



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΨΥΞΗΣ

υπό
ΜΕΛΕΤΙΑΔΗ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΨΥΞΗΣ

υπό
ΜΕΛΕΤΙΑΔΗ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2024

© 2024 Μελετιάδης Εμμανουήλ

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής

(Επιβλέπων)

Δρ. Χαραλάμπους Γεώργιος

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Σταματέλλος Αναστάσιος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Τσιακάρης Παναγιώτης

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί το τέλος ενός μεγάλου κεφαλαίου και θέλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές που με βοήθησαν όλα αυτά τα χρόνια στις σπουδές μου. Κάθε βοήθεια που προσφέρθηκε, από την επίλυση μιας απορίας μέχρι λόγια ενθάρρυνσης και εμπύχωσης απέναντι σε κάθε δυσκολία, ήταν πολύτιμη. Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου, επίκουρο καθηγητή του τμήματος, Χαραλάμπους Γεώργιο, για το χρόνο που ξόδεψε και για τις χρήσιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Η πορεία μου στο πολυτεχνείο συνοδεύτηκε από την έντονη ενασχόλησή μου με τη μουσική και κατά συνέπεια με την αιώνια πάλη της τέχνης με την επιστήμη, την οποία έδωσαν κι άλλοι άνθρωποι, πιο σπουδαίοι από εμένα. Για αυτό το λόγο, θέλω να ευχαριστήσω τους Dan και Maureen Oh, τον μηχανικό και τη μουσικό, που με βοήθησαν να πάρω την απόφαση να ολοκληρώσω τη σχολή, γενόμενος επιστήμονας, όντας καλλιτέχνης· ένας αναγεννησιακός άνθρωπος.

Δε θα μπορούσα να καταφέρω τίποτα χωρίς την αστείρευτη υπομονή και μακροθυμία των γονιών και των αδελφών μου, τη στήριξή τους και την αγάπη τους.

Τέλος, ευχαριστώ το Θεό για τη δύναμη που μου έδωσε. Ό,τι έχω είναι δικό Του.

Αφιερώνω την εργασία σε όλους τους νέους που προσπαθούν να βρουν τη θέση τους σ' αυτόν τον κόσμο, αμφιταλαντευόμενοι από τα «πρέπει» και τα «θέλω».

«Θαρρεῖν, ὧ Θεαίτητε, χρή τὸν καὶ σμικρόν τι δυνάμενον εἰς τὸ πρόσθεν ἀεὶ προΐεναι. Τί γάρ ὃ γ' ἄθυμῶν ἐν τούτοις δράσειεν ἂν ἐν ἄλλοις, ἢ μηδὲν ἐν ἐκείνοις ἀνύτων ἢ καὶ πάλιν εἰς τοῦπισθεν ἀπωσθείς;»

Πλάτων, «Σοφιστής»

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΨΥΞΗΣ

ΜΕΛΕΤΙΑΔΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2023

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεώργιος Χαραλάμπους,

Επίκουρος Καθηγητής Θερμορευστοδυναμικών Διεργασιών με Ενεργειακές Εφαρμογές

Περίληψη

Τα συστήματα ψύξης είναι αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής στον 21^ο αιώνα. Είτε προορίζονται για εμπορική χρήση είτε για βιομηχανική, είναι πλέον απαραίτητα και η εφαρμογή τους εντοπίζεται σε πολλά πεδία της καθημερινότητας. Ένα από αυτά τα συστήματα είναι και ο πύργος ψύξης, ο οποίος αποτελεί και το κύριο θέμα το οποίο πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Η λειτουργία του βασίζεται κυρίως στον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής και έχει ως στόχο την ψύξη θερμού νερού με χρήση αέρα περιβάλλοντος. Ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνει χώρα είναι ένας συνδυασμός συναγωγής και εξάτμισης, ο οποίος επιτυγχάνεται βέλτιστα με την προσθήκη πληρωτικού υλικού στο εσωτερικό του πύργου, το οποίο αυξάνει την επιφάνεια επαφής νερού και αέρα. Έτσι, το νερό ψύχεται και επανατροφοδοτείται στο σύστημα από το οποίο προήλθε κι ο αέρας, πλούσιος πλέον σε υγρασία, εξέρχεται από τον πύργο κι αποβάλλεται στο περιβάλλον. Στόχος της εργασίας είναι να ενημερώσει τον αναγνώστη για την τεχνολογία του πύργου ψύξης και τις διάφορες κατηγορίες του που συναντώνται, για τη σημασία της χρήσης του στο βιομηχανικό χώρο αλλά και για τους φυσικούς και μαθηματικούς νόμους που διέπουν τη λειτουργία του. Ταυτόχρονα παρουσιάζονται πρακτικές εφαρμογές, πειράματα που διεξήχθησαν και συμπεράσματα που πάρθηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, χρησιμοποιώντας τον πειραματικό πύργο ψύξης H893 Bench Top Cooling Tower, ο οποίος είναι ιδιοκτησία του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ο απώτερος σκοπός της εργασίας είναι η κατάλληλη προετοιμασία του εργαστηριακού πύργου ψύξης, ώστε να συμπεριληφθεί στις εκπαιδευτικές δραστηριότητες του μαθήματος Θερμοδυναμική Ι, στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών, ως εργαστηριακές ασκήσεις.

Λέξεις-κλειδιά: πύργος ψύξης, ψυχομετρία, θερμοδυναμική

EXPERIMENTAL STUDY IN LABORATORIAL COOLING TOWER

EMMANUEL MELETIADIS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2023

Supervisor: Dr Georgios Charalampous

Assistant Professor of Thermofluid Processes with Energy Applications

Abstract

Cooling systems are an essential part of modern life in the 21st century. Whether designed for commercial or industrial use, they have become necessary, and their application can be found in many fields of everyday life. One of these systems is the cooling tower, which is the main subject of this thesis. Its operation is based on the first law of thermodynamics and its target is to use the air as a coolant for warm water. The mode used for heat transfer is a combination of convection and boiling, which is best accomplished by adding filling material in the interior of the tower, increasing the contact surface of air and water. Thus, the water cools and is fed back to the system, while the moist air comes out from the tower and is released to the environment. The main goal of this thesis is to inform its reader about the technology of cooling towers and the different types that can be found, for the importance of its use in the industrial field and about the mathematical and physical laws that describe its function. Simultaneously, experiments are presented, combined with results and conclusions made, with the use of an experimental cooling tower (model name: H893 Bench Top Cooling Tower) that is installed at the Department of Mechanical Engineers at the Polytechnic School of the University of Thessaly. The final goal of this thesis is the preparation of this experimental cooling tower to be used for educational purposes for the Thermodynamics 1 course of the undergraduate program.

Key words: cooling tower, psychrometry, thermodynamics

Ονοματολογία

Σύμβολο	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
$\dot{m}_E$	Παροχή μάζας νερού από τη make-up tank	kg_w/s
$\dot{m}_{da}$	Παροχή μάζας ξηρού αέρα στη στήλη	kg_{da}/s
h_A	Ειδική ενθαλπία υγρού αέρα στην είσοδο της στήλης	J/kg_{da}
h_B	Ειδική ενθαλπία υγρού αέρα στην έξοδο της στήλης	J/kg_{da}
h_E	Ειδική ενθαλπία νερού από τη make-up tank	J/kg_{da}
A_b	Εμβαδόν βάσης στήλης	m^2
A_{cap}	Εμβαδόν οπής στο καπάκι της στήλης	m^2
A_{mu}	Εμβαδόν διατομής make-up tank	m^2
D_{cap}	Διάμετρος οπής στο καπάκι της στήλης	m
D_{mu}	Διάμετρος make-up tank	m
d	Πυκνότητα πλέγματος στήλης	m^{-1}
T_1	Θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα εισαγωγής	$^{\circ}C$
T_2	Θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα εισαγωγής	$^{\circ}C$
T_3	Θερμοκρασία υγρού ¹ βολβού του αέρα εξαγωγής	$^{\circ}C$
T_4	Θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα εξαγωγής	$^{\circ}C$
T_5	Θερμοκρασία νερού εισαγωγής	$^{\circ}C$
T_6	Θερμοκρασία νερού εξαγωγής	$^{\circ}C$
T_E	Θερμοκρασία νερού αναπλήρωσης	$^{\circ}C$
V_{loss}	Όγκος απολεσθέντος νερού	m^3
p_A	Πίεση στη βάση της στήλης	$mm\ H_2O$
p_A	Πίεση στη βάση της στήλης	$mm\ H_2O$
p_B	Πίεση στην κορυφή της στήλης	$mm\ H_2O$
$\bar{u}$	Ταχύτητα αέρα στην έξοδο της στήλης	m/s
v_B	Ειδικός όγκος υγρού αέρα στην έξοδο της στήλης	m^3/kg_{da}
ρ_{H_2O}	Πυκνότητα νερού	kg_w/m^3

¹ Υπάρχει ασυμφωνία μεταξύ του εγχειριδίου και της συσκευής πάνω στους δείκτες 3 και 4. Για όλην την εργασία θα χρησιμοποιηθεί η αρίθμηση που υπάρχει στη συσκευή.

ω_B	Απόλυτη υγρασία αέρα στην έξοδο της στήλης	kg_w/kg_{da}
ω_A	Απόλυτη υγρασία αέρα στην είσοδο της στήλης	kg_w/kg_{da}
h	Απώλεια στάθμης από τη βελόνα	m (συνήθως μετράται σε mm)
Δp_{col}	Πτώση πίεσης διαμέσου της στήλης	$mm\ H_2O$
P	Φορτίο αντλίας νερού	W
Q_H	Φορτίο θερμαντήρα (= θερμικό φορτίο)	W
Q_C	Ψυκτικό φορτίο (Θερμικό φορτίο + φορτίο αντλίας)	W
Δp_{cap}	Διαφορά πίεσης στο καπάκι της στήλης	$mm\ H_2O$
ΔT_{app}	Προσέγγιση υγρού βολβού ($\Delta T_{app} = T_6 - T_2$)	$^{\circ}C$
ΔT_{range}	Εύρος ψύξης ($\Delta T_{range} = T_5 - T_6$)	$^{\circ}C$
Δt	Χρονικό διάστημα μετρήσεων	s

Δείκτες μάζας

W	Water	Νερό
Da	Dry air	Ξηρός αέρας

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο.....	1
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	2
1.3 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	2
Κεφάλαιο 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	4
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	4
2.1.1 Αρχαιότητα	4
2.1.2 2 ^η Βιομηχανική επανάσταση	6
2.2 Ταξινόμηση πύργων ψύξης.....	7
2.2.1 Ως προς τη χρήση.....	7
2.2.2 Ως προς τη σχετική κίνηση των ρευμάτων νερού κι αέρα	8
2.2.3 Ως προς τη μέθοδο επίτευξης κυκλοφορίας αέρα	9
2.2.4 Ως προς τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας	11
2.3 Πληρωτικό υλικό	13
2.3.1 Πληρωτικό υλικό τύπου Film.....	13
2.3.2 Πληρωτικό υλικό τύπου Splash	14
Κεφάλαιο 3. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ H893 BENCH TOP COOLING TOWER.....	16
3.1 Δομή	16
3.2 Όργανα μέτρησης & εξισώσεις	21
3.2.1 Όγκος απολεσθέντος νερού	21
3.2.2 Παροχή μάζας ξηρού αέρα.....	22
3.2.3 Βελτίωση της εξίσωσης του εγχειριδίου	23
3.3 Έλεγχος εγκυρότητας μετρήσεων	24
Κεφάλαιο 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ: ΣΤΗΛΗ Α.....	27
4.1 Πρώτο πείραμα – Ισοζύγια μάζας & ενέργειας για διάφορες παροχές αέρα	28
4.1.1 Πρώτη δοκιμή – $mda = 0.0643 \text{ kgdas}$	30
4.1.2 Δεύτερη δοκιμή – $mda = 0.0577 \text{ kgdas}$	31
4.1.3 Τρίτη δοκιμή – $mda = 0.0423 \text{ kgdas}$	32
4.1.4 Τέταρτη δοκιμή – $mda = 0.00662 \text{ kgdas}$	33
4.1.5 Επανάληψη πρώτης δοκιμής για επιβεβαίωση αποτελεσμάτων	34
4.2 Δεύτερο πείραμα – Σχέση απόδοσης πύργου με το ψυκτικό φορτίο.....	35
4.2.1 Πρώτη δοκιμή – $QC = 0.1 \text{ kW}$	36
4.2.2 Δεύτερη δοκιμή – $QC = 0.6 \text{ kW}$	37
4.2.3 Τρίτη δοκιμή – $QC = 1.1 \text{ kW}$	37
4.2.4 Τέταρτη δοκιμή – $QC = 1.6 \text{ kW}$	37
4.3 Τρίτο πείραμα – Σχέση απόδοσης πύργου με την παροχή αέρα.....	38
4.3.1 Πρώτη δοκιμή – $mda = 0.0633 \text{ kgdas}$	40
4.3.2 Δεύτερη δοκιμή – $mda = 0.0519 \text{ kgdas}$	40
4.3.3 Τρίτη δοκιμή – $mda = 0.0408 \text{ kgdas}$	41
4.3.4 Τέταρτη δοκιμή – $mda = 0.0185 \text{ kgdas}$	41
4.3.5 Επανάληψη πρώτης δοκιμής για επιβεβαίωση αποτελεσμάτων	42
4.3.6 Επανάληψη δεύτερης δοκιμής για επιβεβαίωση αποτελεσμάτων	42
4.3.7 Επανάληψη τρίτης δοκιμής για επιβεβαίωση αποτελεσμάτων	43
4.3.8 Επανάληψη τέταρτης δοκιμής για επιβεβαίωση αποτελεσμάτων	43
4.4 Τέταρτο πείραμα – Σχέση εύρους ψύξης νερού με το ψυκτικό φορτίο	44

4.4.1	Πρώτη δοκιμή – $QC = 0.1 kW$	45
4.4.2	Δεύτερη δοκιμή – $QC = 0.6 kW$	45
4.4.3	Τρίτη δοκιμή – $QC = 1.1 kW$	45
4.4.4	Τέταρτη δοκιμή – $QC = 1.6 kW$	45
Κεφάλαιο 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ: ΣΤΗΛΗ C		47
5.1	Πρώτο πείραμα – Ισοζύγια μάζας & ενέργειας για διάφορες παροχές αέρα	47
5.1.1	Πρώτη δοκιμή – $mda = 0.0679 kgdas$	48
5.1.2	Δεύτερη δοκιμή – $mda = 0.063 kgdas$	49
5.1.3	Τρίτη δοκιμή – $mda = 0.043 kgdas$	50
5.2	Δεύτερο πείραμα – Σχέση απόδοσης πύργου με το ψυκτικό φορτίο.....	51
5.2.1	Πρώτη δοκιμή – $QC = 0.1 kW$	52
5.2.2	Δεύτερη δοκιμή – $QC = 0.6 kW$	52
5.2.3	Τρίτη δοκιμή – $QC = 1.1 kW$	53
5.2.4	Τέταρτη δοκιμή – $QC = 1.6 kW$	53
5.3	Τρίτο πείραμα – Σχέση πτώσης πίεσης καθ' ύψος της στήλης και απόδοσης πύργου με την παροχή αέρα	54
5.3.1	Πρώτη δοκιμή – $mda = 0.0679 kgdas$	56
5.3.2	Δεύτερη δοκιμή – $mda = 0.0643 kgdas$	56
5.3.3	Τρίτη δοκιμή – $mda = 0.043 kgdas$	56
5.3.4	Τέταρτη δοκιμή – $mda = 0.0179 kgdas$	56
5.4	Τέταρτο πείραμα – Σχέση εύρους ψύξης νερού με το ψυκτικό φορτίο	57
5.4.1	Πρώτη δοκιμή – $QC = 0.1 kW$	57
5.4.2	Δεύτερη δοκιμή – $QC = 0.6 kW$	57
5.4.3	Τρίτη δοκιμή – $QC = 1.1 kW$	58
5.4.4	Τέταρτη δοκιμή – $QC = 1.6 kW$	58
5.5	Πέμπτο πείραμα – Επίδραση πληρωτικού υλικού στην απόδοση του πύργου	59
5.5.1	Πρώτη δοκιμή – Α	60
5.5.2	Δεύτερη δοκιμή – Β	60
5.5.3	Τρίτη δοκιμή – C	60
5.6	Έκτο πείραμα – Μεταβολή παροχής νερού	61
5.6.1	Πρώτη δοκιμή – $mw = 50 gws$	62
5.6.2	Δεύτερη δοκιμή – $mw = 40 gws$	63
5.6.3	Τρίτη δοκιμή – $mw = 20 gws$	63
Κεφάλαιο 6. ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ		66
6.1	Η αξία των πειραμάτων στη θεωρητική κατάρτιση	66
6.2	Εκτενέστερος κατάλογος βασικών γνώσεων για μηχανικούς	67
Κεφάλαιο 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ		69
7.1	Σύνοψη πειραμάτων.....	69
7.2	Προτάσεις	70
Κεφάλαιο 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		72
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....		75

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 1.....	29
Πίνακας 4.2: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 1.....	30
Πίνακας 4.3: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 2.....	31
Πίνακας 4.4: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 3.....	32
Πίνακας 4.5: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 4.....	33
Πίνακας 4.6: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 5.....	34
Πίνακας 4.7: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 2.....	35
Πίνακας 4.8: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 3.....	39
Πίνακας 5.1: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 1.....	47
Πίνακας 5.2: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 1.....	49
Πίνακας 5.3: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 2.....	50
Πίνακας 5.4: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 3.....	50
Πίνακας 5.5: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 2.....	51
Πίνακας 5.6: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 3.....	55
Πίνακας 5.7: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 5.....	59
Πίνακας 5.8: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 6.....	62

