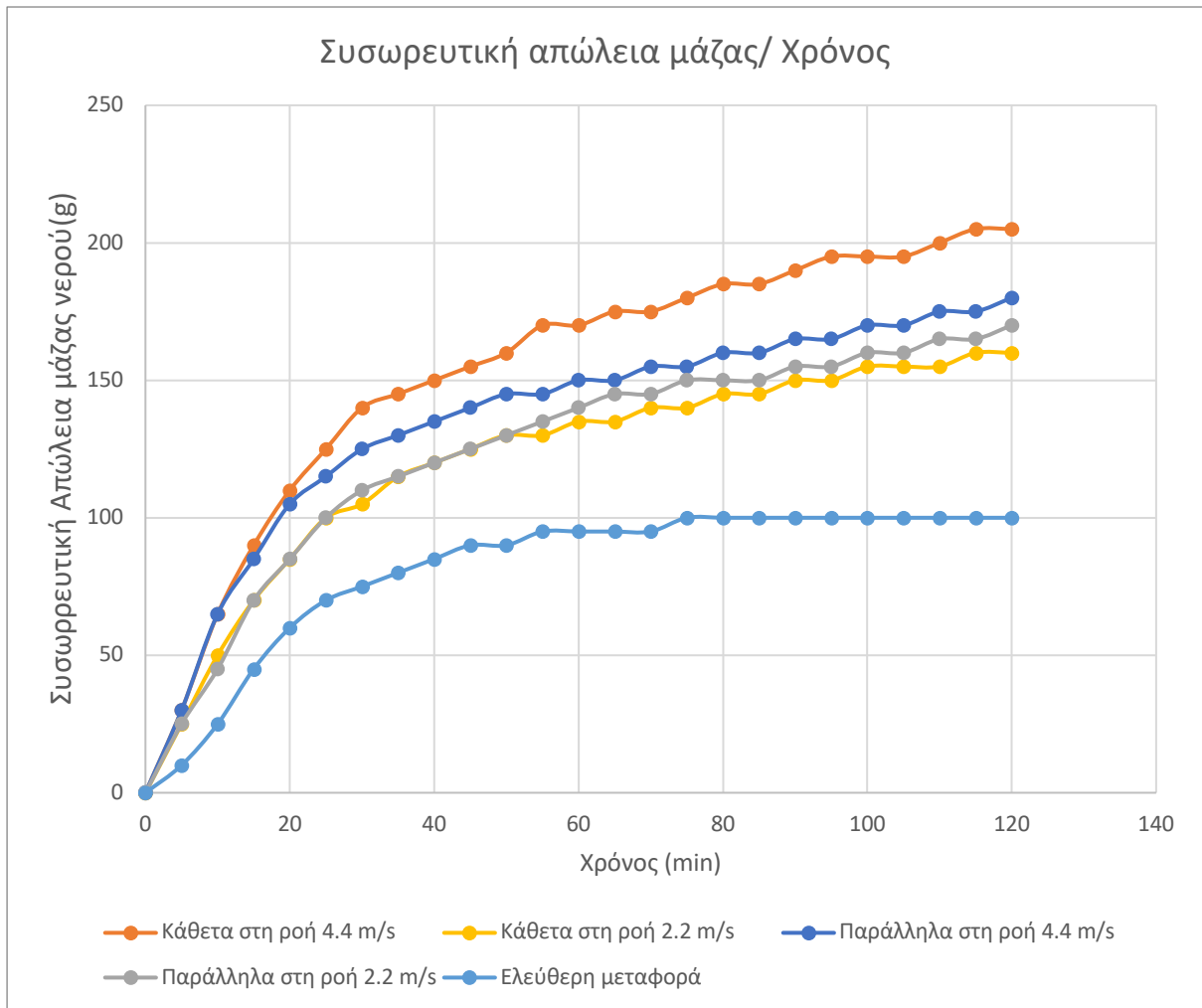
Διάγραμμα 5-22



Διάγραμμα 5-23

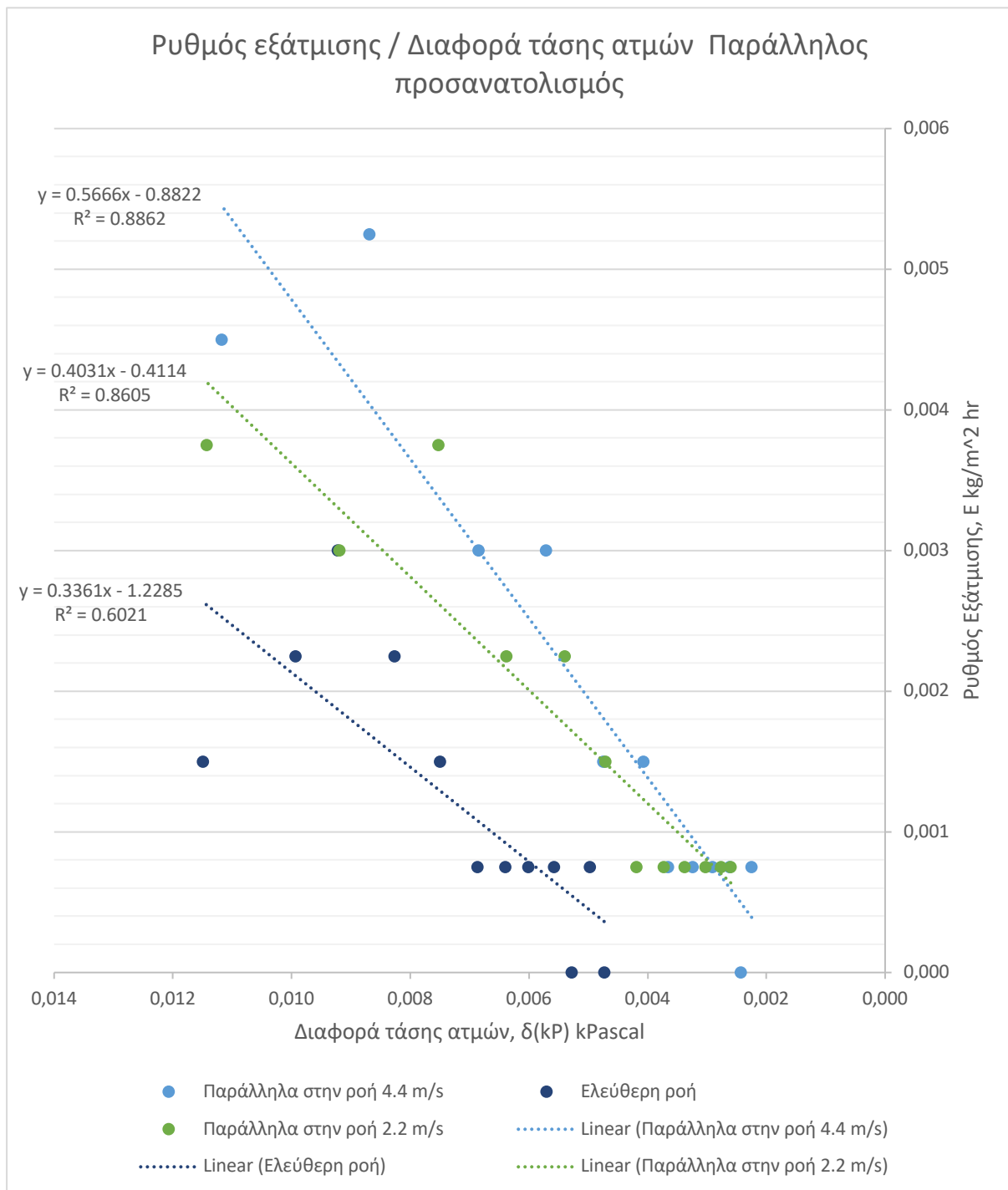


Διάγραμμα 5-24



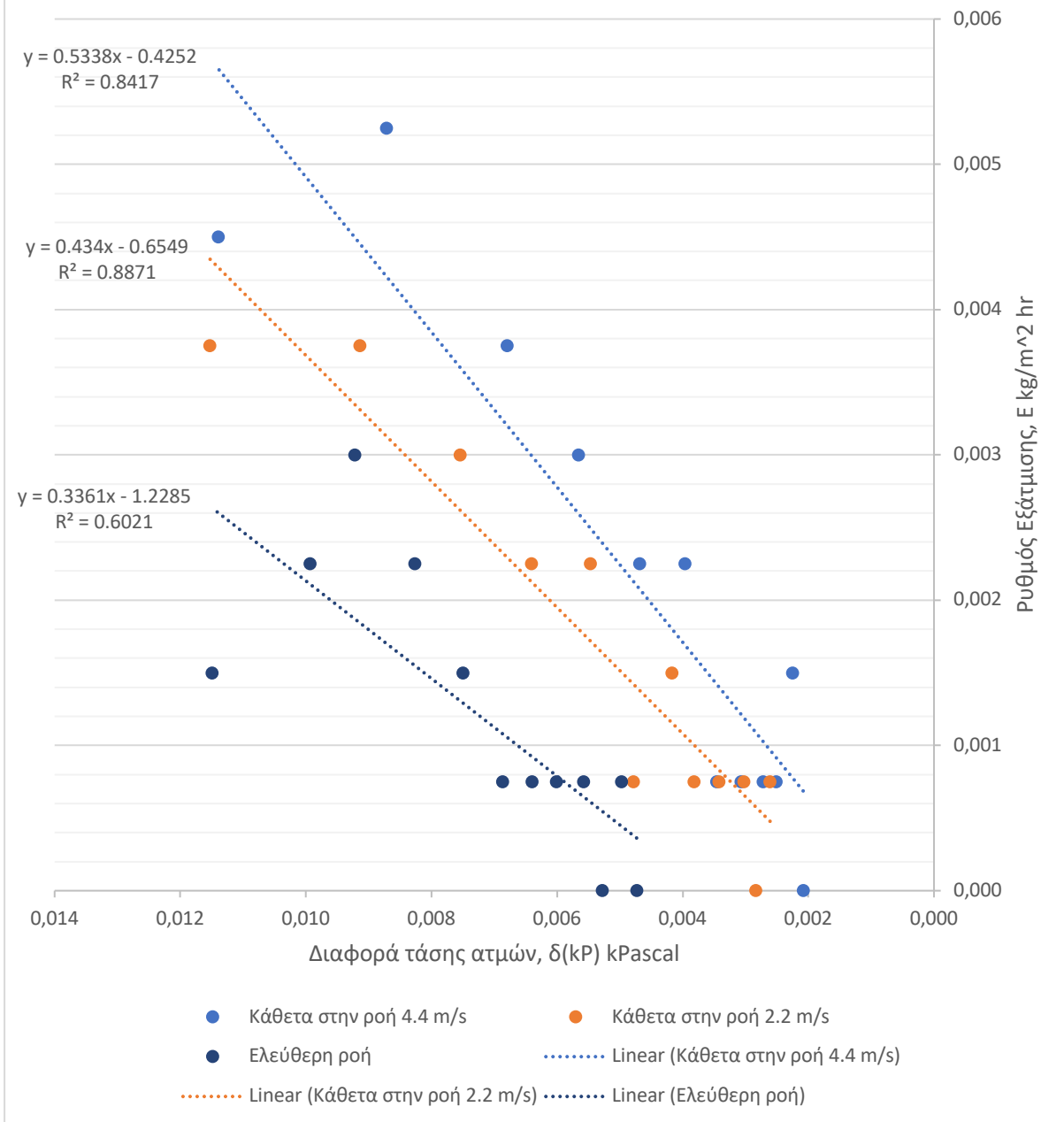
Διάγραμμα 5-25

5.4.2 Ρυθμός εξάτμισης



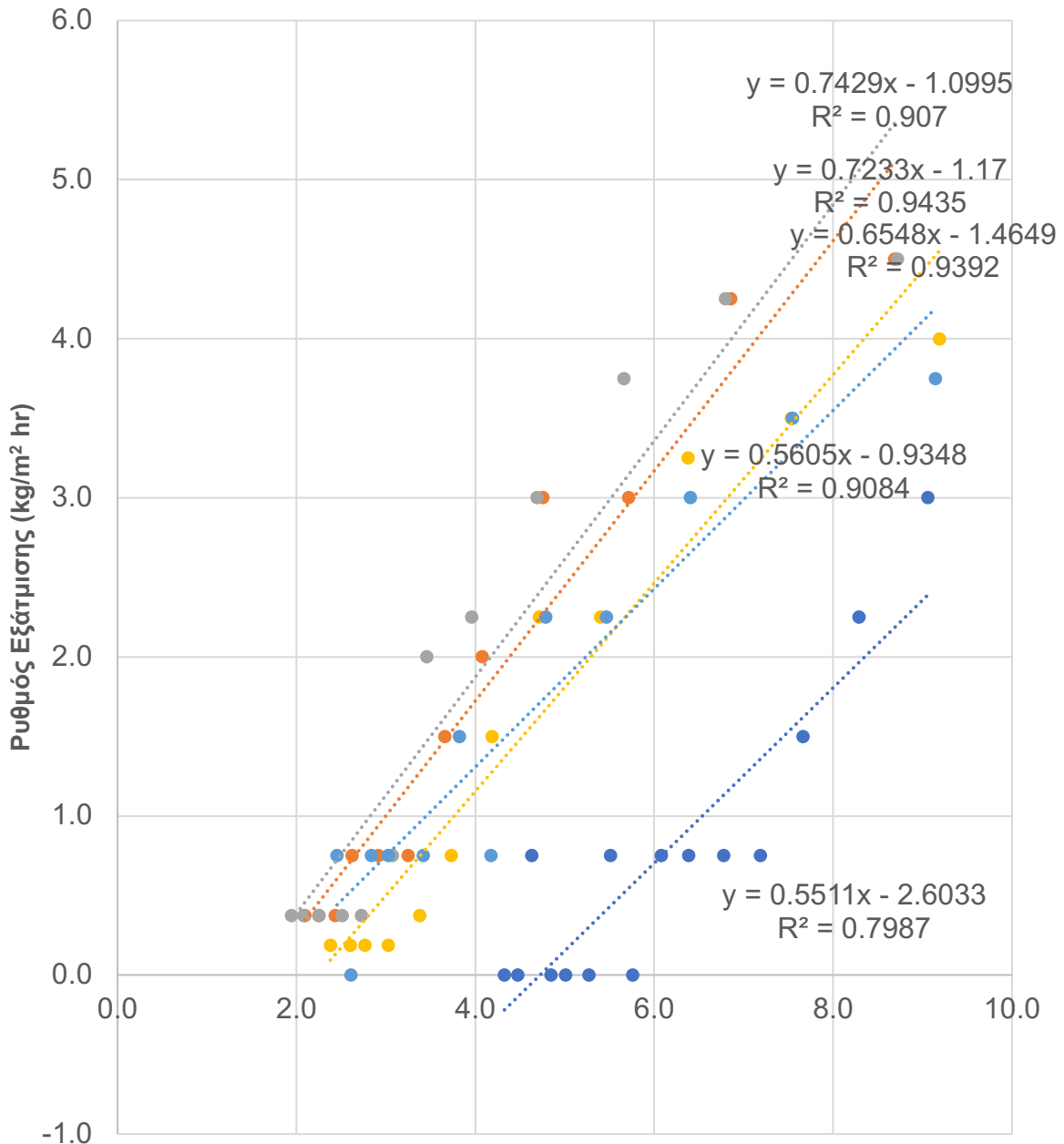
Διάγραμμα 5-26