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Ανεμόπυργοι στην αρχαία Περσική πόλη Yazd [22].....	4
Εικόνα 2.2: Τυπικό σχήμα λειτουργίας ενός badgir [5]	4
Εικόνα 2.3: Ανεμόπυργος (badgir) σε συνδυασμό με κανάλι (qanat) [6].....	6
Εικόνα 2.4: Ο πρώτος υπερβολοειδής πύργος ψύξης, Heerlen 1918 [11]	7
Εικόνα 2.5: Πύργοι ψύξης στο νοσοκομείο Lincoln της New York City [13]	8
Εικόνα 2.6: Πύργος αντιρροής [14].....	8
Εικόνα 2.7: Πύργος εγκάρσιας ροής [14]	9
Εικόνα 2.8: Πύργος ψύξης με φυσική ροή [14]	10
Εικόνα 2.9: Πύργος ψύξης φυσικής ροής – Πτολεμαΐδα [26]	10
Εικόνα 2.10: ΑΗΣ Καρδιάς [15]	10
Εικόνα 2.11: Υποβοηθούμενη ροή (αριστερά), εξαναγκασμένη ροή (δεξιά) [17]	11
Εικόνα 2.12: Πύργος ξηρής ψύξης [18]	12
Εικόνα 2.13: Πύργος υβριδικής ψύξης [11].....	13
Εικόνα 2.14: Κυψελοειδής στοίχιση πληρωτικού υλικού τύπου Film [19].....	14
Εικόνα 2.15: Κατακόρυφη στοίχιση πληρωτικού υλικού τύπου Film [20]	14
Εικόνα 2.16: Στοίχιση πληρωτικού υλικού τύπου splash κατά V – Bar [24]	14
Εικόνα 2.17: Στοίχιση πληρωτικού υλικού τύπου splash κατά Gull Wing [21]	15
Εικόνα 3.1: Σκαρίφημα του εργαστηριακού πύργου ψύξης H893 Bench Top Cooling Tower, πηγή: αντίστοιχο εγχειρίδιο χρήσης	16
Εικόνα 3.2: Η στήλη με το πληρωτικό υλικό	17
Εικόνα 3.3: Το καπάκι της στήλης με την ατμοπαγίδα και τις υποδοχές μανομέτρου (αριστερά) και με τα θερμοστοιχεία (δεξιά)	18
Εικόνα 3.4: Η λεκάνη, ο ανεμιστήρας και τα θερμοστοιχεία	18
Εικόνα 3.5: Η δεξαμενή πλήρωσης (κάτω) και η δεξαμενή αναπλήρωσης (πάνω)	19
Εικόνα 3.6: Η βαλβίδα απ’ όπου στραγγίζεται η δεξαμενή πλήρωσης	19
Εικόνα 3.7: Ο πίνακας ελέγχου με τους διακόπτες, την ψηφιακή ένδειξη, τη βαλβίδα ελέγχου παροχής νερού και το μανόμετρο	20
Εικόνα 3.8: Διάγραμμα ροής του πύργου ψύξης	20
Εικόνα 3.9: Γραφική σχέση μεταξύ της υπολογιζόμενης από το εγχειρίδιο παροχής αέρα και της υπολογιζόμενης από την, προτεινόμενη από την εργασία, μέθοδο	24
Εικόνα 3.10: Όγκος ελέγχου (Πηγή: Εγχειρίδιο χρήσης του H893 Bench Top Cooling Tower).....	25

Εικόνα 4.1: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει του ψυκτικού φορτίου .38	
Εικόνα 4.2: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει της πτώσης πίεσης στο καπάκι της στήλης (πειράματα 20/7).....42	
Εικόνα 4.3: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει της πτώσης πίεσης στο καπάκι της στήλης44	
Εικόνα 4.4: Συμπεριφορά εύρους ψύξης συναρτήσει του ψυκτικού φορτίου45	
Εικόνα 5.1: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει του ψυκτικού φορτίου .54	
Εικόνα 5.2: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει της πτώσης πίεσης στο καπάκι της στήλης57	
Εικόνα 5.3: Συμπεριφορά εύρους ψύξης συναρτήσει του ψυκτικού φορτίου58	
Εικόνα 5.4: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει της πυκνότητας πλέγματος στήλης61	
Εικόνα 5.5: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού και εύρους ψύξης συναρτήσει της παροχής μάζας νερού64	

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Η χρήση του νερού ως ψυκτικό μέσο στις βιομηχανίες είναι μια πολύ συχνή διεργασία. Εφαρμόζεται σε εγκαταστάσεις όπως αυτές της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ψύξης χώρων, της χαλυβουργίας και γενικώς οπουδήποτε επιθυμούμε για κάποιο λόγο να μειώσουμε τη θερμοκρασία. Καθώς χρησιμοποιείται ως ψυκτικό, το νερό θερμαίνεται και καθίσταται πρακτικά άχρηστο για περαιτέρω ψύξη, οπότε και απορρίπτεται στο περιβάλλον. Αυτή η διεργασία, αν και αρκετά χρήσιμη, δεν είναι φιλική προς το μηχανικό καθώς θα πρέπει να προσθέσει δύο διατάξεις, από τις οποίες η μία θα αντλεί μόνιμα φρέσκο νερό, ενώ η άλλη θα απορρίπτει το θερμό νερό. Ταυτόχρονα, δεν είναι φιλική ούτε στο περιβάλλον καθώς, αν και το νερό είναι άφθονο, μπορεί να σχεδιαστεί ένα σύστημα το οποίο, χρησιμοποιώντας αέρα περιβάλλοντος, θα ψύχει το νερό και θα το επανακυκλοφορεί με πολύ λιγότερες απώλειες. Ένα είδος αυτής της διάταξης λέγεται πύργος ψύξης.

Καθώς το πλέον θερμό νερό επιστρέφει από τη διεργασία που προαναφέρθηκε, έρχεται σε επαφή με κινούμενο αέρα θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Αυτή η επαφή συνεπάγεται τη μεταφορά θερμότητας από το νερό προς τον αέρα μέσω της επαφής των δύο ρευστών (συναγωγή), αλλά και της εξάτμισης του νερού (λανθάνουσα θερμότητα). Το νερό στη συνέχεια επιστρέφει για να κάνει ξανά τον κύκλο που περιεγράφηκε.

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη ενός εργαστηριακού πύργου ψύξης και η προετοιμασία του ώστε να χρησιμοποιείται εκπαιδευτικά στα πλαίσια του μαθήματος της Θερμοδυναμικής Ι του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ο πύργος ψύξης που μελετάται είναι προϊόν της P. A. Hilton LTD, φέρει εμπορική ονομασία «H893 Bench Top Cooling Tower» και βρίσκεται στο εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του ίδιου τμήματος. Κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης, γίνονται πειράματα τα οποία σκοπό έχουν την ανίχνευση της συμπεριφοράς διαφόρων ιδιοτήτων του νερού και του αέρα.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ως κατευθυντήρια γραμμή η διπλωματική εργασία που διεξήγαγε ο κ. Λεμονιάς Αντώνιος υπό την επίβλεψη του καθηγητή του τμήματος κ. Ανδρίτσου Νικολάου [1]. Για τη διεξαγωγή σχέσεων και για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι σημειώσεις του καθηγητή του τμήματος κ. Μποντόζογλου Βασιλείου επί του μαθήματος «Φυσικές διεργασίες» [2] και το εγχειρίδιο της ASHRAE που εκδόθηκε το 2017 [3]. Για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του νερού χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι πίνακες στο παράρτημα του βιβλίου Θερμοδυναμικής των Y. Cengel & M. Boles [4].

1.3 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια ιστορική αναδρομή πάνω στην απαρχή και στην εξέλιξη της τεχνολογίας των πύργων ψύξης. Όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, η τεχνολογία αυτή υπάρχει ήδη από την εποχή του χαλκού, αναπτύχθηκε ραγδαία στη βιομηχανική επανάσταση και έλαβε τη σημερινή μορφή, ενώ ακόμα προτείνονται τρόποι βελτίωσης. Ακόμα, σε αυτό το κεφάλαιο ταξινομούνται οι πύργοι ψύξης με βάση τη χρήση τους, τη σχετική κίνηση νερού – αέρα, το μηχανισμό ροής του αέρα αλλά και το μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας. Τέλος, αναφέρονται μερικά θετικά κι αρνητικά χαρακτηριστικά, όπως και περιοχές εφαρμογής για την κάθε κατηγορία.

Στο κεφάλαιο 3 εξηγείται αναλυτικά η δομή και η αρχή λειτουργίας του εργαστηριακού πύργου ψύξης που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ακόμα αναφέρονται τα μετρητικά όργανα του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων καθώς και οι παραδοχές, οι εξισώσεις και οι γεωμετρικές παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη για να γίνουν όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί. Τέλος, γίνεται αναφορά στη χρήση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας, τα οποία χαρακτηρίζονται ως «κριτήρια εγκυρότητας μετρήσεων», αλλά και σε 2 προτάσεις βελτίωσης της προτεινόμενης, από το εγχειρίδιο, μεθόδου λήψης μετρήσεων.

Στο κεφάλαια 4 και 5 παρουσιάζονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, οι μετρήσεις που λήφθηκαν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη εκπόνηση της εργασίας. Η φύση των πειραμάτων αποσκοπούσε στην εφαρμογή των βασικών εννοιών της θερμοδυναμικής. Στο πρώτο πείραμα εξετάζεται η ισχύς των ισοζυγίων μάζας κι ενέργειας. Στο δεύτερο πείραμα μελετάται η συμπεριφορά της απόδοσης του πύργου συναρτήσει της

θερμότητας που προσδίδεται στο νερό όπου και εξάγεται το αντίστοιχο διάγραμμα. Το τρίτο πείραμα είχε στόχο την εξαγωγή δύο διαγραμμάτων που το ένα περιγράφει τη συμπεριφορά της απόδοσης του πύργου, και το άλλο την πτώση πίεσης καθ' ύψος της στήλης, όλα συναρτήσει της ταχύτητας του εισαγόμενου αέρα. Στο τέταρτο πείραμα παρατηρείται η σχέση μεταξύ της προδιδόμενης στο σύστημα θερμότητας και της απαιτούμενης θερμοκρασιακής μεταβολής του νερού και, όπως και στα προηγούμενα πειράματα, δίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα. Στο πέμπτο πείραμα μελετάται η σημασία που έχει το πληρωτικό υλικό στη διεργασία. Διαφορετικά πληρωτικά υλικά δίνουν διαφορετική απόδοση και γι' αυτόν το λόγο εξάγεται διάγραμμα που περιγράφει αυτήν τη σχέση. Στο έκτο πείραμα μελετάται η επίδραση που έχει η παροχή μάζας νερού πάνω σε διάφορες παραμέτρους του συστήματος και φυσικά δίδονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Στο κεφάλαιο 6 αναφέρονται τρόποι με τους οποίους οι φοιτητές μπορούν να επωφεληθούν από την παρούσα διπλωματική εργασία. Πιο συγκεκριμένα εξηγείται πώς η ενασχόληση του φοιτητή μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη κατανόηση των εννοιών που διδάσκονται στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών.

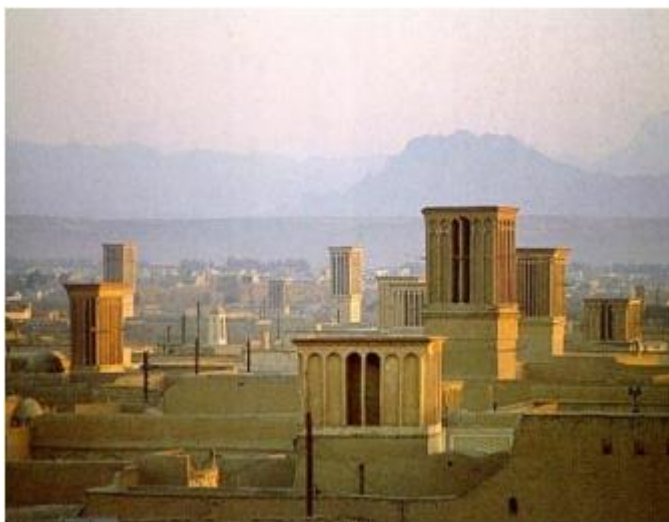
Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα αποτελέσματα των πειραμάτων συνοδευόμενα από συμπεράσματα, συμβουλές βέλτιστης χρήσης του πύργου αλλά και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, στο κεφάλαιο 8 δίνεται ο κατάλογος με τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε, ενώ στο παράρτημα δίνονται πίνακας ιδιοτήτων του νερού, ψυχομετρικός χάρτης καθώς και εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Κεφάλαιο 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Ιστορική αναδρομή

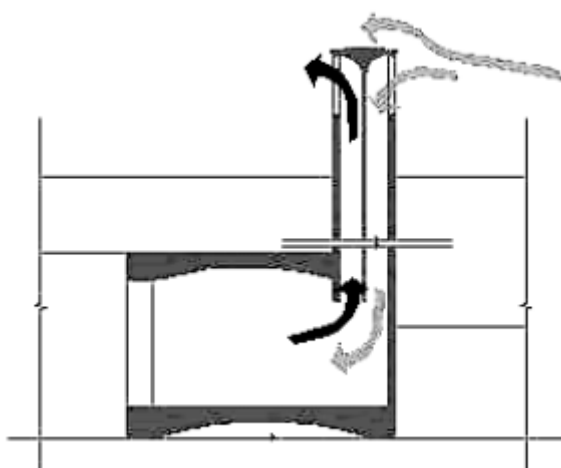
2.1.1 Αρχαιότητα



Εικόνα 2.1: Ανεμόπυργοι στην αρχαία Περσική πόλη Yazd [22]

Η ανάγκη ψύξης με χρήση νερού ή αέρα ως μέσο, υπάρχει ήδη από την αρχαιότητα. Ένα πολύ ενδιαφέρον στοιχείο ψύξης και κλιματισμού εντοπίζεται στην αρχαία Μέση Ανατολή [5]. Αν και διάφοροι λαοί της περιοχής διεκδικούν την πρωτοπορία, οι ανεμόπυργοι (ή ανεμοπαγίδες) αναπτύχθηκαν εις βάθος στην αρχαία Περσία περί το 3000 π.Χ., σύμφωνα με τους

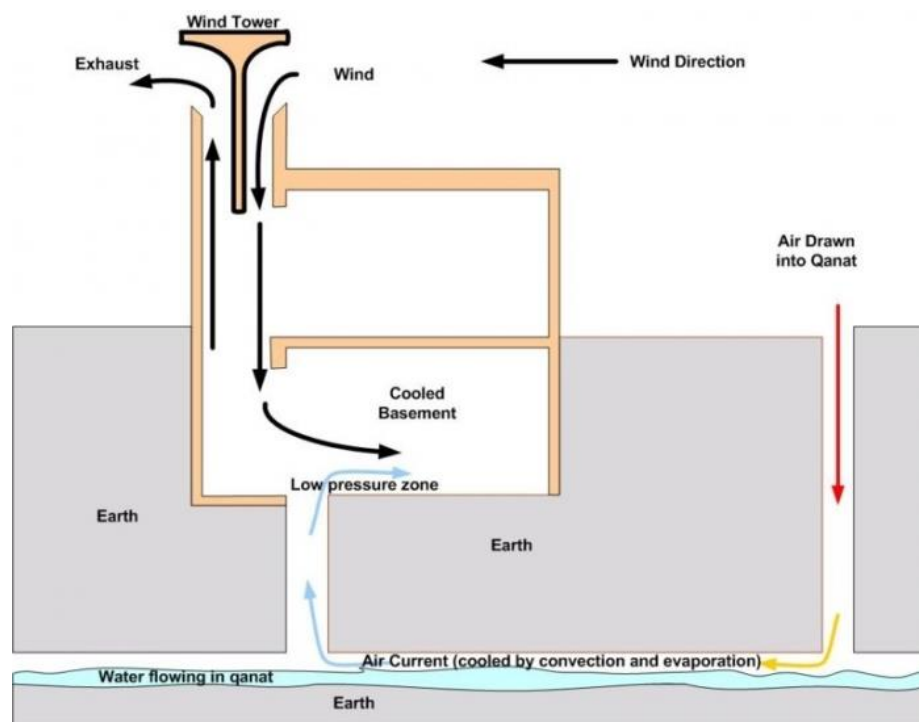
αρχαιολόγους. Σήμερα αυτή η τεχνολογία μπορεί να εντοπιστεί στην πόλη Yazd στο Ιράν, όπου διατηρείται η αρχαία αρχιτεκτονική παράδοση της Περσίας. Άλλοι λαοί στους οποίους εντοπίζεται η τεχνολογία αυτή είναι η Αίγυπτος, η Αραβία και η Βαβυλώνα [6]. Τα «Badgir» όπως λέγονται στα Περσικά, εκμεταλλεύονται τη φυσική ροή του αέρα και τη χαμηλή πυκνότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες για να δημιουργήσουν συνθήκες θερμικής άνεσης στα κτήρια της ερήμου. Μια τυπική τέτοια διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2:



Εικόνα 2.2: Τυπικό σχήμα λειτουργίας ενός badgir [5]

Όπως γίνεται αντιληπτό, ο ψυχρός αέρας, μέσω της υποδοχής στη δεξιά πλευρά του πύργου, οδηγείται στον κλιματιζόμενο χώρο όπου υπάρχει θερμός αέρας. Εφόσον δεν υπάρχει συσσώρευση μάζας στο δωμάτιο, μια ποσότητα αέρα πρέπει να εξαχθεί μέσω της αριστερής πλευράς του πύργου. Αυτή η ποσότητα θα είναι η πιο ζεστή καθώς ο θερμός αέρας είναι ελαφρύτερος και κινείται πάντα ανοδικά. Αυτή η διαδικασία προσφέρει μια φυσική αναπνοή στο κτήριο και ταυτόχρονα μειώνει στο ελάχιστο την εισαγόμενη σκόνη, καθώς ο αέρας στην κορυφή του πύργου είναι καθαρότερος απ' ό,τι στο ύψος ενός παραθύρου του κτηρίου. Για το λόγο αυτό, οι πύργοι στα ξηρά κλίματα είναι πιο ψηλοί απ' ό,τι στα υγρά. Πρόσθετοι τρόποι ελέγχου της εισαγόμενης σκόνης είναι τα φίλτρα αλλά και οι εσωτερικοί κήποι. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οπότε και η θερμοκρασία είναι σημαντικά πιο χαμηλή απ' ό,τι την ημέρα, η ψύξη των χώρων γίνεται σε μεγαλύτερο βαθμό και έτσι το κτήριο μπορεί να είναι αρκετά δροσερό το πρωί για να επιβιώσουν οι κάτοικοι στις ακραία υψηλές θερμοκρασίες (η υψηλότερη θερμοκρασία που σημειώθηκε στην έρημο Lut – την έρημο της Περσίας – είναι 70.7 °C) [7].

Μια προσθήκη στη διάταξη των badgir είναι το qanat (στα αραβικά σημαίνει κανάλι), ένα υπόγειο κανάλι με νερό, από όπου οδηγείται ο εισερχόμενος αέρας πριν εισέλθει στο κεντρικό τμήμα του κτηρίου. Αυτή η προσθήκη καθιστά μη αναγκαία τη συνθήκη να είναι χαμηλή η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα καθώς ο τελευταίος θα ψυχθεί επαρκώς από το υπέδαφος και το νερό που είναι αποθηκευμένο εκεί. Η ψύξη θα γίνει με συναγωγή αλλά και εξάτμιση του νερού καθιστώντας τον αέρα υγρό. Ο πλέον υγρός και ψυχρός αέρας διανέμεται στους χώρους του κτηρίου όπου λαμβάνει χώρα ψύξη και ύγρανση, διεργασίες που είναι απαραίτητες για την επίτευξη θερμικής άνεσης σε χώρους ξηρού και ζεστού περιβάλλοντος [6], [8], [9]. Μια τέτοια διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Ανεμόπυργος (badgir) σε συνδυασμό με κανάλι (qanat) [6]

Γίνεται αρκετά σαφές ότι η εκμετάλλευση της ροής του αέρα, της μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής και εξάτμισης μεταξύ νερού και αέρα και ο έλεγχος της υγρασίας, είναι θέματα που απασχολούσαν, χιλιετίες πριν τον 21^ο αιώνα, τους μηχανικούς που ασχολούνταν με τον κλιματισμό. Άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούσαν στην Περσία για παρόμοιους σκοπούς, οι οποίες επίσης θα μπορούσαν να μελετηθούν, είναι τα «*ab anbar*» (για αποθήκευση, κάθαρση και συντήρηση του νερού) και τα «*yakhchal*» (για τη δημιουργία και τη συντήρηση του πάγου, απαραίτητο υλικό για τη συντήρηση τροφίμων) [10]. Για άλλη μια φορά, η σοφία και η επινοητικότητα των αρχαίων λαών αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη συγκρίνοντάς τη με τη δαπανώμενη ενέργεια των σύγχρονων μεθόδων ψύξης και κλιματισμού.

2.1.2 2^η Βιομηχανική επανάσταση

Ενώ η ατμομηχανή έκανε τα πρώτα της βήματα στην πρώτη βιομηχανική επανάσταση, αναπτύχθηκε εις βάθος στη δεύτερη περίοδο, το 19^ο αιώνα. Στις διατάξεις παραγωγής ισχύος μέσω ατμού, όπου χρησιμοποιείται η ατμομηχανή, πλέον χρησιμοποιείται ο συμπυκνωτής (π.χ. όπως στον κύκλο Rankine) ώστε να μετατραπεί ο ατμός σε νερό για την επανακυκλοφορία του. Καθώς, όμως, το νερό εξέρχεται από το συμπυκνωτή, πρέπει να

ψυχθεί. Στην αρχή η ψύξη γινόταν σε τεχνητές λίμνες. Αυτό, όμως, δεν είναι εφικτό σε εγκαταστάσεις όπου ο χώρος είναι περιορισμένος. Για αυτόν το λόγο στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ξεκίνησε η χρήση ενός πρώιμου πύργου ψύξης με αρχική μορφή παρόμοια με αυτήν της καμινάδας. Στη συνέχεια η τεχνολογία του εξελίχθηκε με τις σημαντικές πατέντες των ολλανδών μηχανικών Gerard Kuypers και Frederik van Iterson και η καινούρια μορφή του πύργου ήταν υπερβολοειδής [11]. Αυτή η μορφή, προσδίδει στον πύργο την ιδιότητα να έχει μέγιστες διαστάσεις χωρίς, όμως, να απαιτούνται δοκοί στήριξης στο εσωτερικό του για επίτευξη στατικής ασφάλειας [12]. Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται ο πύργος ψύξης που σχεδίασαν οι δύο παραπάνω μηχανικοί. Είναι ο πρώτος πύργος υπερβολοειδούς μορφής και χτίστηκε στο Heerlen, στην Ολλανδία το 1918.



Εικόνα 2.4: Ο πρώτος υπερβολοειδής πύργος ψύξης, Heerlen 1918 [11]

2.2 Ταξινόμηση πύργων ψύξης

Οι πύργοι ψύξης μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τα τέσσερα παρακάτω κριτήρια.

2.2.1 Ως προς τη χρήση

Οι πύργοι ψύξης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες όσον αφορά τη χρήση τους [11]:

- Απαγωγή θερμότητας σε κλιματιστικά συστήματα εμπορικής χρήσης. Τέτοιοι πύργοι υπάρχουν σε μεγάλα κτήρια παροχής υπηρεσιών όπως νοσοκομεία (βλ. Εικόνα 2.5), αεροδρόμια και ξενοδοχεία.



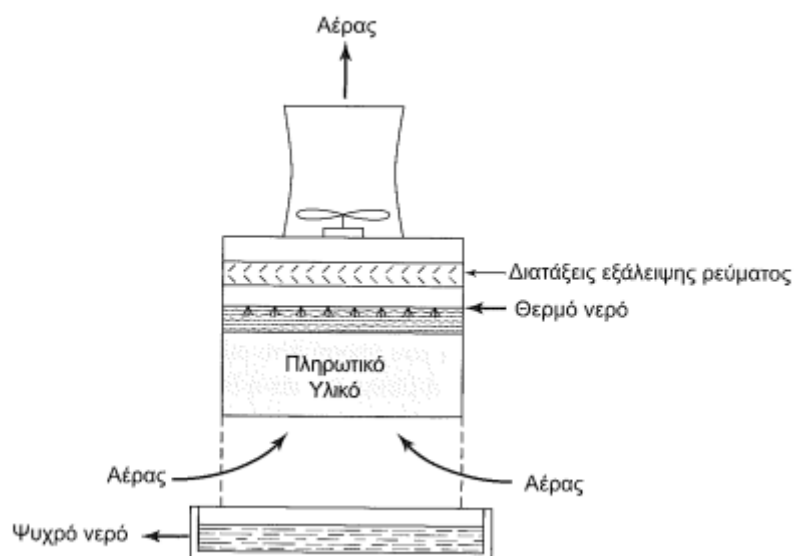
Εικόνα 2.5: Πύργοι ψύξης στο νοσοκομείο Lincoln της New York City [13]

- Απαγωγή θερμότητας από το νερό, το οποίο χρησιμοποιείται ως ψυκτικό υγρό σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

2.2.2 Ως προς τη σχετική κίνηση των ρευμάτων νερού κι αέρα

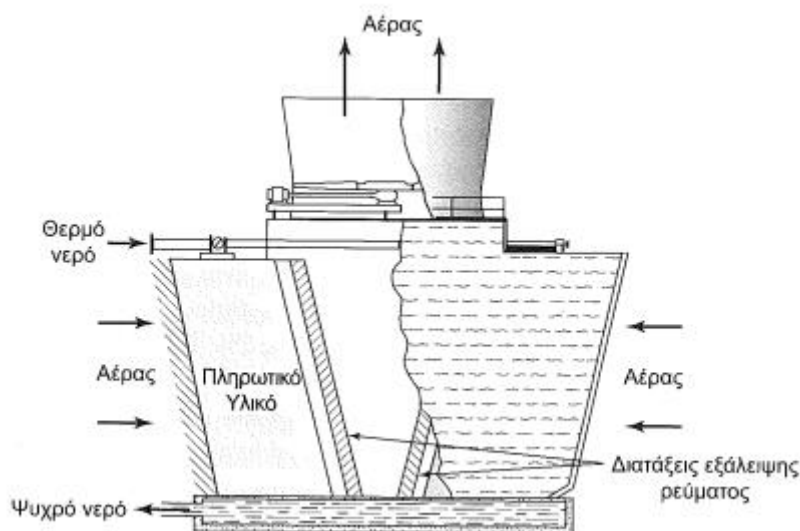
Το ρεύμα νερού και το ρεύμα αέρα μπορούν να κινούνται είτε σε αντιστροφή είτε εγκάρσια, [14].

- Στην αντιστροφή το ρεύμα νερού ψεκάζεται από την κορυφή του πύργου και συναντάει το ρεύμα αέρα το οποίο έρχεται από τη βάση του πύργου και κινείται προς την κορυφή. Αυτοί οι πύργοι προτιμώνται στην Ευρώπη. Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα της αντιστροφής.



Εικόνα 2.6: Πύργος αντιστροφής [14]

- Στην εγκάρσια ροή, το ρεύμα νερού ψεκάζεται, όπως και στην αντιρροή, από την κορυφή του πύργου, αλλά το ρεύμα αέρα εισέρχεται στον πύργο από την πλευρά του κι όχι από τη βάση του. Μετά την επαφή νερού κι αέρα στην περιοχή του πληρωτικού υλικού, ο αέρας αλλάζει κατεύθυνση και ωθείται προς την κορυφή του πύργου. Αυτοί οι πύργοι προτιμώνται στις ΗΠΑ. Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζεται ένα τυπικό σχήμα λειτουργίας τέτοιας ροής.

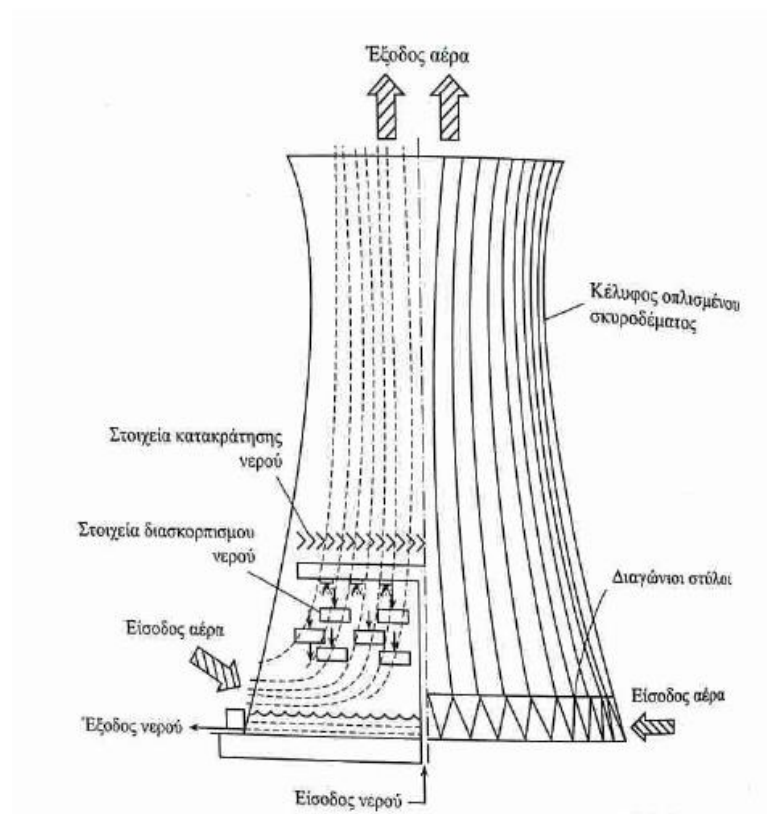


Εικόνα 2.7: Πύργος εγκάρσιας ροής [14]

2.2.3 Ως προς τη μέθοδο επίτευξης κυκλοφορίας αέρα

Η κυκλοφορία του αέρα μπορεί να είναι είτε φυσική είτε μηχανική [11], [14]:

- Στη φυσική ροή εκμεταλλεύεται η διαφορά πυκνότητας μεταξύ ψυχρού αέρα εισόδου και θερμού αέρα εξόδου, οπότε ο πρώτος ωθείται λόγω της βαρύτητας προς τη βάση του πύργου, ενώ ο τελευταίος κατευθύνεται προς την κορυφή. Τέτοιου τύπου πύργοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανίες, όπου υπάρχει περισσότερος χώρος. Στα θετικά του χαρακτηριστικά καταλογίζονται η χαμηλή ηχορύπανση και το χαμηλό κόστος λειτουργίας, ενώ στα αρνητικά του, το υψηλό κόστος κατασκευής. Στην Εικόνα 2.8 δίνεται το σχήμα λειτουργίας ενός τέτοιου πύργου ενώ στις και Εικόνα 2.10 δίνονται φωτογραφίες πύργων ψύξης με φυσική ροή από τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρισμού στην Πτολεμαΐδα [15].



Εικόνα 2.8: Πύργος ψύξης με φυσική ροή [14]

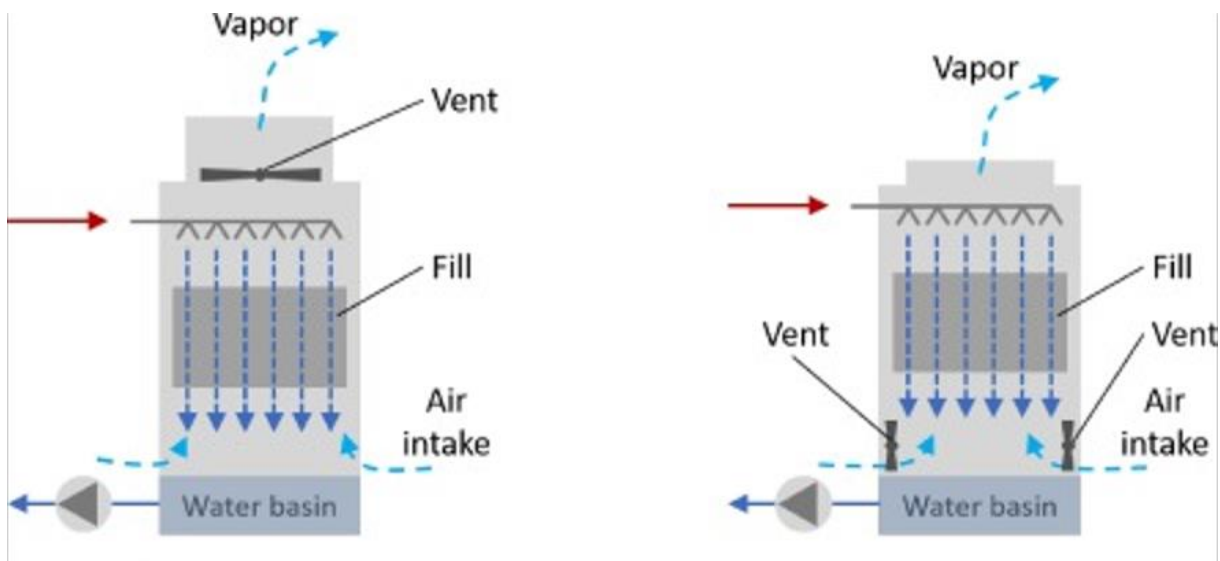


Εικόνα 2.9: Πύργος ψύξης φυσικής ροής – Πτολεμαΐδα [26]



Εικόνα 2.10: ΑΗΣ Καρδιάς [15]

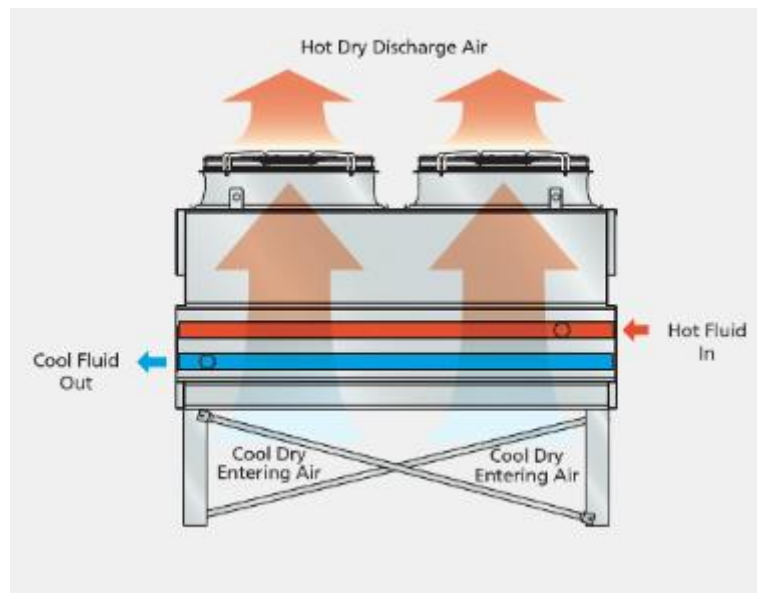
- Η μηχανική ροή επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ανεμιστήρα και διακρίνεται δύο υποκατηγορίες. Στην εξαναγκασμένη ροή, όπου γίνεται κατάθλιψη αέρος, ο ανεμιστήρας τοποθετείται στη βάση του πύργου και από εκεί ωθεί τον αέρα στο εσωτερικό. Στη δε υποβοηθούμενη ροή, όπου γίνεται ελκυσμός αέρος, ο ανεμιστήρας τοποθετείται στην κορυφή του πύργου και από εκεί έλκει τον αέρα προς τα έξω [16]. Στην Εικόνα 2.11 παρουσιάζονται οι δύο μορφές μηχανικής ροής.



Εικόνα 2.11: Υποβοηθούμενη ροή (αριστερά), εξαναγκασμένη ροή (δεξιά) [17]

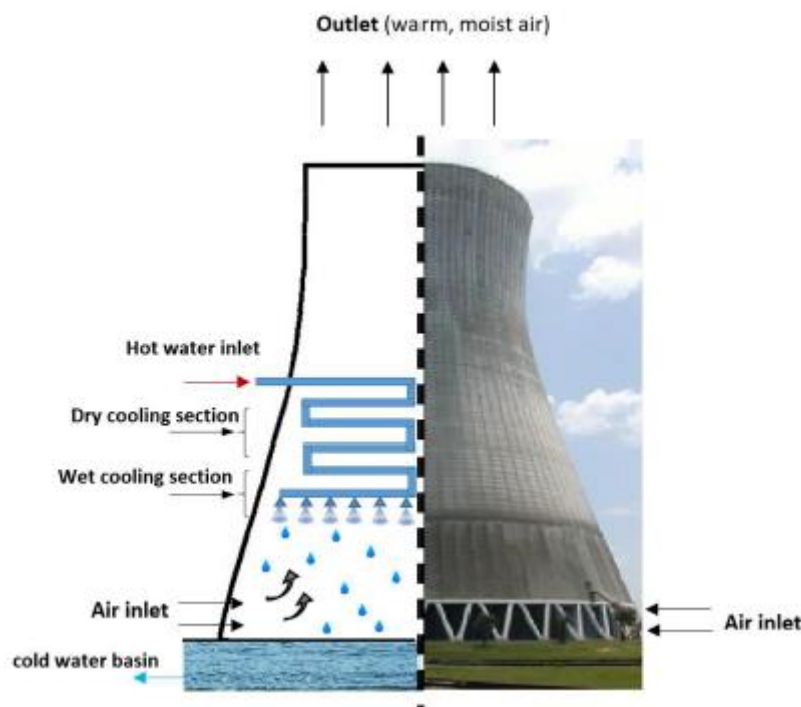
2.2.4 Ως προς τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας

- Ο πύργος ξηρής ψύξης είναι πολύ παρόμοιος με έναν εναλλάκτη θερμότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, το νερό δεν επιτρέπεται να αγγίξει τον αέρα, οπότε δεν υπάρχει εξάτμιση και η μετάδοση θερμότητας περιορίζεται μόνο στη συναγωγή. Η μέθοδος αυτή μηδενίζει τις απώλειες νερού, αλλά περιορίζει και την απόδοση της ψύξης [11]. Μια τέτοια διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12: Πύργος ξηρής ψύξης [18]

- Ο πύργος υγρής ψύξης είναι κι ο πύργος που πραγματεύεται η εργασία. Σε αυτόν τον πύργο το νερό έρχεται σε πλήρη επαφή με τον αέρα, οπότε η εξάτμιση είναι η κύρια μέθοδος μεταφοράς θερμότητας. Η απόδοση της ψύξης είναι προφανώς πολύ υψηλή, αλλά υπάρχει το κόστος της απώλειας νερού, ακόμα και με την προσθήκη ατμοπαγίδας [11].
- Μια καινούρια τεχνολογία στο πεδίο του πύργου ψύξης είναι αυτός της υβριδικής ψύξης. Σε αυτήν την περίπτωση, συναντώνται οι δύο προηγούμενοι ώστε να δοθεί μία μέση λύση στο δίλημμα απόδοση ψύξης – απώλεια νερού. Καθώς ο αέρας εισέρχεται στον πύργο, έρχεται σε επαφή με τα σταγονίδια νερού, όπως στην υγρή ψύξη. Αφού, όμως, περάσει τα ακροφύσια που ψεκάζουν το νερό, αγγίζει το σωλήνα απ' όπου περνάει το νερό για να πάει στα ακροφύσια κι έτσι απάγει θερμότητα δια συναγωγής. Με αυτόν τον τρόπο λοιπόν το νερό έχει ήδη ψυχθεί προτού ψεκαστεί. Μια τέτοια μέθοδος μπορεί να μειώσει τις απώλειες νερού κατά 20%, ενώ κρατάει την υψηλή απόδοση ψύξης που προσφέρει η εξάτμιση [11]. Ένας πύργος υβριδικής ψύξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.13.