Ρυθμός εξάτμισης / Διαφορά τάσης ατμών Κάθετος προσανατολισμός



Διάγραμμα 5-27

Πειραματική Συσχέτιση Ρυθμού Εξάτμισης με τη Διαφορά Τάσης Ατμών Νερού-Αέρα



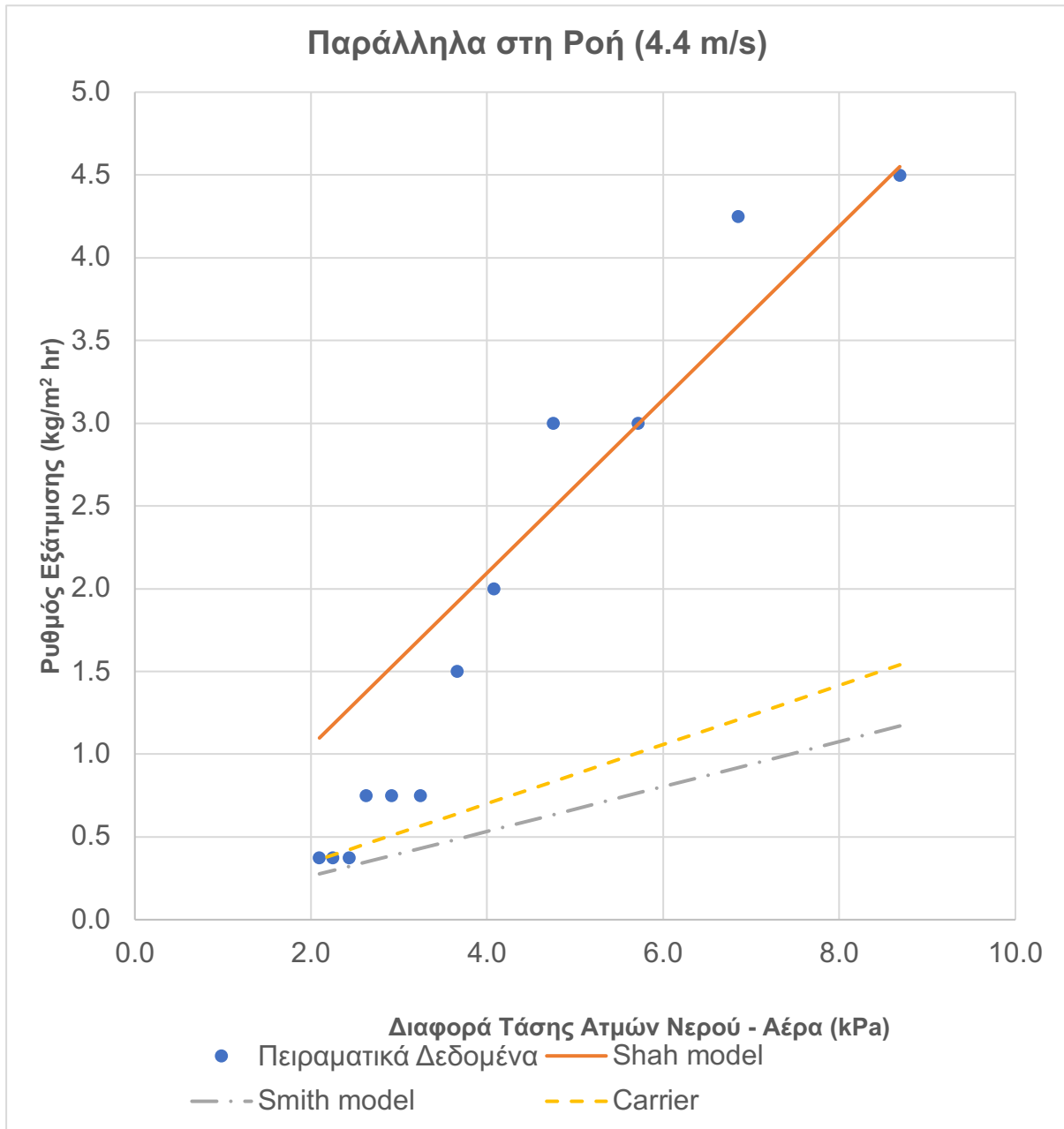
Διαφορά Τάσης Ατμών Νερού - Αέρα (kPa)

- Ελεύθερη Μεταφορά
- Παράλληλα στη ροή (4.4 m/s)
- Κάθετα στη ροή (4.4 m/s)
- Παράλληλα στη ροή (2.2 m/s)
- Κάθετα στη ροή (2.2 m/s)
- Linear (Ελεύθερη Μεταφορά)
- Linear (Παράλληλα στη ροή (4.4 m/s))
- Linear (Κάθετα στη ροή (4.4 m/s))
- Linear (Παράλληλα στη ροή (2.2 m/s))
- Linear (Κάθετα στη ροή (2.2 m/s))