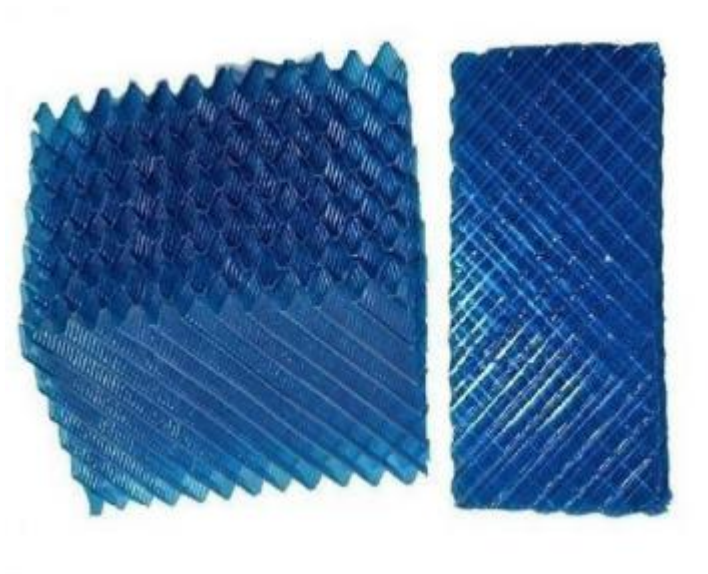
Εικόνα 2.13: Πύργος υβριδικής ψύξης [11]

2.3 Πληρωτικό υλικό

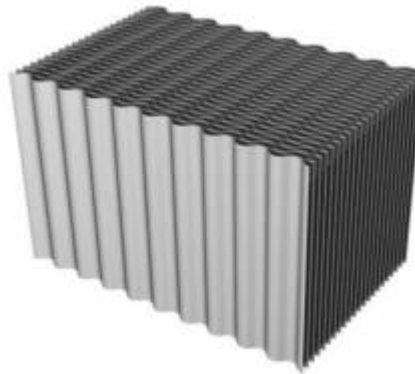
Το πληρωτικό υλικό παίζει μεγάλο ρόλο στη διεργασία και ο σωστός σχεδιασμός του είναι πολύ σημαντικός. Στόχος του πληρωτικού υλικού είναι να αυξήσει την επιφάνεια επαφής αέρα – νερού και να διανείμει το νερό όσο περισσότερο γίνεται, ώστε να λαμβάνει χώρα όλο και περισσότερη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής αλλά και απαγωγής λανθάνουσας θερμότητας λόγω εξάτμισης. Συνεπώς, ενώ το μέγεθος του πληρωτικού υλικού εξαρτάται από τις διαστάσεις της στήλης, η δε μορφή του περιορίζεται μόνο από τη φαντασία και την ευρηματικότητα του μηχανικού. Παρ' όλο που υπάρχουν πολλά είδη πληρωτικού υλικού στη βιβλιογραφία, εδώ θα αναφερθούν τα πιο κύρια.

2.3.1 Πληρωτικό υλικό τύπου Film

Αυτό το υλικό αποτελείται από πολλά κυματοειδή φύλλα, τα οποία στοιχίζονται με τρόπο τέτοιο ώστε να πληρώνουν κατά το μέγιστο το χώρο της στήλης, αλλά και να επιτρέπουν τη ροή αέρα και νερού [16], [19]. Οι συνηθέστερες μορφές στοίχισης είναι αυτή της κυψελοειδούς (Εικόνα 2.14) και αυτή της κατακόρυφης (Εικόνα 2.15).

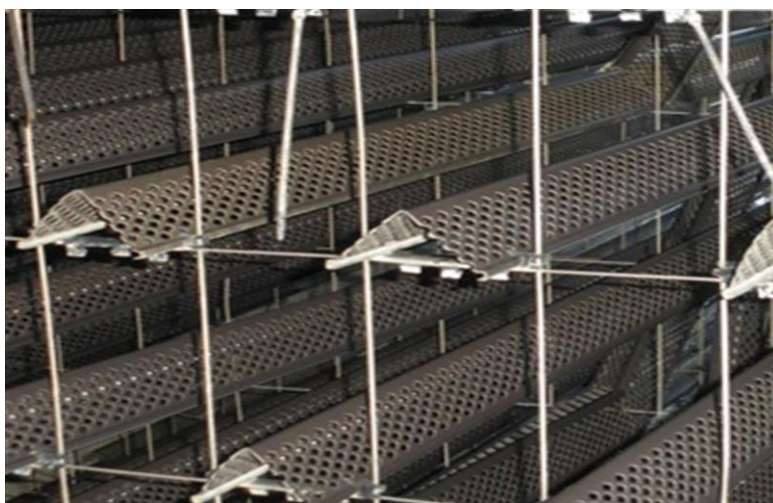


Εικόνα 2.14: Κυψελοειδής στοίχιση πληρωτικού υλικού τύπου Film [19]



Εικόνα 2.15: Κατακόρυφη στοίχιση πληρωτικού υλικού τύπου Film [20]

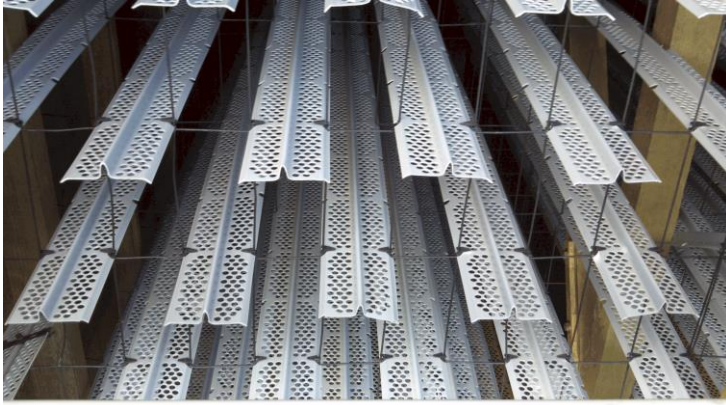
2.3.2 Πληρωτικό υλικό τύπου Splash



Εικόνα 2.16: Στοίχιση πληρωτικού υλικού τύπου splash κατά V – Bar [24]

Αυτό το υλικό αποτελείται από πορώδεις δοκούς, στοιχισμένες έτσι ώστε το νερό να διασπάται σε μικρά σταγονίδια τα οποία επιτρέπουν περισσότερη μετάδοση ενέργειας. Ενώ λόγω των πόρων (κάτι που δεν έχουν τα πληρωτικά υλικά τύπου film) ευνοείται η

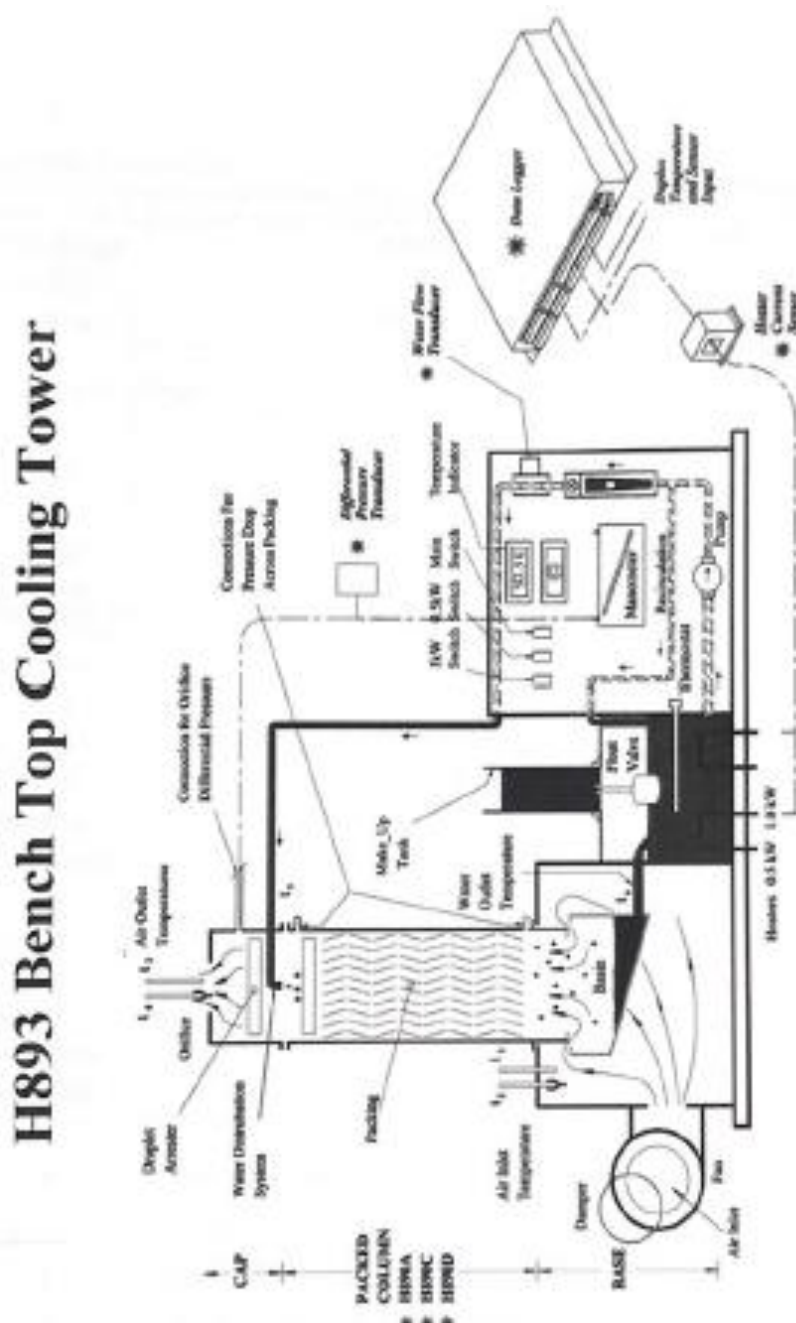
μετάδοση ενέργειας, η πλήρωση του χώρου της στήλης δεν είναι το ίδιο ικανοποιητική με αυτή των υλικών τύπου film [16], [19]. Οι δύο επικρατέστερες μορφές πληρωτικού υλικού τύπου splash είναι η V – Bar (Εικόνα 2.16) και η Gull Wing (Εικόνα 2.17).



Εικόνα 2.17: Στοιχισή πληρωτικού υλικού τύπου splash κατά Gull Wing [21]

Κεφάλαιο 3. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ H893 BENCH TOP COOLING TOWER

3.1 Δομή



Εικόνα 3.1: Σκαρίφημα του εργαστηριακού πύργου ψύξης H893 Bench Top Cooling Tower, πηγή: αντίστοιχο εγχειρίδιο χρήσης

Για να περιγραφεί η λειτουργία του συγκεκριμένου πύργου ψύξης πρέπει πρώτα να περιγραφεί η δομή του ξεκινώντας από το χώρο όπου πραγματοποιείται η διεργασία. Στην Εικόνα 3.1 περιγράφεται ποιοτικά η δομή του πύργου ψύξης, ενώ παρακάτω θα περιγραφεί

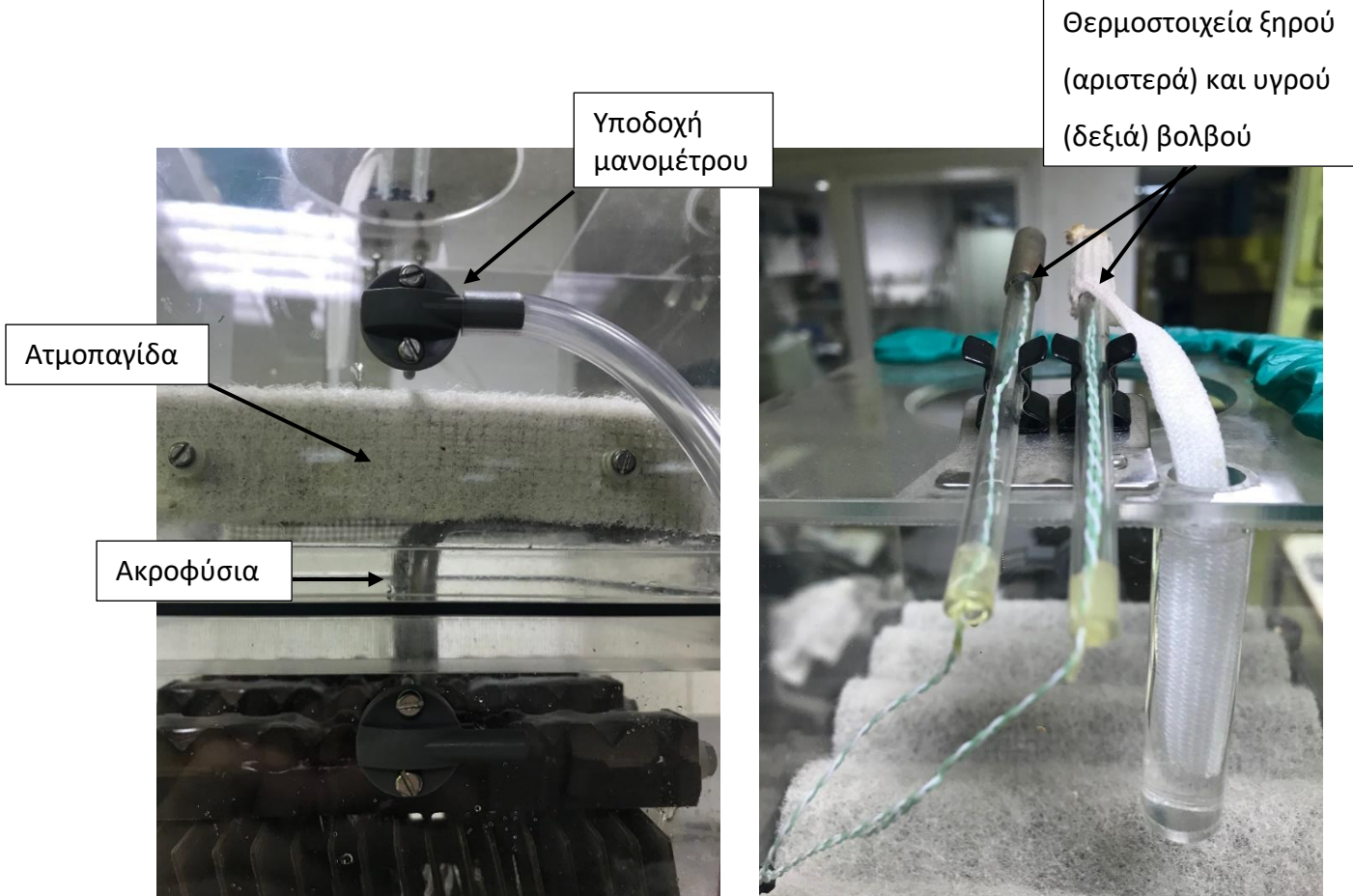
και με φωτογραφίες. Η στήλη με το πληρωτικό υλικό (Εικόνα 3.2) αποτελεί το θάλαμο όπου νερό και αέρας έρχονται σε επαφή, ανταλλάσσουν θερμότητα και όπου το νερό εξατμίζεται. Το πληρωτικό υλικό είναι πλάκες οι οποίες αυξάνουν την επιφάνεια επαφής μεταξύ νερού και αέρα, ώστε να υπάρχει περισσότερη ανταλλαγή θερμότητας. Στο εργαστήριο διατίθενται τρεις στήλες με διαφορετικό λόγο επιφάνειας ανά όγκο (A: 77 m^{-1} , B: 110 m^{-1} , C 220 m^{-1}). Στην κορυφή και στη βάση της στήλης, υπάρχει σημείο υποδοχής μανομέτρου για μέτρηση της πίεσης.



Εικόνα 3.2: Η στήλη με το πληρωτικό υλικό

Πάνω από τη στήλη τοποθετείται το καπάκι με οπή (Εικόνα 3.3), η οποία λειτουργεί ως ακροφύσιο ώστε να ωθεί τον αέρα προς τα έξω. Το καπάκι υποδέχεται τον κόκκινο σωλήνα που φέρει το θερμό νερό που ψεκάζεται, μέσω τριών ακροφυσίων, προς το πληρωτικό υλικό. Μέσα στο σωλήνα υπάρχει ένα θερμοστοιχείο για μέτρηση θερμοκρασίας νερού εισόδου (T_5). Πάνω από τα ακροφύσια ψεκασμού νερού, υπάρχει η ατμοπαγίδα που εμποδίζει τη διαφυγή των σταγονιδίων νερού, μειώνοντας έτσι τις απώλειες σε νερό. Ακόμα

διαθέτει σημείο υποδοχής μανομέτρου για μέτρηση πίεσης. Τέλος, στο σημείο εξόδου του



Εικόνα 3.3: Το καπάκι της στήλης με την ατμοπαγίδα και τις υποδοχές μανομέτρου (αριστερά) και με τα θερμοστοιχεία (δεξιά)

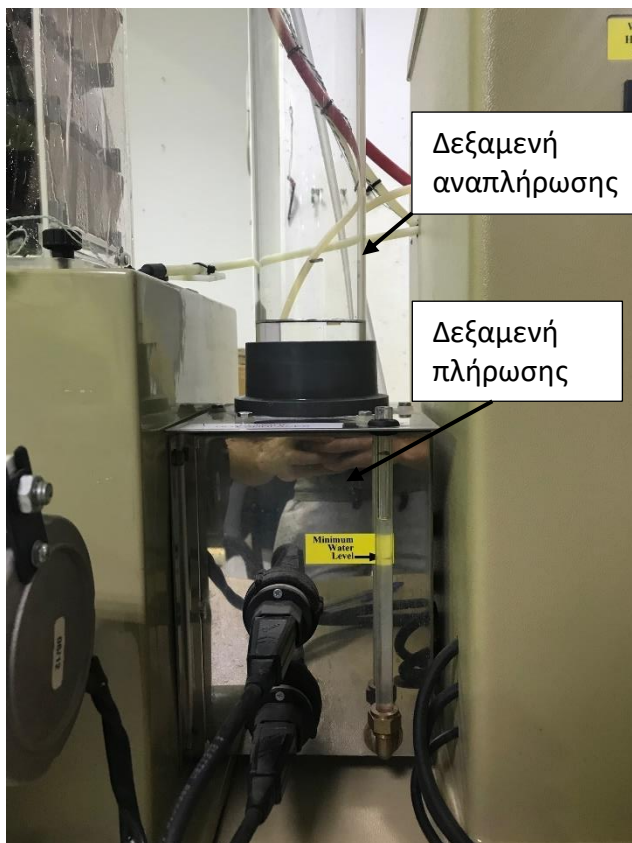
αέρα υπάρχουν δύο θερμοστοιχεία, το ένα μετράει τη θερμοκρασία ξηρού βολβού (T_4) και το άλλο τη θερμοκρασία υγρού βολβού (T_3). Η διάμετρος της σπής είναι $D_{cap} = 0.079 \text{ m}$



Εικόνα 3.4: Η λεκάνη, ο ανεμιστήρας και τα θερμοστοιχεία

Στη βάση της στήλης βρίσκεται η λεκάνη (basin - Εικόνα 3.4) όπου συλλέγεται το νερό που ψύχθηκε και επανατροφοδοτείται στο κύκλωμα. Η θερμοκρασία εξόδου του νερού (T_6) μετράται με θερμοστοιχείο που βρίσκεται εντός της λεκάνης.

Ο αέρας εισέρχεται στη στήλη μέσω φυγοκεντρικού ανεμιστήρα (fan) που βρίσκεται προσαρτημένος στο κέλυφος της λεκάνης, η παροχή του οποίου ρυθμίζεται με ένα damper. Δύο θερμοστοιχεία βρίσκονται μέσα στο κέλυφος της λεκάνης για να μετρούν τη θερμοκρασία ξηρού βολβού (T_1) και υγρού βολβού (T_2) του αέρα εισόδου.



Εικόνα 3.5: Η δεξαμενή πλήρωσης (κάτω) και η δεξαμενή αναπλήρωσης (πάνω)

Το νερό της λεκάνης (αυτό που ψύχθηκε από τον αέρα) πηγαίνει στη δεξαμενή πλήρωσης όπου θερμαίνεται με θερμαντήρα (Εικόνα 3.5). Διατίθεται ένας θερμαντήρας των 0.5 kW κι ένας των 1.0 kW, συνεπώς μπορούν να εφαρμοστούν 3 διαφορετικά θερμικά φορτία (0.5 kW, 1.0 kW και 1.5 kW στην περίπτωση που λειτουργούν και οι δύο θερμαντήρες). Ακόμα, στο οπίσθιο τμήμα της δεξαμενής πλήρωσης, υπάρχει μια βαλβίδα απ' όπου δύναται να στραγγιστεί το νερό (Εικόνα 3.6).

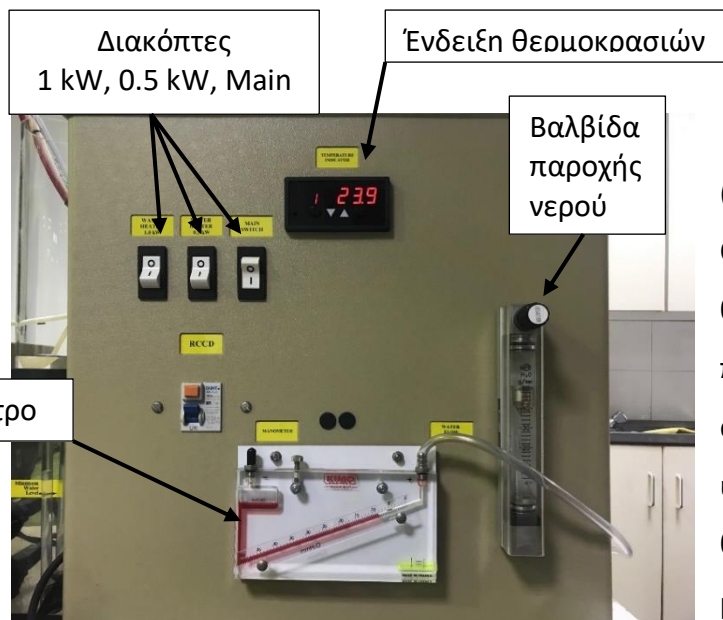
Καθώς το νερό εξατμίζεται και το σύστημα απαιτεί διαρκή τροφοδότηση νερού, τοποθετείται πάνω στη δεξαμενή πλήρωσης ένα κυλινδρικό δοχείο, ανοιχτό

και από τις δύο του πλευρές, η δεξαμενή αναπλήρωσης (Εικόνα 3.5). Οι δύο δεξαμενές έχουν μια βαλβίδα με φλοτέρ ενδιάμεσα που όταν η στάθμη του νερού στη δεξαμενή πλήρωσης πέσει κάτω από ένα κρίσιμο σημείο, ανοίγει το φλοτέρ και επιτρέπει να εισέλθει καινούριο νερό. Η δεξαμενή αναπλήρωσης φέρει μια βελόνα ως ένδειξη ύψιστης στάθμης νερού. Η διάμετρος της δεξαμενής αναπλήρωσης είναι $D_{mu} = 0.07 \text{ m}$.

Από τη δεξαμενή πλήρωσης, το νερό περνάει από την αντλία, τη βαλβίδα ελέγχου παροχής νερού και καταλήγει ξανά στο καπάκι της στήλης για να ψυχθεί εκ νέου.



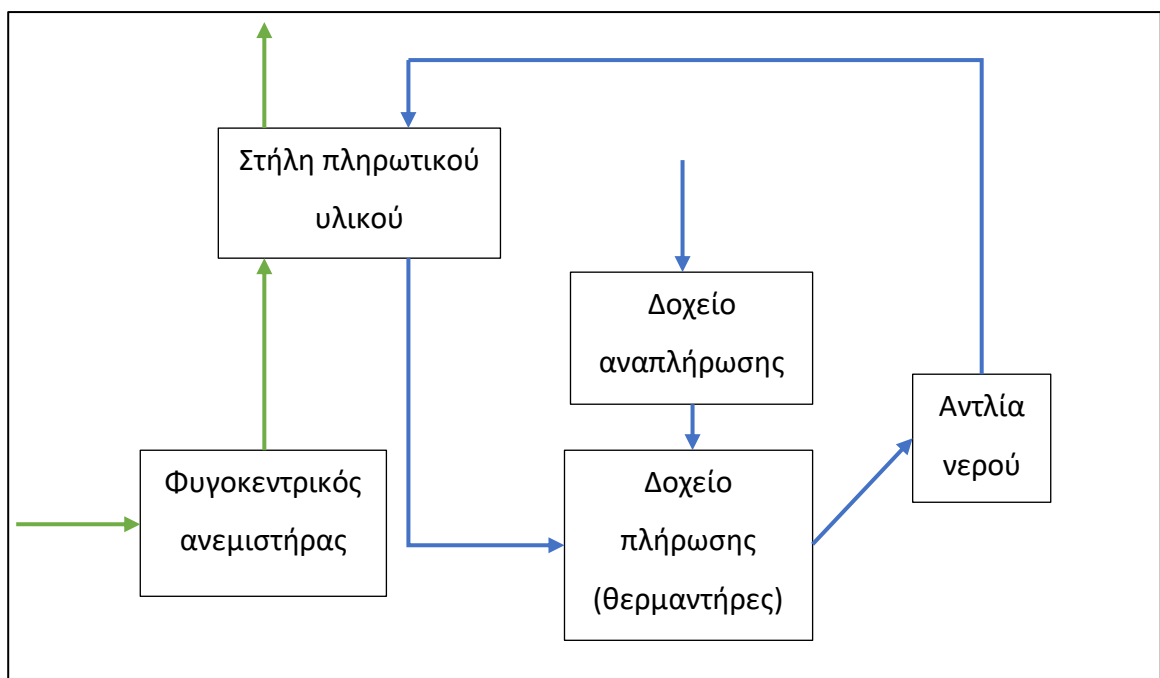
Εικόνα 3.6: Η βαλβίδα απ' όπου στραγγίζεται η δεξαμενή πλήρωσης



Εικόνα 3.7: Ο πίνακας ελέγχου με τους διακόπτες, την ψηφιακή ένδειξη, τη βαλβίδα ελέγχου παροχής νερού και το μανόμετρο

Πάνω στον πίνακα ελέγχου (Εικόνα 3.7) διακρίνονται 3 διακόπτες. Οι δύο αφορούν τους δύο θερμαντήρες που αναφέρθηκαν προηγουμένως και τρίτος διακόπτης αφορά την παροχή ρεύματος. Ακόμα υπάρχει μια ψηφιακή ένδειξη θερμοκρασιών, η οποία λαμβάνει τις μετρήσεις των θερμοστοιχείων και ένα μανόμετρο με σωλήνα που συνδέεται στα τρία σημεία υποδοχής της στήλης (βάση, κορυφή και καπάκι).

Για να γίνει πιο κατανοητή η διάταξη, παρατίθεται ένα διάγραμμα ροής που περιγράφει τη λειτουργία του πύργου. Οι μπλε γραμμές αφορούν την κίνηση του νερού, ενώ οι πράσινες αφορούν την κίνηση του αέρα.



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα ροής του πύργου ψύξης

3.2 Όργανα μέτρησης & εξισώσεις

Όπως ήδη αναφέρθηκε, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα και του νερού στην είσοδο και στην έξοδο της στήλης, χρησιμοποιούνται τα θερμοστοιχεία που είναι εγκατεστημένα πάνω στον πύργο ψύξης. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού αναπλήρωσης χρησιμοποιήθηκε το ανεμόμετρο «TSI 8350 VelociCalc Air Velocity Meter» που διατίθεται στο Εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Στροβιλομηχανών του τμήματος.

3.2.1 Όγκος απολεσθέντος νερού

Για τη μέτρηση του όγκου απολεσθέντος νερού το εγχειρίδιο προτείνει την αναπλήρωση του νερού, στο τέλος του πειράματος, με χρήση ογκομετρικού δοχείου. Το ποσό νερού που θα χρειαστεί για να φτάσει η στάθμη στην αρχική της θέση θα είναι το ποσό νερού που χάθηκε. Αυτή η μέθοδος, όμως, δεν είναι πρακτική και ξοδεύει νερό καθώς όταν απενεργοποιηθεί το σύστημα, με το πέρας των πειραμάτων, πρέπει η στάθμη της δεξαμενής αναπλήρωσης να πέσει στα 50 χιλιοστά. Άρα στο τελευταίο πείραμα της κάθε μέρας, θα πρέπει να γεμίζεται η δεξαμενή για να μετρηθεί ο όγκος νερού που χάθηκε και αμέσως μετά να αδειάζει για να τηρηθούν οι οδηγίες συντήρησης του εγχειριδίου. Επίσης, αυτός ο τρόπος δε δίνει τη δυνατότητα τακτικής μέτρησης της απώλειας νερού κατά τη διάρκεια του πειράματος, κάτι που κρίνεται απαραίτητο για τον έλεγχο θερμοδυναμικής ισορροπίας του συστήματος. Ένα σύστημα το οποίο δε βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία, αναμένεται να εξατμίζει ποσότητες νερού χωρίς κάποια συνέπεια, άρα και η στάθμη θα μειώνεται με ακανόνιστους ρυθμούς.

Συνεπώς, χρησιμοποιείται ένας εναλλακτικός τρόπος μέτρησης απολεσθέντος νερού. Κάθε φορά, μαζί με τις θερμοκρασίες, μετράται και απώλεια στάθμης από την αρχική. Αυτή η απώλεια (εδώ μετράται σε χιλιοστά) πολλαπλασιάζεται με τη διατομή της δεξαμενής αναπλήρωσης και έτσι προκύπτει ο όγκος. Δηλαδή:

$$V_{loss} = h \cdot A_{mu} \quad 3.1$$

Όπου:

- V_{loss} : όγκος απολεσθέντος νερού
- h : απώλεια στάθμης από την βελόνα

- A_{mu} : εμβαδόν διατομής δεξαμενής αναπλήρωσης (mu = make up) το οποίο υπολογίζεται ως

$$A_{mu} = \pi \frac{D_{mu}^2}{4} = 0.003848 \text{ m}^2$$

Επιπρόσθετα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο σταθερός ρυθμός πτώσης της στάθμης συνεπάγεται θερμοδυναμικά ισορροπημένο σύστημα. Αυτή η πρόταση έγινε συνθήκη σε όλα τα πειράματα.

Κατά συνέπεια, αν ο όγκος V_{loss} πολλαπλασιαστεί με την πυκνότητα του νερού ρ_{H_2O} και διαιρεθεί με τη διάρκεια του πειράματος Δt , μπορεί να υπολογιστεί η παροχή μάζας νερού από τη δεξαμενή αναπλήρωσης και αντικαθιστώντας με την εξίσωση 3.1 προκύπτει:

$$\dot{m}_E = \frac{h \cdot A_{mu} \cdot \rho_{H_2O}}{\Delta t} \quad 3.2$$

3.2.2 Παροχή μάζας ξηρού αέρα

Για τη μέτρηση της παροχής του ξηρού αέρα στο σύστημα το εγχειρίδιο προτείνει τον παρακάτω τύπο:

$$\dot{m}_{da} = 0.0137 \sqrt{\frac{\Delta p_{cap}}{(1 + \omega_B) v_B}} \quad 3.3$$

Όπου:

- Δp_{cap} : διαφορά πίεσης στο καπάκι της στήλης (σε mm H₂O)
- ω_B : απόλυτη υγρασία στην έξοδο της στήλης (σε kg_w/kg_{da})
- v_B : όγκος υγρού αέρα ανά kg ξηρού στην έξοδο της στήλης (= υγρός ειδικός όγκος, σε m³/kg_{da})

Παρά την πρόταση του εγχειριδίου, στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένας διαφορετικός τρόπος μέτρησης και αποδείχθηκε πιο αξιόπιστος. Με χρήση του ανεμομέτρου που αναφέρθηκε παραπάνω, μετράται η ταχύτητα του αέρα σε 6 διαφορετικά σημεία στο καπάκι της στήλης, όπου εξάγεται ο αέρας. Πολλαπλασιάζοντας το μέσο όρο των μετρηθέντων τιμών με το εμβαδόν της οπής στο καπάκι, προκύπτει η ογκομετρική παροχή του αέρα:

$$\frac{dV}{dt} = \bar{u} \cdot A_{cap} \quad 3.4$$

Όπου:

- $\bar{u}$: ταχύτητα αέρα στο καπάκι
- A_{cap} : εμβαδό οπής το οποίο υπολογίζεται ως:

$$A_{cap} = \pi \frac{D_{cap}^2}{4} = 0.0049 \text{ m}^2$$

Διαιρώντας την ογκομετρική παροχή του αέρα με τον υγρό ειδικό όγκο του αέρα στην έξοδο της στήλης, προκύπτει η μαζική παροχή του ξηρού αέρα:

$$\dot{m}_{da} = \frac{1}{v_B} \cdot \frac{dV}{dt} \quad 3.5$$

Άρα συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.4 και 3.5 προκύπτει η εξίσωση 3.6:

$$\dot{m}_{da} = \frac{\bar{u} \cdot A_{cap}}{v_B} \quad 3.6$$

Υπάρχει ένας πολύ απλός λόγος για τον οποίο η μέθοδος που προτείνεται από το εγχειρίδιο δεν είναι τόσο αξιόπιστη: όταν το damper του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα είναι πλήρως κλειστό, λαμβάνεται ως δεδομένο ότι η διαφορά πίεσης στο καπάκι (Δp_{cap}) είναι μηδενική, άρα σύμφωνα με την εξίσωση 3.3 η μαζική παροχή του ξηρού αέρα θα είναι κι αυτή μηδενική. Αν, όμως, για τις ίδιες συνθήκες, χρησιμοποιηθεί η δεύτερη μέθοδος, παρατηρείται (με το χέρι αλλά και με το ανεμόμετρο) ότι υπάρχει ταχύτητα αέρα στην έξοδο του πύργου, και σύμφωνα με την εξίσωση 3.6, η μαζική παροχή του ξηρού αέρα δε μηδενίζεται όταν υπάρχει ταχύτητα. Συνεπώς, η δεύτερη μέθοδος είναι πιο ρεαλιστική, ενώ η πρώτη απαιτεί παραδοχές που δεν είναι πάντα επιτρεπτές.

3.2.3 Βελτίωση της εξίσωσης του εγχειριδίου

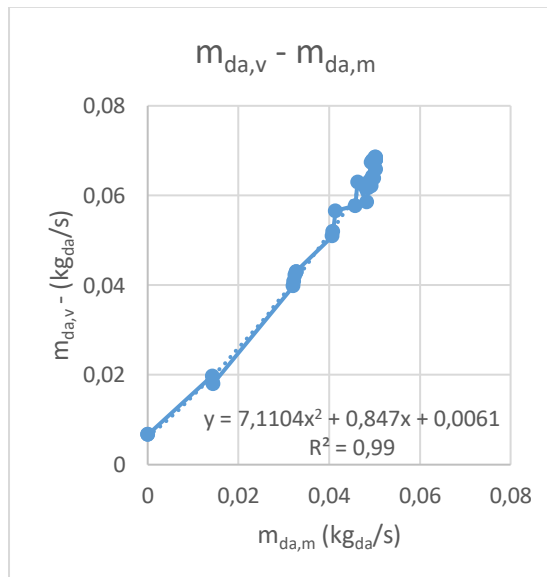
Εφόσον έχουν συλλεχθεί όλα τα δεδομένα από τα πειράματα (τα οποία θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο) καταγράφονται σε ένα πρόγραμμα (στην προκειμένη περίπτωση Microsoft Excel) όλες οι μετρήσεις που έγιναν όσον αφορά την παροχή μάζας ξηρού αέρα. Καταγράφονται οι τιμές που λαμβάνονται από την προτεινόμενη από το εγχειρίδιο εξίσωση, αλλά και από την προτεινόμενη από αυτήν την εργασία μέθοδο. Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές, το excel δίνει ένα διάγραμμα που συσχετίζει τις δύο μεθόδους με τη σχέση 3.7:

$$\dot{m}_{da,v} = 7.121 \dot{m}_{da,m}^2 + 0.8472 \dot{m}_{da,m} + 0.0061 \quad 3.7$$

Όπου ο δείκτης «v» σημαίνει «VelocityCalc» η οποία είναι η συσκευή με την οποία μετρήθηκε ο αέρας στην έξοδο της στήλης, συμβολίζοντας έτσι την παροχή αέρα που υπολογίζεται από

την προτεινόμενη από την εργασία μέθοδο. Ο δε δείκτης «m» σημαίνει «manual» που συμβολίζει την υπολογιζόμενη από το εγχειρίδιο παροχή αέρα στην έξοδο της στήλης.

Η εξίσωση 3.7 περιγράφεται από τη διακεκομμένη καμπύλη στην Εικόνα 3.9. Οι βούλες βρίσκονται πάνω στα σημεία όπου βρίσκονται οι μετρήσεις που πάρθηκαν, ενώ η διακεκομμένη καμπύλη αποτελεί αναπαράσταση της εξίσωσης 3.7.