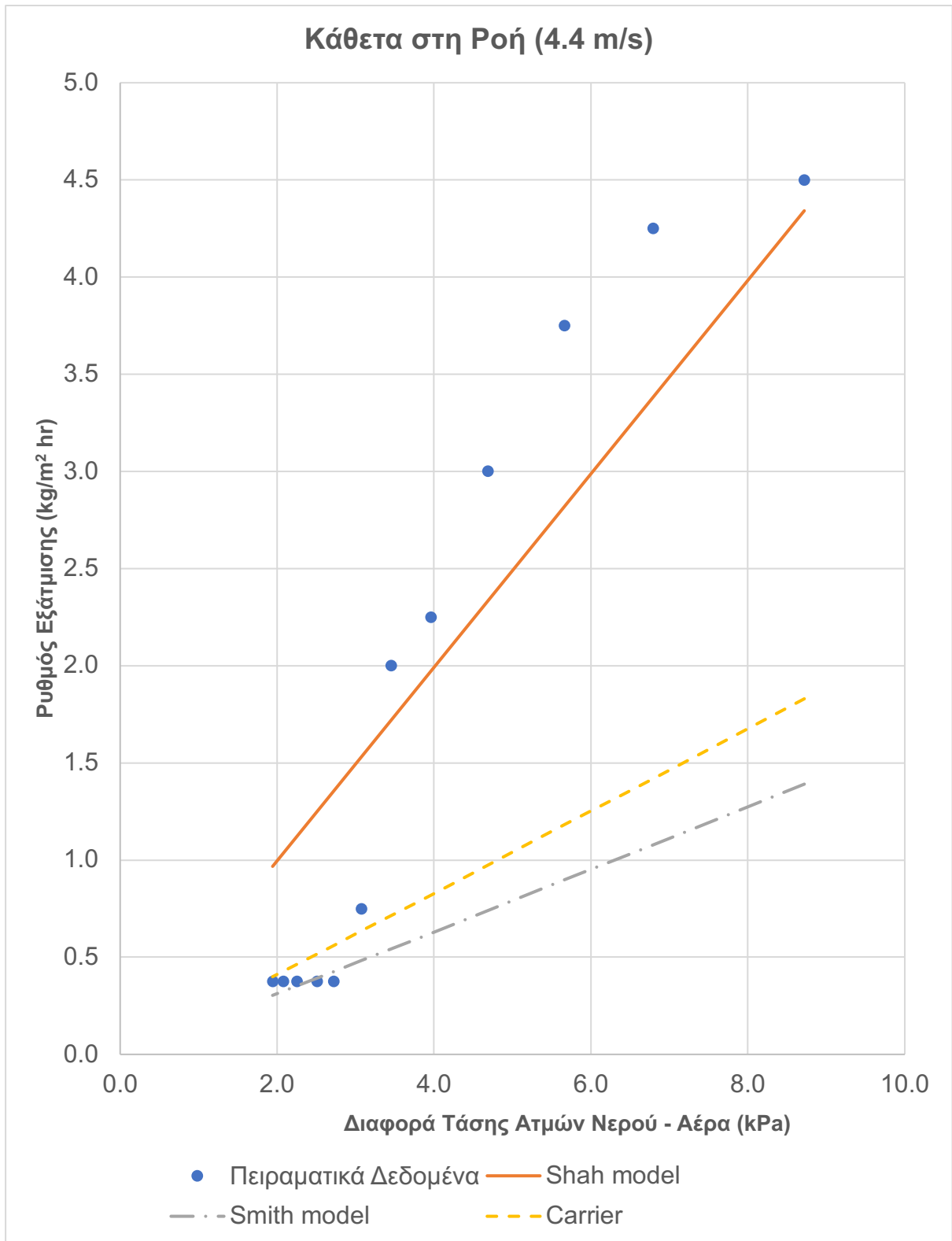
Διάγραμμα 5-28

5.5 Εμπειρικές σχέσεις Shah, Smith, Carrier

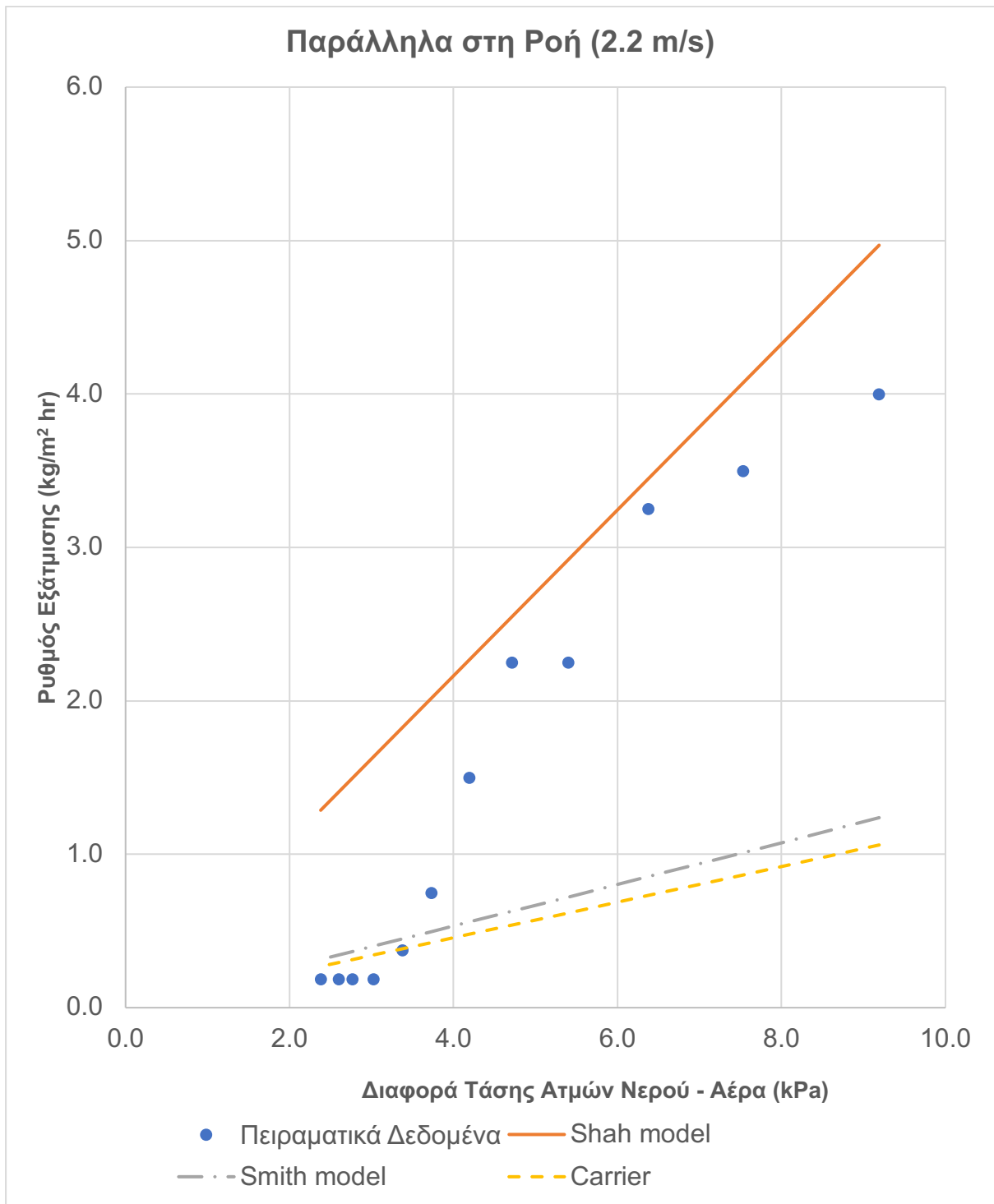
5.5.1 Ρυθμός εξάτμισης



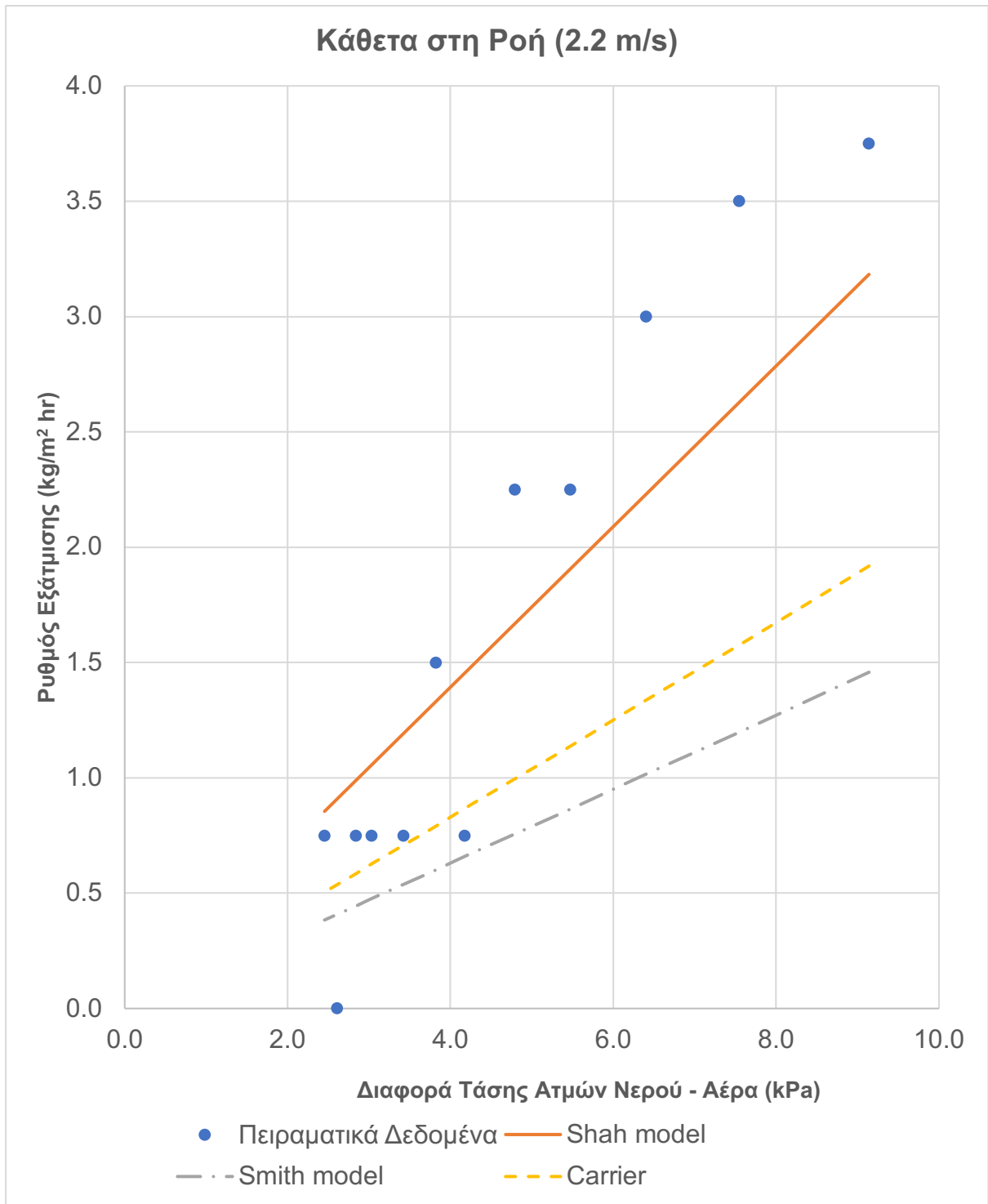
Διάγραμμα 5-29