Εικόνα 3.9: Γραφική σχέση μεταξύ της υπολογιζόμενης από το εγχειρίδιο παροχής αέρα και της υπολογιζόμενης από την, προτεινόμενη από την εργασία, μέθοδο

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.7 και 3.3 προκύπτει τελικά η εξίσωση από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η διορθωμένη παροχή μάζας αέρα χρησιμοποιώντας την πτώση πίεσης στο καπάκι της στήλης:

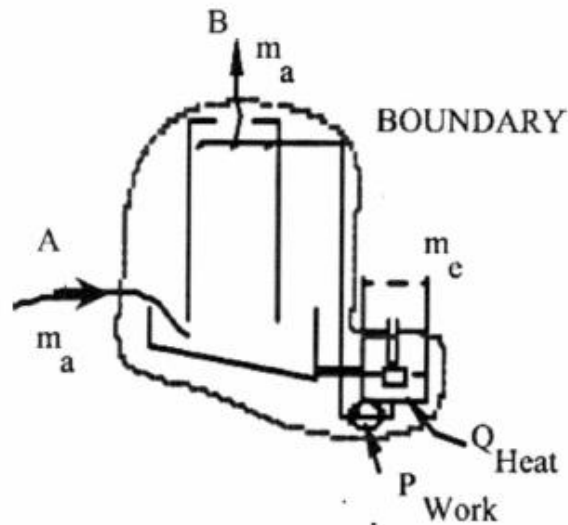
$$\dot{m}_{da} = 0.00133654 \cdot \frac{\Delta p_{cap}}{(1 + \omega_B)v_B} + 0.0116066 \cdot \left(\frac{\Delta p_{cap}}{(1 + \omega_B)v_B} \right)^{0.5} + 0.0061 \quad 3.8$$

Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιήθηκε για 34 διαφορετικές περιπτώσεις και, σε σύγκριση με τη μέθοδο του ανεμομέτρου, το μέσο ποσοστό σφάλματος βρέθηκε να είναι 3%, κάτι που την καθιστά πολύ χρήσιμη αλλά και ασφαλή.

3.3 Έλεγχος εγκυρότητας μετρήσεων

Για να βεβαιωθεί ο χρήστης του πύργου ψύξης ότι οι μετρήσεις που λήφθηκαν μπορούν να οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα, θα πρέπει να γίνει έλεγχος με βάση το

ισοζύγιο μάζας και το ισοζύγιο ενέργειας στον όγκο ελέγχου που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.10: Όγκος ελέγχου (Πηγή: Εγχειρίδιο χρήσης του H893 Bench Top Cooling Tower)

Και τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας θα είναι αντίστοιχα:

$$\dot{m}_{da} \cdot \omega_B = \dot{m}_{da} \cdot \omega_A + \dot{m}_E \quad 3.9$$

$$Q - P = \dot{m}_{da}(h_B - h_A) - \dot{m}_E h_E \quad 3.10$$

Όπου:

- ω_i : απόλυτη υγρασία του αέρα στη θέση i (A: είσοδος αέρα, B: έξοδος αέρα)
- $\dot{m}_E$: παροχή μάζας νερού από τη δεξαμενή αναπλήρωσης
- Q_H : θερμικό φορτίο θερμαντήρα (0.5 ή 1.0 ή 1.5 kW)
- P : ισχύς αντλίας νερού ($= -0.1 \text{ kW}$)
- $h_{A,B}$: ειδική ενθαλπία υγρού αέρα ανά kg ξηρού αέρα
- h_E : ειδική ενθαλπία νερού ανά kg νερού

Οι υγρασίες και οι ειδικές ενθαλπίες υγρού αέρα μπορούν να ληφθούν από τον ψυχομετρικό χάρτη. Όταν, όμως, τα πειράματα είναι πολλά και οι υπολογισμοί πρέπει να γίνονται στιγμιαία, απαιτείται χρήση των σχετικών εξισώσεων. Σε αυτήν την εργασία οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται λαμβάνονται από το εγχειρίδιο της ASHRAE [3] του 2017 και από το εισαγωγικό σύγγραμμα του καθηγητή κ. Μποντόζογλου Βασιλείου [2] πάνω στο

μάθημα «Φυσικές Διεργασίες» του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος. Οι δε θερμοδυναμικές ιδιότητες του νερού λαμβάνονται από τους γνωστούς πίνακες. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι πίνακες του παραρτήματος του βιβλίου των Cengel και Boles [4].

Κεφάλαιο 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ: ΣΤΗΛΗ Α

Κατά τη διάρκεια της μελέτης πραγματοποιήθηκε μια σειρά από 6 πειράματα, τα 5 από τα οποία προτείνονται και από το εγχειρίδιο. Τα πειράματα που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο, έγιναν όλα χρησιμοποιώντας τη στήλη πληρωτικού υλικού Α που έχει λόγο επιφάνειας προς όγκου 77 m^{-1} (αυτός ο λόγος ορίζεται και ως πυκνότητα πλήρωσης).

Το πρώτο πείραμα αφορά την εφαρμογή ισοζυγίων μάζας και ενέργειας για διάφορες τιμές της παροχής μάζας αέρα. Είναι ένας έλεγχος ότι το σύστημα και οι μετρήσεις ακολουθούν τους βασικούς νόμους διατήρησης της μάζας και της ενέργειας. Συνεπώς, παρ' όλο που το πρώτο πείραμα αφορά αποκλειστικά τα ισοζύγια, αυτά θα εφαρμοστούν και στα υπόλοιπα πειράματα ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία των μετρήσεων και των υπολογισμών.

Στο δεύτερο πείραμα διερευνάται η επίδραση του φορτίου ψύξης πάνω στην προσέγγιση υγρού βολβού, δηλαδή πάνω στη διαφορά της θερμοκρασίας υγρού βολβού του αέρα εισόδου T_2 από τη θερμοκρασία του νερού εξόδου T_6 . Αυτή η έννοια εισάγεται ως τρόπος έκφρασης της απόδοσης του πύργου. Όσο πιο κοντά στο 0 είναι, όσο δηλαδή η θερμοκρασία του νερού στην έξοδο ελαττώνεται και πλησιάζει τη θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα εισόδου, βελτιώνεται η απόδοση του πύργου. Υπενθυμίζεται, ότι εφόσον ο πύργος λειτουργεί σε αντιρροή, ο εισαγόμενος αέρας έρχεται σε επαφή με το νερό που εξέρχεται από τον πύργο. Γι' αυτό και επιλέγονται αυτές οι θερμοκρασίες. Σε κάθε άλλον τύπο διάταξης, η θερμοκρασία T_2 θα αντικατασταθεί από τη θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα που έρχεται σε επαφή με το νερό που εξέρχεται από τον πύργο.

Στο τρίτο πείραμα μελετάται η επίδραση που έχει η διαφορά πίεσης στο καπάκι της στήλης πάνω στην απόδοση της στήλης, εξεφρασμένης ως προσέγγιση υγρού βολβού.

Το τέταρτο πείραμα είναι ίδιο με το δεύτερο, με τη διαφορά ότι εδώ μελετάται η επίδραση της μεταβολής του φορτίου ψύξης πάνω στο εύρος ψύξης, ΔT_{range} . Έτσι ορίζεται η διαφορά της θερμοκρασίας εξόδου του νερού T_6 από τη θερμοκρασία εισόδου του νερού T_5 .

Το πέμπτο πείραμα αφορά τη συμπεριφορά της προσέγγισης υγρού βολβού, με τη χρήση διαφορετικών πληρωτικών υλικών.

Το έκτο πείραμα (το οποίο δε συμπεριλαμβάνεται στα προτεινόμενα πειράματα του εγχειριδίου) μελετά τη συμπεριφορά της προσέγγισης υγρού βολβού, του εύρους ψύξης και της πτώσης πίεσης καθ' ύψος της στήλης πληρωτικού υλικού, για διάφορες τιμές της παροχής μάζας νερού.

Οι δύο καινούργιες έννοιες που εισήχθησαν, δεν αποτελούν τίποτα άλλο από εκφράσεις απόδοσης και απαίτησης. Δηλαδή:

- Η προσέγγιση υγρού βολβού εκφράζει την απόδοση του πύργου ψύξης. Η απόδοση αυξάνεται, όσο η προσέγγιση πλησιάζει το 0.
- Το εύρος ψύξης εκφράζει την απαίτηση που έχει ο χειριστής από τον πύργο ψύξης. Μεγαλύτερο εύρος ψύξης συνεπάγεται υψηλές απαιτήσεις.

Σε κάθε επανάληψη του κάθε πειράματος, εφόσον μεταβάλλονταν οι παράμετροι, έπρεπε να προηγηθούν 20 – 30 λεπτά στα οποία το σύστημα θα ισορροπούσε στις καινούριες συνθήκες. Για το πρώτο πείραμα οι δοκιμές διήρκεσαν από μία ώρα με τις μετρήσεις να λαμβάνονται κάθε 5 λεπτά. Για εξοικονόμηση νερού, στα υπόλοιπα πειράματα οι δοκιμές διήρκεσαν 20 λεπτά εκάστη με τις μετρήσεις να λαμβάνονται κάθε 2 λεπτά.

4.1 Πρώτο πείραμα – Ισοζύγια μάζας & ενέργειας για διάφορες παροχές αέρα

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε 4 φορές στις 7 Ιουλίου 2023 και άλλη μία στις 11 Ιουλίου για έλεγχο συνέπειας. Η ισορροπία επαληθεύεται από το σταθερό ρυθμό πτώσης της στάθμης στη δεξαμενή αναπλήρωσης που κυμαινόταν μεταξύ των τιμών 20 και 25 χιλιοστών.

Στη διαδικασία του πειράματος παρέμεναν σταθερά το θερμικό φορτίο και η παροχή μάζας του νερού ενώ μεταβαλλόταν η παροχή μάζας του αέρα. Η παροχή μάζας του αέρα, ελέγχεται μέσω του damper που υπάρχει στον ανεμιστήρα. Η επιλογή συγκεκριμένων θέσεων του damper γίνεται με τη βοήθεια της διαφοράς πίεσης στο καπάκι της στήλης (Δp_{cap}) η οποία μετράται από το μανόμετρο. Για κάθε θέση του damper αντιστοιχεί και μία τιμή της Δp_{cap} , ενώ η εκάστοτε παροχή μάζας του αέρα υπολογίζεται από την εξίσωση 3.6.

Σταθερές παράμετροι: $Q_H = 0.5kW$, $\dot{m}_w = 40 g_w/s$

Μεταβλητές: $\Delta p_{cap} \in \{11.5, 10, 5, 0\}$ (σε $mm H_2O$)

Σκοπός του πειράματος είναι η επαλήθευση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας με βάση τις μετρήσεις που λαμβάνονται. Σε κάθε δοκιμή εφαρμόζονται τα ισοζύγια, ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του κάθε πειράματος που θα ακολουθήσει αργότερα. Είναι, ουσιαστικά, μια εισαγωγή για τα επόμενα πειράματα.

Οι παράμετροι και οι μετρήσεις καταγράφονται στον Πίνακα 4.1 (Σε πλάγια γραφή αναγράφονται οι παράμετροι που αλλάζουν ανά δοκιμή):

Πίνακας 4.1: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 1

Αριθμός δοκιμής	1	2	3	4	5
Πληρωτικό υλικό	A	A	A	A	A
Πυκνότητα πλήρωσης d (m^{-1})	77	77	77	77	77
Θερμοκρασία αέρα εισόδου ξηρού βολβού T_1 ($^{\circ}C$)	29.6	30	30.3	35.7	29.9
Θερμοκρασία αέρα εισόδου υγρού βολβού T_2 ($^{\circ}C$)	23.4	23.2	21.9	23.9	22.0
Θερμοκρασία αέρα εξόδου υγρού βολβού T_3 ($^{\circ}C$)	25.5	25.7	24.9	35.2	24.3
Θερμοκρασία αέρα εξόδου ξηρού βολβού T_4 ($^{\circ}C$)	27.3	27.5	27.3	37.9	26.5
Θερμοκρασία νερού εισόδου T_5 ($^{\circ}C$)	29.1	29.2	28.6	40.1	28.1
Θερμοκρασία νερού εξόδου T_6 ($^{\circ}C$)	25.7	25.9	25.3	37.4	24.8
Θερμοκρασία νερού αναπλήρωσης T_E ($^{\circ}C$)	29.5	29.8	30.1	31.7	31.0
Διαφορά πίεσης στο καπάκι Δp_{cap} ($mm\ H_2O$)	11.75	10	5	0	11.75
Ταχύτητα αέρα εξόδου $\bar{u}$ (m/s)	11.5	10.4	7.6	1.3	11.4
Παροχή νερού $\dot{m}_w$ (g_w/s)	40	40	40	40	40
Θερμικό φορτίο Q_H (kW)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Πτώση στάθμης h (mm)	260	261	252	169	286
Χρονικό διάστημα μετρήσεων Δt (s)	3600	3600	3600	3600	3600

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι στην τέταρτη δοκιμή, για να επιτευχθεί $\Delta p_{cap} = 0$, το dumper πρέπει να είναι πλήρως κλειστό, οπότε συμβαίνει υπερθέρμανση του ανεμιστήρα και συνεπώς όλου του συστήματος. Έτσι εξηγούνται και οι υψηλές θερμοκρασίες.

4.1.1 Πρώτη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.0643 \text{ kg}_{da}/s$

Οι θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού του αέρα στην είσοδο και την έξοδο της στήλης χρησιμοποιούνται για να βρεθούν οι ειδικές ενθαλπίες και οι ειδικοί όγκοι του υγρού αέρα μέσω του ψυχομετρικού πίνακα, ενώ από τους πίνακες ιδιοτήτων του νερού προσδιορίζεται η ειδική ενθαλπία για τη θερμοκρασία του νερού αναπλήρωσης:

$$\omega_A = 0.0157 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.02 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 69.9 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 78.5 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 123.6 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.878 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Με χρήση των μετρήσεων και των τιμών που λήφθηκαν από τα διαγράμματα και τους πίνακες, υπολογίζονται η ποσότητα νερού που εξατμίστηκε και η αντίστοιχη παροχή μάζας νερού, η παροχή μάζας ξηρού αέρα και, τέλος, τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 4.2:

Πίνακας 4.2: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 1

Μέγεθος	Τιμή
$\dot{m}_E$	$0.000278 \text{ kg}_w/s$
$\dot{m}_{da}$	$0.0643 \text{ kg}_{da}/s$
$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E$	$-8 \cdot 10^{-7} \text{ kg}_w/s$
$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E$	0.0123 kW

Το αρνητικό πρόσημο στο υπόλοιπο του ισοζυγίου μάζας (3^η σειρά) σημαίνει ότι στη στήλη συσσωρεύτηκε νερό. Αυτό είναι πολύ λογικό εφόσον ακόμα και μετά την απενεργοποίηση του συστήματος, υπήρχαν σταγόνες μέσα στη στήλη και πάνω στο πληρωτικό υλικό. Σε αριθμούς, αυτό σημαίνει ότι ενώ το νερό που διακινήθηκε καθ' όλην τη διάρκεια της δοκιμής ήταν:

$$0.04 \frac{\text{kg}_w}{s} \cdot 3600 \text{ s} = 144 \text{ kg}_w$$

Η μάζα του νερού που παρέμεινε στη στήλη είναι:

$$-8 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}_w}{s} \cdot 3600 \text{ s} = 0.00288 \text{ kg}_w = 2.88 \text{ g}_w$$

Έχοντας ως βάση την παροχή νερού στο σύστημα, το ποσοστό σφάλματος του υπολοίπου του ισοζυγίου μάζας είναι:

$$\frac{-8 \cdot 10^{-7} \text{ kg}_w/s}{0.04 \text{ kg}_w/s} = -0.002\%$$

Συνεπώς η μάζα που παρέμεινε είναι αμελητέα συγκριτικά με τη μάζα που διακινήθηκε.

Το θετικό πρόσημο στο υπόλοιπο του ισοζυγίου ενέργειας (4^η σειρά) σημαίνει, πάλι, ότι στη στήλη συσσωρεύτηκε ενέργεια. Κι αυτό είναι λογικό, εφόσον η ύπαρξη μάζας νερού στη στήλη συνεπάγεται ύπαρξη ενέργειας. Έχοντας ως βάση την προσδιδόμενη θερμότητα, το ποσοστό σφάλματος του υπολοίπου του ισοζυγίου ενέργειας είναι:

$$\frac{0.0123 \text{ kW}}{0.5 \text{ kW}} = 2.46\%$$

Όπως και στη μάζα, η ενέργεια που παρέμεινε στη στήλη είναι αμελητέα συγκριτικά με την ενέργεια που διακινήθηκε.

4.1.2 Δεύτερη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.0577 \text{ kg}_{da}/s$

Οι θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού του αέρα στην είσοδο και την έξοδο της στήλης χρησιμοποιούνται για να βρεθούν οι ειδικές ενθαλπίες και οι ειδικό όγκοι του υγρού αέρα μέσω του ψυχομετρικού πίνακα, ενώ από τους πίνακες ιδιοτήτων του νερού προσδιορίζεται η ειδική ενθαλπία για τη θερμοκρασία του νερού αναπλήρωσης:

$$\omega_A = 0.0154 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0203 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 69.5 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 79.4 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 124.9 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.879 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Με χρήση των μετρήσεων και των τιμών που λήφθηκαν από τα διαγράμματα και τους πίνακες, υπολογίζονται η ποσότητα νερού που εξατμίστηκε και η αντίστοιχη παροχή μάζας νερού, η παροχή μάζας ξηρού αέρα και, τέλος, τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 4.3:

Πίνακας 4.3: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 2

Μέγεθος	Τιμή
$\dot{m}_E$	0.000279 kg_w/s

$\dot{m}_{da}$	$0.0577 \text{ kg}_{da}/s$
$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E$	$1.87 \cdot 10^{-6} \text{ kg}_w/s$
$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E$	-0.0041 kW

Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται έλλειμμα μάζας και ενέργειας καθώς τα πρόσημα είναι αντίθετα από την προηγούμενη δοκιμή. Οι απώλειες που υπάρχουν εδώ μπορεί να οφείλονται σε τυχόν διαρροές ενέργειας από τους σωλήνες ή ανακρίβειες των θερμομέτρων. Σε κάθε περίπτωση, πάλι η μάζα και η ενέργεια που χάνεται, είναι αμελητέες συγκριτικά με τις προσδιδόμενες. Ποσοστά σφάλματος:

Μάζας: 0.67%

Ενέργειας: 0.82%

4.1.3 Τρίτη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.0423 \text{ kg}_{da}/s$

Οι θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού του αέρα στην είσοδο και την έξοδο της στήλης χρησιμοποιούνται για να βρεθούν οι ειδικές ενθαλπίες και οι ειδικοί όγκοι του υγρού αέρα μέσω του ψυχομετρικού πίνακα, ενώ από τους πίνακες ιδιοτήτων του νερού προσδιορίζεται η ειδική ενθαλπία για τη θερμοκρασία του νερού αναπλήρωσης:

$$\omega_A = 0.0132 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0191 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 64.2 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 77.4 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 126.2 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.877 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Με χρήση των μετρήσεων και των τιμών που λήφθηκαν από τα διαγράμματα και τους πίνακες, υπολογίζονται η ποσότητα νερού που εξατμίστηκε και η αντίστοιχη παροχή μάζας νερού, η παροχή μάζας ξηρού αέρα και, τέλος, τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 4.4:

Πίνακας 4.4: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 3

Μέγεθος	Τιμή
$\dot{m}_E$	$0.000269 \text{ kg}_w/s$
$\dot{m}_{da}$	$0.0423 \text{ kg}_{da}/s$

$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E$	$-2 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$
$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E$	0.0614 kW

Πάλι, όπως και στην πρώτη δοκιμή, υπάρχει συσσώρευση μάζας κι ενέργειας μέσα στη στήλη, η οποία είναι αμελητέα. Ποσοστά σφάλματος:

Μάζας: 7.5%

Ενέργειας: 12.2%

4.1.4 Τέταρτη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.00662 \text{ kg}_{da}/s$

Οι θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού του αέρα στην είσοδο και την έξοδο της στήλης χρησιμοποιούνται για να βρεθούν οι ειδικές ενθαλπίες και οι ειδικοί όγκοι του υγρού αέρα μέσω του ψυχομετρικού πίνακα, ενώ από τους πίνακες ιδιοτήτων του νερού προσδιορίζεται η ειδική ενθαλπία για τη θερμοκρασία του νερού αναπλήρωσης:

$$\omega_A = 0.0139 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0361 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 71.6 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 131 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 132.8 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.939 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Με χρήση των μετρήσεων και των τιμών που λήφθηκαν από τα διαγράμματα και τους πίνακες, υπολογίζονται η ποσότητα νερού που εξατμίστηκε και η αντίστοιχη παροχή μάζας νερού, η παροχή μάζας ξηρού αέρα και, τέλος, τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 4.5:

Πίνακας 4.5: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 4

Μέγεθος	Τιμή
$\dot{m}_E$	$0.000181 \text{ kg}_w/s$
$\dot{m}_{da}$	$0.00662 \text{ kg}_{da}/s$
$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E$	$-3.4 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$
$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E$	0.1802 kW

Αυτή η δοκιμή ίσως δεν έχει κάποιο πρακτικό νόημα, καθώς το damper που ρυθμίζει την παροχή αέρα στην είσοδο ήταν πλήρως κλειστό. Παρ' όλ' αυτά σημειώνεται η δοκιμή για

να εξηγηθεί η σημασία του λάθους που έχει το εγχειρίδιο όσον αφορά την εξίσωση υπολογισμού της παροχής μάζας ξηρού αέρα με βάση τη διαφορά πίεσης στο καπάκι της στήλης. Αν είχε ληφθεί υπόψιν η εξίσωση που προτείνει το εγχειρίδιο, τότε η $\dot{m}_{da}$ θα ήταν ίση με 0 (καθώς και η x είναι ίση με 0).

Παρ' όλ' αυτά γίνεται σαφές ότι ενώ η συσσωρευμένη μάζα νερού είναι αμελητέα η δε ενέργεια δεν είναι (το ποσοστό της συσσωρευμένης ενέργειας προς το θερμικό φορτίο ανέρχεται στα 36%). Η εξήγηση αυτού του μεγάλου σφάλματος είναι ότι επειδή υπάρχει περιορισμένη παροχή φρέσκου αέρα, ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας υπερθερμαίνεται και αυτό το φαινόμενο δεν μπορεί να αγνοηθεί. Έτσι εξηγείται και η περίεργη άνοδος της θερμοκρασίας ξηρού βολβού του αέρα εισόδου T_1 (ενώ οι μετρήσεις έγιναν την ίδια μέρα, η T_1 στην τρίτη δοκιμή ήταν 30.3 °C και στην τέταρτη δοκιμή ήταν 35.7 °C). Ποσοστά σφάλματος:

Μάζας: 18.1%

Ενέργειας: 36%

4.1.5 Επανάληψη πρώτης δοκιμής για επιβεβαίωση αποτελεσμάτων

Οι θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού του αέρα στην είσοδο και την έξοδο της στήλης χρησιμοποιούνται για να βρεθούν οι ειδικές ενθαλπίες και οι ειδικοί όγκοι του υγρού αέρα μέσω του ψυχομετρικού πίνακα, ενώ από τους πίνακες ιδιοτήτων του νερού προσδιορίζεται η ειδική ενθαλπία για τη θερμοκρασία του νερού αναπλήρωσης:

$$\omega_A = 0.0135 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 64.6 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 130 \text{ kJ/kg}_w$$

$$\omega_B = 0.0185 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_B = 73.8 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$v_B = 0.874 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Με χρήση των μετρήσεων και των τιμών που λήφθηκαν από τα διαγράμματα και τους πίνακες, υπολογίζονται η ποσότητα νερού που εξατμίστηκε και η αντίστοιχη παροχή μάζας νερού, η παροχή μάζας ξηρού αέρα και, τέλος, τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 4.6:

Πίνακας 4.6: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 5

Μέγεθος	Τιμή
$\dot{m}_E$	$0.000306 \text{ kg}_w/s$
$\dot{m}_{da}$	$0.0638 \text{ kg}_{da}/s$
$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E$	$1.4 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$
$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E$	-0.031 kW

Τα αποτελέσματα της πέμπτης δοκιμής θυμίζουν αυτά της δεύτερης. Πάλι υπάρχει έλλειμμα μάζας και ενέργειας το οποίο είναι, όπως και σε όλες τις άλλες δοκιμές, πολύ μικρό για να ληφθεί υπόψιν. Ποσοστά σφάλματος:

Μάζας: 4.59%

Ενέργειας: 6.2%

4.2 Δεύτερο πείραμα – Σχέση απόδοσης πύργου με το ψυκτικό φορτίο

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε 4 φορές στις 19 Ιουλίου 2023. Σε κάθε δοκιμή εξετάστηκε η συνέπεια των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας για επαλήθευση των μετρήσεων.

Στη διαδικασία του πειράματος παρέμεναν σταθερές η παροχή μάζας του αέρα (άρα και η διαφορά πίεσης στο καπάκι $-\Delta p_{cap}$) και του νερού ($\dot{m}_w$) ενώ μεταβαλλόταν το θερμικό φορτίο (Q_H).

Σταθερές παράμετροι: $\dot{m}_w = 0.04 \text{ kg}_w/s$, $\Delta p_{cap} = 11.5 \text{ mm H}_2\text{O}$

Μεταβλητές: $Q_H \in \{0, 0.5, 1.0, 1.5\}$ (σε $\text{mm H}_2\text{O}$)

Σκοπός του πειράματος είναι ο υπολογισμός της προσέγγισης υγρού βολβού για όλα τα επιβαλλόμενα θερμικά φορτία (υπενθυμίζεται ότι η προσέγγιση υγρού βολβού ορίζεται ως η διαφορά της θερμοκρασίας υγρού βολβού εισόδου του αέρα $-T_2$ – από τη θερμοκρασία εξόδου του νερού $-T_6$). Οι μετρήσεις του πειράματος παρουσιάζονται στον

Πίνακας 4.7 (όπως και στο προηγούμενο πείραμα, σημειώνονται με πλάγια γραφή οι μεταβλητές)

Πίνακας 4.7: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 2

Αριθμός δοκιμής	1	2	3	4
-----------------	---	---	---	---

Πληρωτικό υλικό	A	A	A	A
Πυκνότητα πλήρωσης d (m^{-1})	77	77	77	77
Θερμοκρασία αέρα εισόδου ξηρού βολβού T_1 ($^{\circ}C$)	31.1	30.4	31.8	32.0
Θερμοκρασία αέρα εισόδου υγρού βολβού T_2 ($^{\circ}C$)	24.2	23.6	24.9	25.2
Θερμοκρασία αέρα εξόδου υγρού βολβού T_3 ($^{\circ}C$)	24.6	25.8	28.4	30.3
Θερμοκρασία αέρα εξόδου ξηρού βολβού T_4 ($^{\circ}C$)	26.4	27.7	30.3	32.1
Θερμοκρασία νερού εισόδου T_5 ($^{\circ}C$)	25.1	29.2	34.0	38.2
Θερμοκρασία νερού εξόδου T_6 ($^{\circ}C$)	24.6	25.9	28.5	30.0
Θερμοκρασία νερού αναπλήρωσης T_E ($^{\circ}C$)	29.1	30	32.5	32.6
Διαφορά πίεσης στο καπάκι Δp_{cap} ($mm\ H_2O$)	11.75	11.75	11.75	11.75
Ταχύτητα αέρα εξόδου $\bar{u}$ (m/s)	11.1	11.3	11.2	10.8
Παροχή νερού $\dot{m}_w$ (g_w/s)	40	40	40	40
Θερμικό φορτίο Q_H (kW)	0	0.5	1.0	1.5
Πτώση στάθμης h (mm)	51	90	134	180
Χρονικό διάστημα μετρήσεων Δt (s)	1200	1200	1200	1200

4.2.1 Πρώτη δοκιμή – $Q_c = 0.1\ kW$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0164\ kg_w/kg_{da}$$

$$\omega_B = 0.0189\ kg_w/kg_{da}$$

$$h_A = 73.3\ kJ/kg_{da}$$

$$h_B = 74.6\ kJ/kg_{da}$$

$$h_E = 122\ kJ/kg_w$$

$$v_B = 0.874\ m^3/kg_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000164\ kg_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0622\ kg_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -1.1 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = -0.0063 \text{ kW}$$

$$\text{Προσέγγιση υγρού βολβού: } \Delta T_{app} = T_6 - T_2 = 0.4 \text{ } ^\circ C$$

4.2.2 Δεύτερη δοκιμή – $Q_C = 0.6 \text{ kW}$

Αυτή η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με μια διαφορετική διαδικασία. Εφόσον οι παράμετροι είναι ίδιες με αυτές της πρώτης δοκιμής του πρώτου πειράματος και οι περιβαλλοντικές συνθήκες δε διέφεραν πάρα πολύ μεταξύ των δύο ημερών, δεν έγινε έλεγχος στα ισοζύγια αλλά στην ταυτοποίηση των προσεγγίσεων υγρού βολβού. Αν δηλαδή οι προσέγγιση υγρού βολβού της 1^{ης} δοκιμής του 1^{ου} πειράματος είναι ίδια με αυτήν της παρούσας δοκιμής, τότε τα ισοζύγια θα ταυτίζονται κι αυτά. Το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου ήταν ότι οι προσεγγίσεις υγρού βολβού ταυτίζονται και είναι ίσες με:

$$\Delta T_{app} = 2.3 \text{ } ^\circ C$$

4.2.3 Τρίτη δοκιμή – $Q_C = 1.1 \text{ kW}$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.017 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0242 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 75.6 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 72.4 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 136.2 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.893 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.00043 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0617 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = 1.22 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.0028 \text{ kW}$$

$$\text{Προσέγγιση υγρού βολβού: } \Delta T_{app} = 3.6 \text{ } ^\circ C$$

4.2.4 Τέταρτη δοκιμή – $Q_C = 1.6 \text{ kW}$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0175 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.027 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 76.9 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 101.3 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 136.6 \text{ kJ/g}_w$$

$$v_B = 0.902 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000577 \text{ kg}_w/s$$

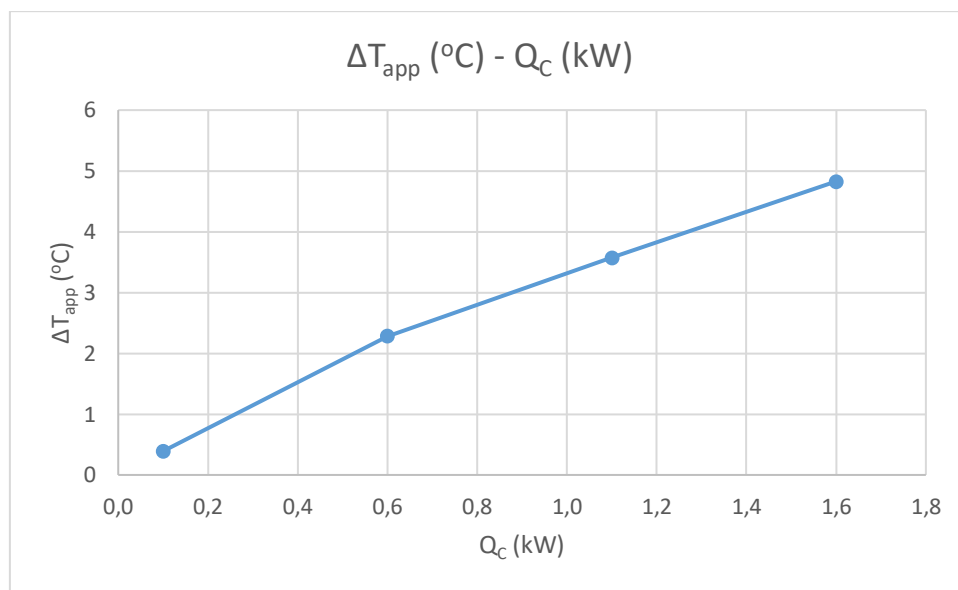
$$\dot{m}_{da} = 0.0586 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -2.19 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.0906 \text{ kW}$$

$$\text{Προσέγγιση υγρού βολβού: } \Delta T_{app} = 4.8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η προσέγγιση υγρού βολβού σε συνάρτηση με το ψυκτικό φορτίο (Q_c), το οποίο είναι το άθροισμα των τιμών του θερμικού φορτίου και της ισχύος της αντλίας νερού ($Q_H + P$).



Εικόνα 4.1: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει του ψυκτικού φορτίου

Διεξάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι η απόδοση του πύργου ψύξης μειώνεται με την αύξηση του προσδιδόμενου ψυκτικού (άρα και θερμικού) φορτίου. Το συμπέρασμα είναι αναμενόμενο καθώς όσο περισσότερη θερμότητα λαμβάνει το νερό, τόσο περισσότερη ψύξη πρέπει να υποστεί.

4.3 Τρίτο πείραμα – Σχέση απόδοσης πύργου με την παροχή αέρα

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε 4 φορές στις 20 Ιουλίου 2023 και άλλες 4 στις 21 Ιουλίου για έλεγχο συνέπειας. Κατά τη διάρκεια του πειράματος παρέμεναν σταθερά το θερμικό φορτίο και η παροχή μάζας του νερού ενώ μεταβαλλόταν η παροχή μάζας του αέρα. Ουσιαστικά η μόνη διαφορά αυτού του πειράματος με το πρώτο, είναι ότι εδώ σκοπός είναι

να μελετηθεί η συμπεριφορά της πτώσης πίεσης στο καπάκι της στήλης (Δp_{cap}) συναρτήσει της προσέγγισης υγρού βολβού (ΔT_{app}).

Σταθερές παράμετροι: $Q_H = 0.5 \text{ kW}$, $\dot{m}_w = 40 \text{ g}_w/s$

Μεταβλητές: $\Delta p_{cap} \in \{11.5, 8, 5, 1\}$ (σε $\text{mm H}_2\text{O}$)

Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται οι μετρήσεις του πειράματος.

Πίνακας 4.8: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 3

Αριθμός δοκιμής	1	2	3	4	5	6	7	8
Πληρωτικό υλικό	A	A	A	A	A	A	A	A
Πυκνότητα πλήρωσης $d \text{ (m}^{-1}\text{)}$	77	77	77	77	77	77	77	77
Θερμοκρασία αέρα εισόδου ξηρού βολβού $T_1 \text{ (}^\circ\text{C)}$	31.1	31.6	32.1	33.4	31.2	31.8	32.3	33.6
Θερμοκρασία αέρα εισόδου υγρού βολβού $T_2 \text{ (}^\circ\text{C)}$	23.5	23.7	24.0	24.4	24.3	24.7	25.1	25.5
Θερμοκρασία αέρα εξόδου υγρού βολβού $T_3 \text{ (}^\circ\text{C)}$	25.7	26.2	27.2	30.4	26.4	27.1	28	30.9
Θερμοκρασία αέρα εξόδου ξηρού βολβού $T_4 \text{ (}^\circ\text{C)}$	27.8	28.4	29.3	32.4	28.3	29.1	30	32.7
Θερμοκρασία νερού εισόδου $T_5 \text{ (}^\circ\text{C)}$	29.3	29.8	30.8	34.2	29.8	28.8	31.6	34.5
Θερμοκρασία νερού εξόδου $T_6 \text{ (}^\circ\text{C)}$	25.9	26.5	27.5	31.1	26.6	27.4	28.3	31.6
Θερμοκρασία νερού αναπλήρωσης $T_E \text{ (}^\circ\text{C)}$	31	30.2	30.7	32.5	29.9	32.3	31.8	32.8
Διαφορά πίεσης στο καπάκι $\Delta p_{cap} \text{ (mm H}_2\text{O)}$	11.5	8	5	1	11.5	8	5	1
Ταχύτητα αέρα εξόδου $\bar{u} \text{ (m/s)}$	11.4	9.4	7.4	3.4	11.4	9.2	7.2	3.7
Παροχή νερού $\dot{m}_w \text{ (g}_w/s\text{)}$	40	40	40	40	40	40	40	40
Θερμικό φορτίο $Q_H \text{ (kW)}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Πτώση στάθμης h (mm)	100	92	88	74	95	90	84	73
Χρονικό διάστημα μετρήσεων Δt (s)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Πτώση πίεσης καθ' ύψος στήλης με πληρωτικό υλικό Δp (mm H_2O)	4	2.8	1.9	0.4	3.9	2.5	1.7	0.4

4.3.1 Πρώτη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.0633 \text{ kg}_{da}/s$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0152 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0201 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 70.2 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 79.4 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 130 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.88 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.00032 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0633 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -8 \cdot 10^{-6} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = -0.0247 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$

4.3.2 Δεύτερη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.0519 \text{ kg}_{da}/s$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0153 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.021 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 71 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 82.2 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 126.6 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.883 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000295 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0519 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -2.05 \cdot 10^{-6} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = -0.0169 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 2.8 \text{ }^\circ\text{C}$

4.3.3 Τρίτη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.0408 \text{ kg}_{da}/s$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0157 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0223 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 72.5 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 86.4 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 128.7 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.887 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000282 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0408 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -1.4 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = -0.0039 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 3.4 \text{ }^\circ\text{C}$

4.3.4 Τέταρτη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.0185 \text{ kg}_{da}/s$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0157 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0273 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 73.9 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 102 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 136 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.903 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000237 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0185 \text{ kg}_{da}/s$$

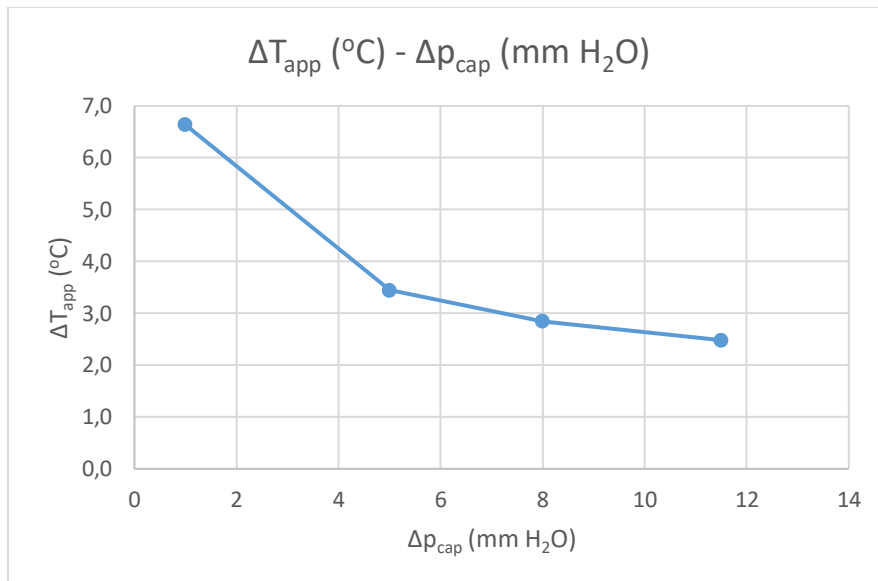
$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -2.4 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.042 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 6.6 \text{ }^\circ\text{C}$

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η προσέγγιση υγρού βολβού σε συνάρτηση με τη διαφορά πίεσης στο καπάκι. Όπως προαναφέρθηκε, η διαφορά πίεσης είναι πιο εύκολη να μετρηθεί και να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της παροχής μάζας, συνεπώς ορίστηκε αυτή ως η βάση των διαγραμμάτων. Αν στη θέση της διαφοράς πίεσης έμπαινε η ταχύτητα του αέρα, η διαφορά στα διαγράμματα θα ήταν μόνο ποσοτική, δηλαδή η καμπύλη θα

παρέμενε ίδια, ενώ θα άλλαζαν μόνο οι τιμές. Αυτό γίνεται καθώς όσο μειώνεται η διαφορά πίεσης στο καπάκι της στήλης, η ταχύτητα εξόδου του αέρα επίσης μειώνεται.