Διάγραμμα 5-30



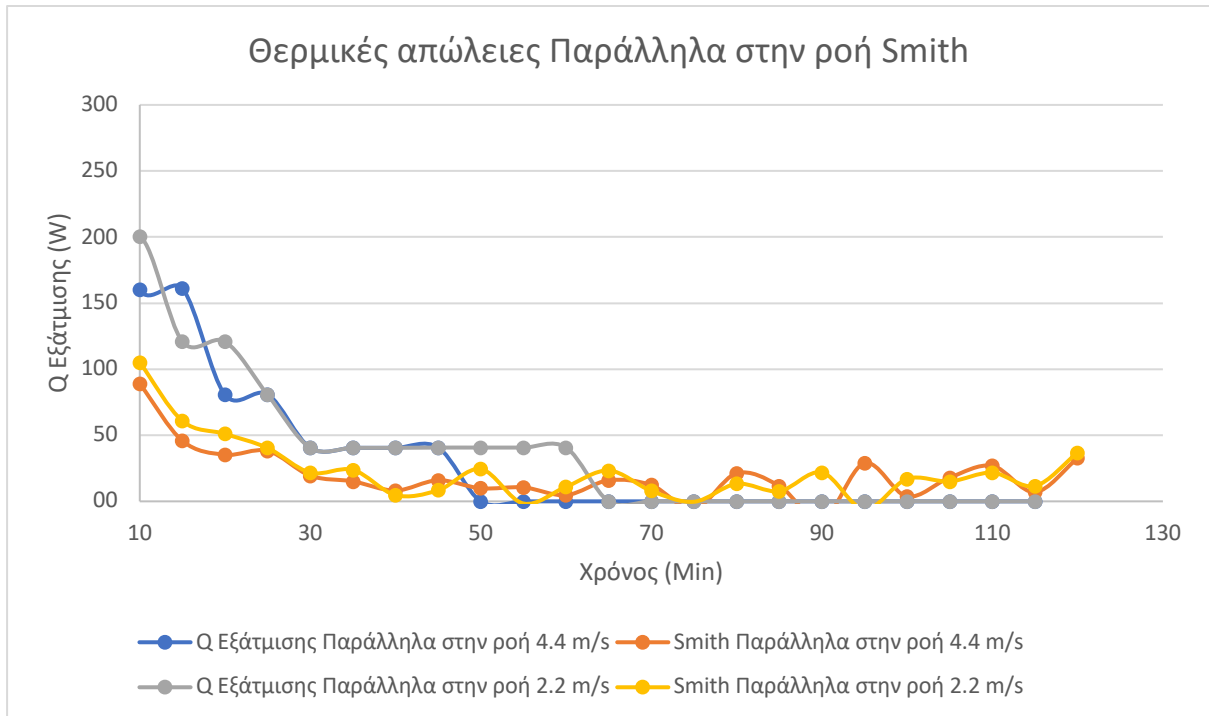
Διάγραμμα 5-31



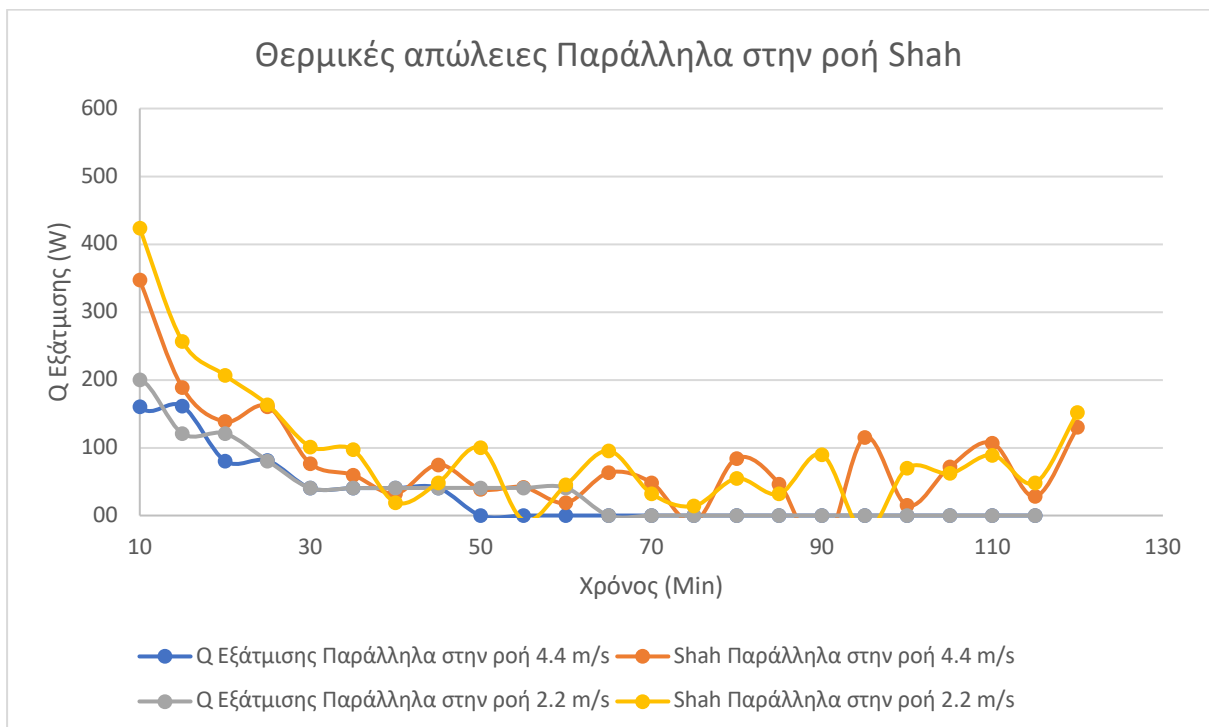
Διάγραμμα 5-32

5.5.2 Θερμικές απώλειες

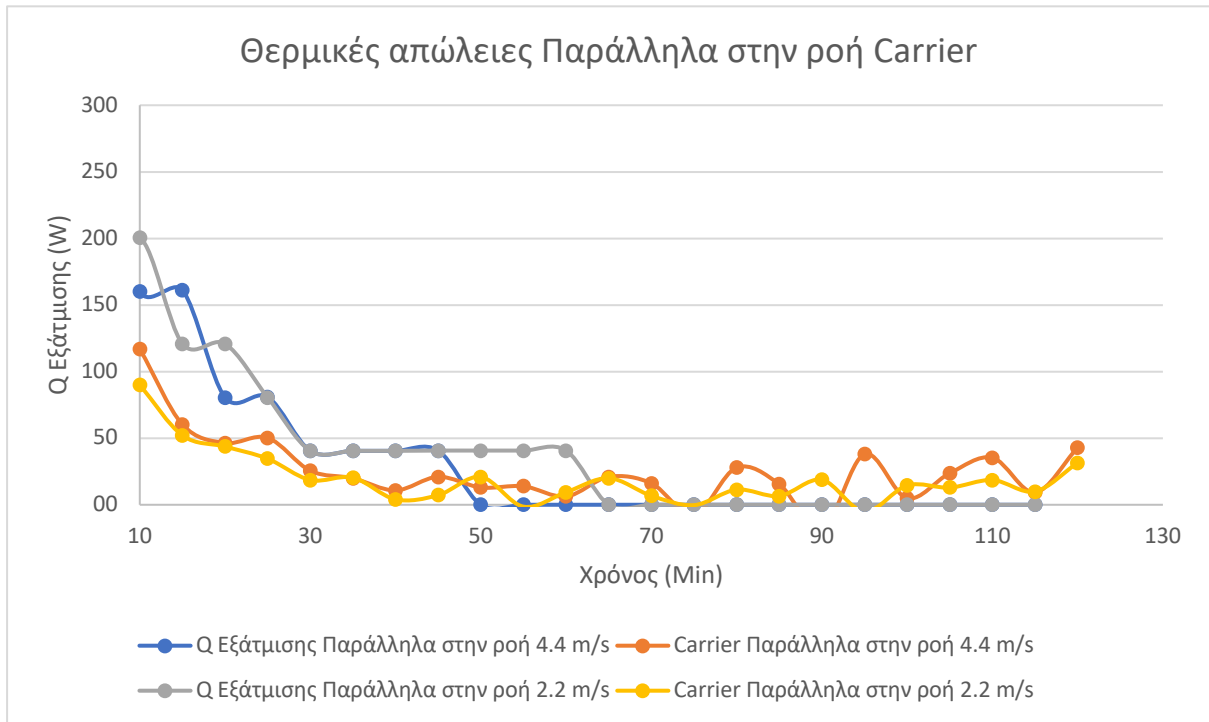
Παράλληλος προσανατολισμός



Διάγραμμα 5-33

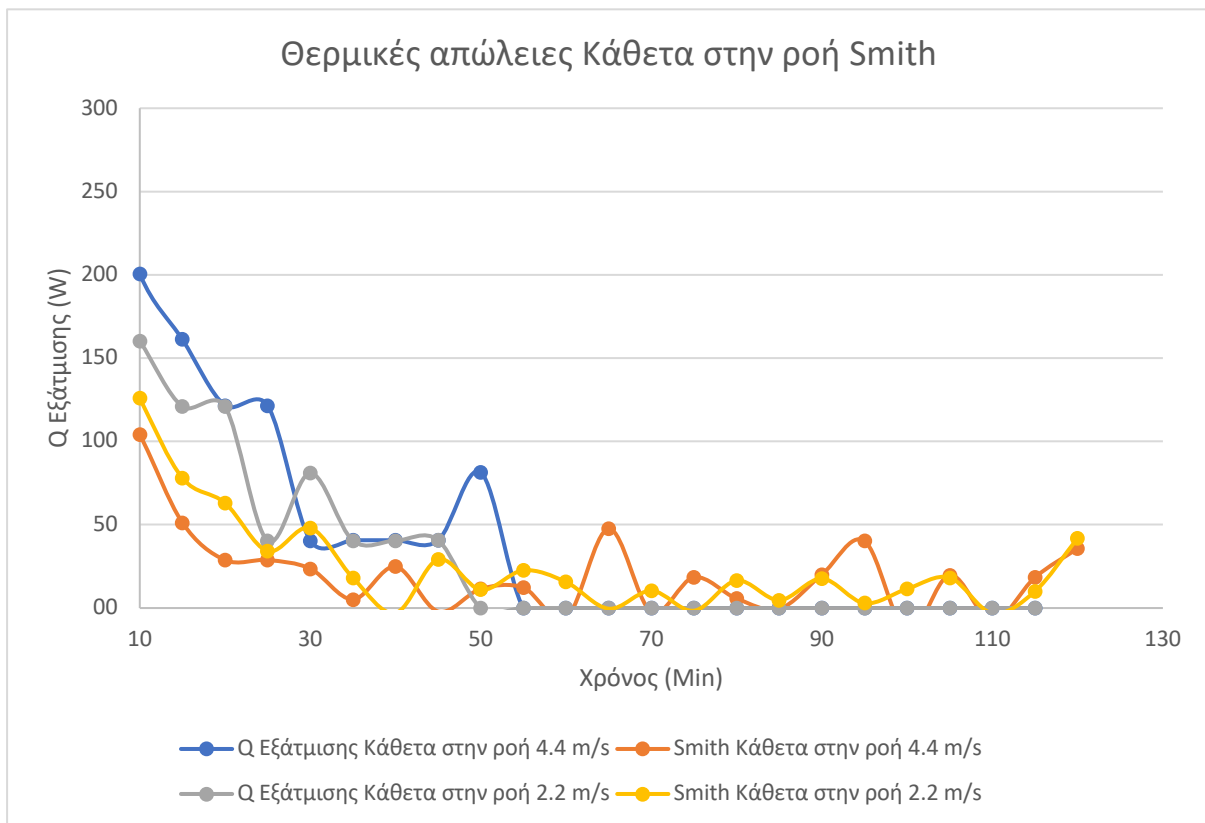


Διάγραμμα 5-34

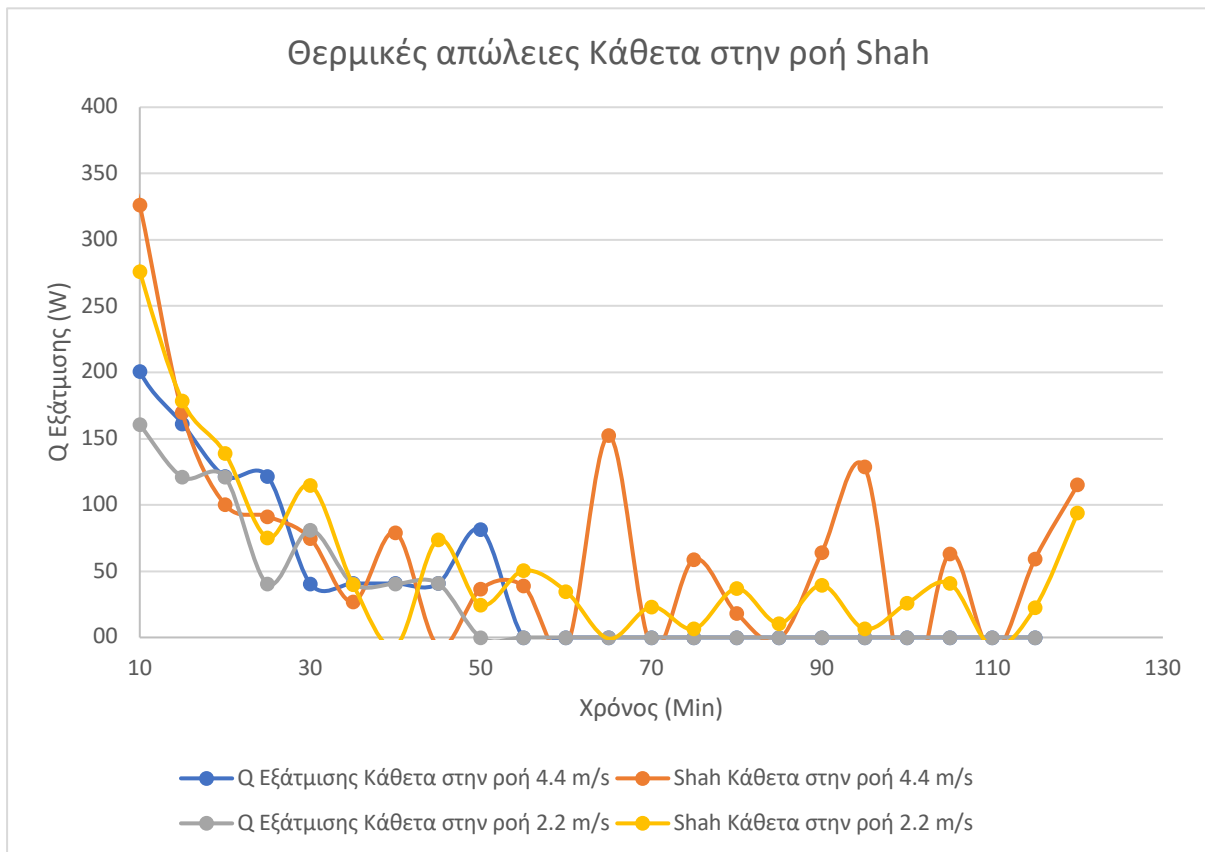


Διάγραμμα 5-35

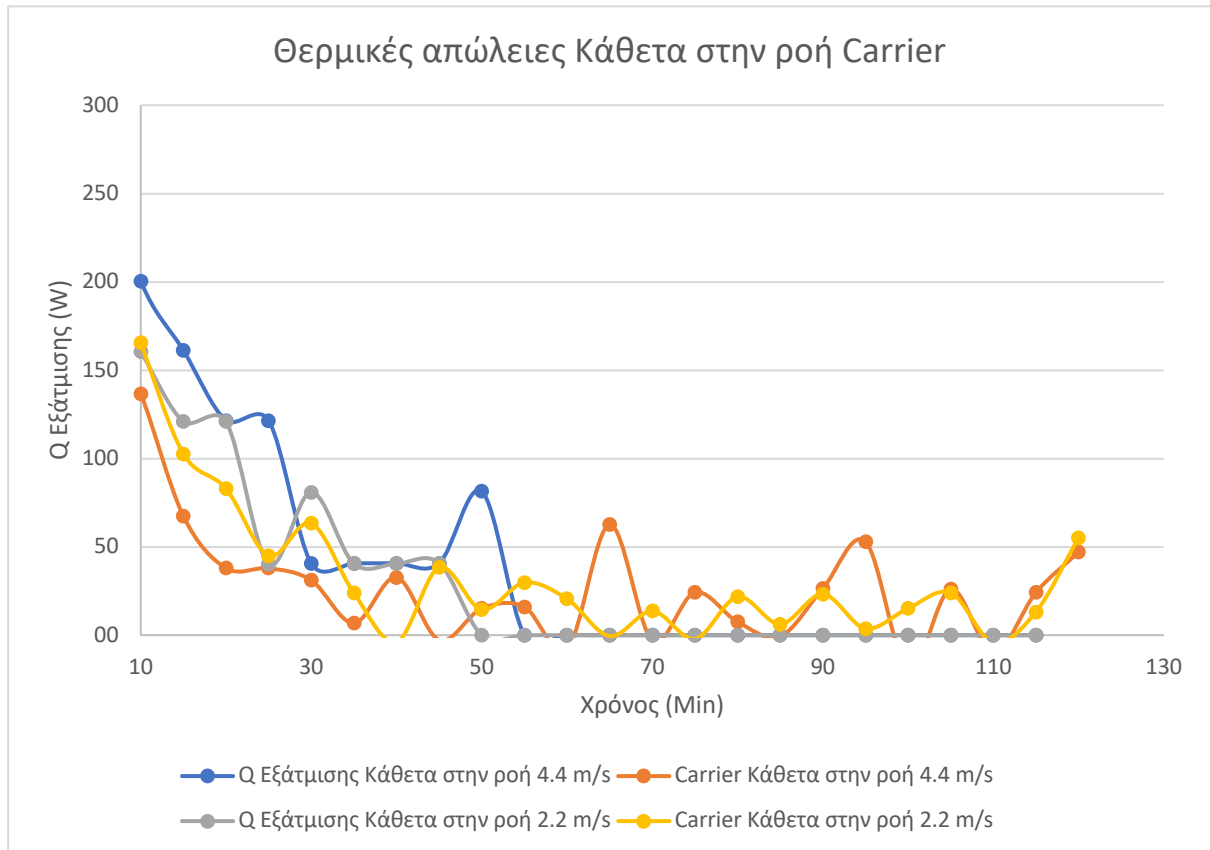
Κάθετος προσανατολισμός



Διάγραμμα 5-36



Διάγραμμα 5-37



Διάγραμμα 5-38

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκε πειραματικά και υπολογιστικά το ισοζύγιο ενέργειας για ένα μοντέλο ανοιχτής δεξαμενής υπό διάφορες ροϊκές συνθήκες.

Από τα διαγράμματα της μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής προκύπτει, όπως αναμενόταν, ότι για τις περιπτώσεις της εξαναγκασμένης μεταφοράς παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός ψύξης του νερού της δεξαμενής σε σχέση με την περίπτωση της ελεύθερης μεταφοράς. Ως προς την επίδραση του προσανατολισμού της δεξαμενής σε σχέση με το διαμήκη άξονα της αεροσήραγγας, φαίνεται ότι ο κάθετος προσανατολισμός οδηγεί σε ελαφρά γρηγορότερη ψύξη του νερού (έως τα 40 min) μιας και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η διαμόρφωση του οριακού στρώματος πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής έχει πιο απότομο προφίλ και ως εκ τούτου αναμένονται πιο εντατικά φαινόμενα μεταφοράς. Η επίδραση της ταχύτητας για τον ίδιο προσανατολισμό δείχνει ότι για υψηλότερες ταχύτητες ροής η ψύξη του νερού επιταχύνεται, γεγονός το οποίο ήταν αναμενόμενο. Ο χρόνος εξέλιξης του φαινομένου, πρακτικά, ανέρχεται στα 80 min.

Ως προς τη διαμόρφωση του ενεργειακού ισοζυγίου, όπως αναμενόταν, η συνεισφορά της εξατμιστικής ψύξης στη διαμόρφωση του ισοζυγίου ενέργειας παίζει καθοριστικό ρόλο έως τα 40 min, ενώ μετά κυρίαρχο ρόλο παίζει η συναγωγή, όμως αυτή η διαφοροποίηση είναι μόνο ποιοτική μιας και σε απόλυτες τιμές τα ποσά ενέργειας που μεταφέρονται είναι σχεδόν αμελητέα. Από την ανάλυση της επίδρασης του προσανατολισμού και της ταχύτητας της εξωτερικής ροής φαίνεται ότι η διαδικασία της εξάτμισης επηρεάζεται από την ταχύτητα του αέρα. Για την περίπτωση της συναγωγής η διαφοροποίηση των θερμικών απωλειών δείχνει ότι κύριο ρόλο παίζει πρωτευόντως ο προσανατολισμός και έπειτα η ταχύτητα της ροής, γεγονός το οποίο οφείλεται στην επιλογή του χαρακτηριστικού μήκους της ροής.

Από την εξέταση της σωρευτικής απώλειας μάζας του νερού προκύπτει ότι η επίδραση της ταχύτητας του αέρα γίνεται ιδιαίτερα έντονη για την περίπτωση του κάθετου προσανατολισμού, γεγονός το οποίο οφείλεται στη διαμόρφωση του προφίλ του οριακού στρώματος του αέρα, όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως. Συγκρίνοντας τα προφίλ για όλες τις περιπτώσεις (διάγραμμα 5-25) προκύπτει για την περίπτωση των 2.2 m/s ο προσανατολισμός της δεξαμενής δεν παίζει κάποιο ουσιαστικό ρόλο.

Η γραμμική προσέγγιση του πειραματικού ρυθμού εξάτμισης ως συνάρτηση της διαφοράς τάσης ατμών παρουσιάζει καλή σύγκλιση, όμως πρέπει να παρατηρηθεί ότι η εξίσωση προσέγγισης σε καμία περίπτωση δεν είναι της μορφής $y = ax$ όπως θα αναμενόταν. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η ταχύτητα κατά μήκος της δεξαμενής δεν ήταν σταθερή.

Από τη σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τα διάφορα υπολογιστικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, προκύπτει ικανοποιητική σύγκλιση με το μοντέλο Shah για υψηλές διαφορές τάσης ατμών, ενώ για χαμηλότερες με τα μοντέλα Carrier και Smith. Η παραπάνω εικόνα παρατηρείται, όπως αναμενόταν, και στον υπολογισμό των θερμικών απωλειών λόγω εξατμιστικής ψύξης.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Çengel, Y., & Ghajar, A. (n.d.). Μεταφορά Θερμότητας και Μάζας. In Y. Çengel, & A. Ghajar, *Μεταφορά Θερμότητας και Μάζας* (p. 438). Εκδόσεις Τζιόλα.
2. Çengel, Y., & Ghajar, A. (n.d.). Μεραφορά Θερμότητας και Μάζας. In Y. Çengel, & A. Ghajar, *Μεραφορά Θερμότητας και Μάζας* (p. 898). Εκδόσεις Τζιόλα.
3. Çengel, Y., & Ghajar, A. (2012). *Μεταφορά Θερμότητας και Μάζας* (Vol. 4). Εκδόσεις Τζιόλα
4. Πανιδης. (n.d.). *Φαινόμενα Μεταφοράς*. Πάτρα.
5. Πανιδης. (n.d.). Φαινόμενα Μεταφοράς. In *Φαινόμενα Μεταφοράς* (p. 112). Πατρα.
6. Πανιδης. (n.d.). Φαινόμενα Μεταφοράς. In *Φαινόμενα Μεταφοράς* (p. 33-34). Πάτρα.
7. ASHRAE. (1999). 1999 ASHRAE Handbook. (p.48)
8. Çengel, Y. (n.d.). Thermodynamics an engineering approach. In *Thermodynamics an engineering approach* (p. 916).
9. Lienhard IV, J., & Lienhard V, J. (2018). *A Heat Transfer Textbook* (Vol. 2.12). Cambridge, Massachusetts, U.S.A.: Phlogiston Press.
10. Carrier. (1918).
11. Czarnecki, J. (1978). Advances in solar water heating for domestic use in Australia. 75-80.
12. Root, D. (1983). *Designing and Installing Solar Commercial Pool Heating Systems*. Cape Canaveral, Florida: Florida Solar Energy Center.
13. Shah, M. M. (2014, January). Methods for Calculation for Evaporation from Swimming Pools and Other Water Surfaces. *ASHRAE Transactions*.
14. Smith, C., Löf, G., & Jones, R. (1994, July). Measurement and Analysis of Evaporation from an Inactive Outdoor Swimming Pool. 53(1), 3-7.
15. Tarrad, A. (2017, July). Heating Mechanism and Energy Analyses for Over-Ground Outdoor Swimming Pool Technology. *Asian Journal of Applied Science and Technology*, 08-22.
16. Goodfellow. (n.d.). *goodfellow.com*. Retrieved from <http://www.goodfellow.com/E/Polymethylmethacrylate.html>
17. ISO/TC. (1995, 08). ISO 9459-2:1995. *Solar heating -- Domestic water heating systems -- Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems*.