Εικόνα 4.2: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει της πτώσης πίεσης στο καπάκι της στήλης (πειράματα 20/7)

4.3.5 Επανάληψη πρώτης δοκιμής για επιβεβαίωση αποτελεσμάτων

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0165 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0212 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 73.6 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 82.7 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 125.3 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.883 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000305 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0632 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -7 \cdot 10^{-6} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = -0.0109 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 2.3 \text{ }^\circ\text{C}$

4.3.6 Επανάληψη δεύτερης δοκιμής για επιβεβαίωση αποτελεσμάτων

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0169 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0222 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 75.1 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 86 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 135.4 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.887 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000289 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.051 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -1.8 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.0093 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 2.6 \text{ } ^\circ\text{C}$

4.3.7 Επανάληψη τρίτης δοκιμής για επιβεβαίωση αποτελεσμάτων

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0172 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0235 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 76.4 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 90.1 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 133.3 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.891 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000269 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0398 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -1.8 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.0168 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 3.2 \text{ } ^\circ\text{C}$

4.3.8 Επανάληψη τέταρτης δοκιμής για επιβεβαίωση αποτελεσμάτων

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0173 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0281 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 78.2 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 105 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 137.4 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.905 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000234 \text{ kg}_w/s$$

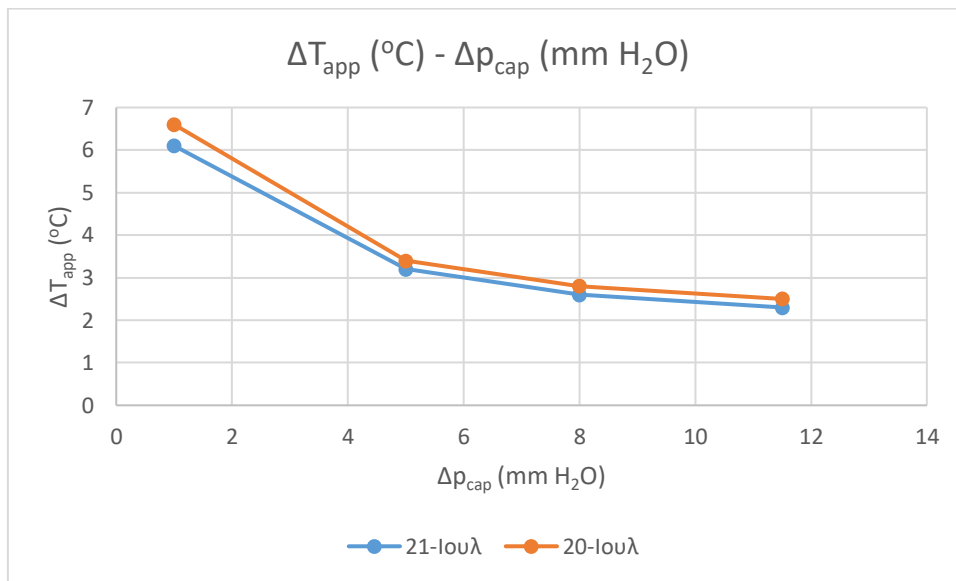
$$\dot{m}_{da} = 0.0198 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -2.1 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.042 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 6.1 \text{ } ^\circ\text{C}$

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η προσέγγιση υγρού βολβού σε συνάρτηση με τη διαφορά πίεσης στο καπάκι και για τις δύο ημέρες πειραμάτων (20 και 21 Ιουλίου).



Εικόνα 4.3: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει της πτώσης πίεσης στο καπάκι της στήλης

Και στο πρώτο σετ δοκιμών, αλλά και στο δεύτερο, διεξάγεται το ίδιο συμπέρασμα, καθώς η ποιοτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων στα διαγράμματα παραμένει ίδια, ενώ η ποσοτική απεικόνιση μεταβάλλεται ελάχιστα. Όσο μεγαλύτερη είναι η πτώση πίεσης στο καπάκι της στήλης, τόσο μικρότερη είναι η προσέγγιση στον υγρό βολβό. Με άλλα λόγια, όσο μεγαλύτερη παροχή αέρα επιτραπεί στο δίκτυο, η απόδοση του πύργου αυξάνεται. Ένα τέτοιο συμπέρασμα είναι αναμενόμενο, καθώς η ψύξη του νερού γίνεται πιο αποτελεσματική όταν παρέχεται πολύς και φρέσκος αέρας. Είναι προφανές δηλαδή, ότι ο πύργος λειτουργεί με τη βέλτιστη απόδοση, σε περιοχές υψηλής παροχής αέρα.

4.4 Τέταρτο πείραμα – Σχέση εύρους ψύξης νερού με το ψυκτικό φορτίο

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα με το 2^ο πείραμα καθώς ο σκοπός των δύο είναι παραπλήσιος: πρέπει να βρεθεί η σχέση του εύρους ψύξης με το ψυκτικό

φορτίο (Q_C). Υπενθυμίζεται ότι το εύρος ψύξης (ΔT_{range}) ορίζεται ως η διαφορά των θερμοκρασιών εισόδου (T_5) και εξόδου (T_6) του νερού. Συνεπώς, οι μετρήσεις και τα ισοζύγια ταυτίζονται.

4.4.1 Πρώτη δοκιμή – $Q_C = 0.1 \text{ kW}$

$$\Delta T_{range} = T_5 - T_6 = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.4.2 Δεύτερη δοκιμή – $Q_C = 0.6 \text{ kW}$

$$\Delta T_{range} = T_5 - T_6 = 3.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

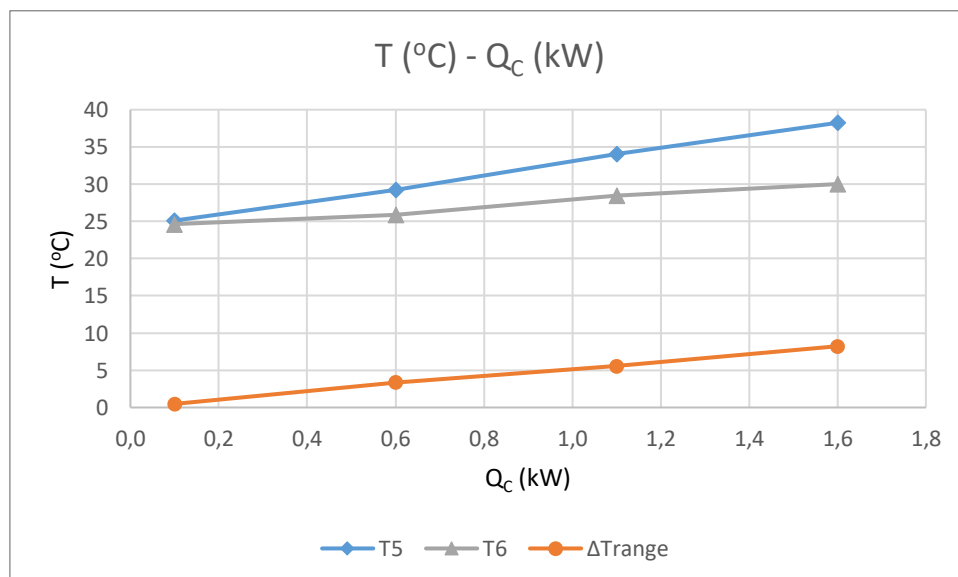
4.4.3 Τρίτη δοκιμή – $Q_C = 1.1 \text{ kW}$

$$\Delta T_{range} = T_5 - T_6 = 5.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.4.4 Τέταρτη δοκιμή – $Q_C = 1.6 \text{ kW}$

$$\Delta T_{range} = T_5 - T_6 = 8.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το εύρος ψύξης (πορτοκαλί καμπύλη) σε συνάρτηση με το ψυκτικό φορτίο (άξονας x, σε kW), το οποίο είναι το άθροισμα των τιμών του θερμικού φορτίου και της ισχύος της αντλίας νερού ($Q_C = Q_H + P$):



Εικόνα 4.4: Συμπεριφορά εύρους ψύξης συναρτήσει του ψυκτικού φορτίου

Το συμπέρασμα σε αυτήν την περίπτωση είναι προφανές: όσο πιο πολλή θερμότητα προσδίδεται στο νερό, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ψύξης, ή αλλιώς η απαίτηση. Κατά συνέπεια, αυξάνεται η θερμοκρασία εξόδου του νερού (T_6) το οποίο σημαίνει ότι ο πύργος δυσκολεύεται να εκτελέσει όλες τις διεργασίες έχοντας το ίδιο αποτέλεσμα. Αυτό έρχεται σε πλήρη παραλληλισμό με το συμπέρασμα του 2^{ου} πειράματος, όπου με την αύξηση του ψυκτικού φορτίου παρατηρήθηκε μείωση της προσέγγισης υγρού βολβού και κατά συνέπεια της απόδοσης του πύργου ψύξης.

Κεφάλαιο 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ: ΣΤΗΛΗ C

Σε αυτό το κεφάλαιο επαναλαμβάνονται τα 4 πειράματα που αναλύθηκαν στο προηγούμενο, έχοντας πλέον εγκαταστήσει τη στήλη C, με πυκνότητα πλήρωσης 220 m^{-1} . Επίσης, παρατίθενται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα από 2 ακόμα πειράματα που διεξήχθησαν.

Σε κάθε επανάληψη του κάθε πειράματος, εφόσον μεταβάλλονταν οι παράμετροι, έπρεπε να προηγηθούν 20 – 30 λεπτά στα οποία το σύστημα θα ισορροπούσε στις καινούριες συνθήκες. Για κάθε δοκιμή έγιναν μετρήσεις των 20 λεπτών, ανά 2 λεπτά.

5.1 Πρώτο πείραμα – Ισοζύγια μάζας & ενέργειας για διάφορες παροχές αέρα

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε 3 φορές στις 30 Οκτωβρίου 2023. Παρέμεναν σταθερά το θερμικό φορτίο και η παροχή μάζας του νερού ενώ μεταβαλλόταν η παροχή μάζας του αέρα. Η ισορροπία επαληθεύεται από το σταθερό ρυθμό πτώσης της στάθμης στη δεξαμενή αναπλήρωσης που κυμαινόταν μεταξύ των τιμών 7 και 10 χιλιοστών.

Σταθερές παράμετροι: $Q_H = 0.5 \text{ kW}$, $\dot{m}_w = 40 \text{ g}_w/\text{s}$

Μεταβλητές: $\Delta p_{cap} \in \{11.75, 10, 5\}$ (σε $\text{mm H}_2\text{O}$)

Οι παράμετροι, οι μεταβλητές και οι μετρήσεις καταγράφονται στον Πίνακας 5.1: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 1:

Πίνακας 5.1: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 1

Αριθμός δοκιμής	1	2	3
Πληρωτικό υλικό	C	C	C
Πυκνότητα πλήρωσης d (m^{-1})	220	220	220
Θερμοκρασία αέρα εισόδου ξηρού βολβού T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	23.8	24.1	24.5
Θερμοκρασία αέρα εισόδου υγρού βολβού T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	19.3	19.9	19.3
Θερμοκρασία αέρα εξόδου υγρού βολβού T_3 ($^{\circ}\text{C}$)	21.5	22	22.6
Θερμοκρασία αέρα εξόδου ξηρού βολβού T_4 ($^{\circ}\text{C}$)	22.4	23.2	23.7

Θερμοκρασία νερού εισόδου T_5 (°C)	24.4	25.2	25.6
Θερμοκρασία νερού εξόδου T_6 (°C)	21.2	22	22.5
Θερμοκρασία νερού αναπλήρωσης T_E (°C)	24.7	24.6	24.8
Διαφορά πίεσης στο καπάκι Δp_{cap} (mm H_2O)	11.75	10	5
Ταχύτητα αέρα εξόδου $\bar{u}$ (m/s)	11.9	11.1	7.6
Παροχή νερού $\dot{m}_w$ (g_w/s)	40	40	40
Θερμικό φορτίο Q_H (kW)	0.5	0.5	0.5
Πτώση στάθμης h (mm)	85	80	78
Χρονικό διάστημα μετρήσεων Δt (s)	1200	1200	1200
Πτώση πίεσης καθ' ύψος στήλης με πληρωτικό υλικό Δp (mm H_2O)			

5.1.1 Πρώτη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.0679 \text{ kg}_{da}/s$

Οι θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού του αέρα στην είσοδο και την έξοδο της στήλης χρησιμοποιούνται για να βρεθούν οι ειδικές ενθαλπίες και οι ειδικοί όγκοι του υγρού αέρα μέσω του ψυχομετρικού πίνακα, ενώ από τους πίνακες ιδιοτήτων του νερού προσδιορίζεται η ειδική ενθαλπία για τη θερμοκρασία του νερού αναπλήρωσης:

$$\omega_A = 0.0122 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 55.0 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 103.6 \text{ kJ/kg}_w$$

$$\omega_B = 0.0159 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_B = 62.9 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$v_B = 0.858 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Με χρήση των μετρήσεων και των τιμών που λήφθηκαν από τα διαγράμματα και τους πίνακες, υπολογίζονται η ποσότητα νερού που εξατμίστηκε και η αντίστοιχη παροχή μάζας νερού, η παροχή μάζας ξηρού αέρα και, τέλος, τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 5.2:

Πίνακας 5.2: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 1

Μέγεθος	Τιμή
$\dot{m}_E$	$0.000273 \text{ kg}_w/s$
$\dot{m}_{da}$	$0.0679 \text{ kg}_{da}/s$
$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E$	$-2.3 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$
$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E$	0.0349 kW

Παρατηρείται, όπως και στην περίπτωση της στήλης A, μια συσσώρευση μάζας και ενέργειας (υπενθυμίζεται ότι το αρνητικό πρόσημο στο υπόλοιπο μάζας και το θετικό στο υπόλοιπο ενέργειας, σημαίνει ότι παρέμεινε μάζα ή ενέργεια, αντίστοιχα, στη στήλη). Η ποσότητα μάζας και ενέργειας που συσσωρεύτηκε είναι πολύ μικρή συγκρινόμενη με αυτήν που διακινείται. Ποσοστά σφάλματος:

Μάζας: 0.056%

Ενέργειας: 6.98%

5.1.2 Δεύτερη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.063 \text{ kg}_{da}/s$

Οι θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού του αέρα στην είσοδο και την έξοδο της στήλης χρησιμοποιούνται για να βρεθούν οι ειδικές ενθαλπίες και οι ειδικοί όγκοι του υγρού αέρα μέσω του ψυχομετρικού πίνακα, ενώ από τους πίνακες ιδιοτήτων του νερού προσδιορίζεται η ειδική ενθαλπία για τη θερμοκρασία του νερού αναπλήρωσης:

$$\omega_A = 0.0128 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0164 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 56.9 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 65.2 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 103.2 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.862 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Με χρήση των μετρήσεων και των τιμών που λήφθηκαν από τα διαγράμματα και τους πίνακες, υπολογίζονται η ποσότητα νερού που εξατμίστηκε και η αντίστοιχη παροχή μάζας νερού, η παροχή μάζας ξηρού αέρα και, τέλος, τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 5.3:

Πίνακας 5.3: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 2

Μέγεθος	Τιμή
$\dot{m}_E$	$0.000257 \text{ kg}_w/s$
$\dot{m}_{da}$	$0.063 \text{ kg}_{da}/s$
$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E$	$-3 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$
$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E$	0.0554 kW

Το συμπέρασμα εδώ είναι ίδιο με αυτό της πρώτης δοκιμής. Ποσοστά σφάλματος:

Μάζας: ≈ 0

Ενέργειας: 11%

5.1.3 Τρίτη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.043 \text{ kg}_{da}/s$

Οι θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού του αέρα στην είσοδο και την έξοδο της στήλης χρησιμοποιούνται για να βρεθούν οι ειδικές ενθαλπίες και οι ειδικό όγκοι του υγρού αέρα μέσω του ψυχομετρικού πίνακα, ενώ από τους πίνακες ιδιοτήτων του νερού προσδιορίζεται η ειδική ενθαλπία για τη θερμοκρασία του νερού αναπλήρωσης:

$$\omega_A = 0.0119 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0171 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 55.0 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 67.4 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 104 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.864 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Με χρήση των μετρήσεων και των τιμών που λήφθηκαν από τα διαγράμματα και τους πίνακες, υπολογίζονται η ποσότητα νερού που εξατμίστηκε και η αντίστοιχη παροχή μάζας νερού, η παροχή μάζας ξηρού αέρα και, τέλος, τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 5.4:

Πίνακας 5.4: Φύλλο καταγραφής αποτελεσμάτων πειράματος 1, δοκιμής 3

Μέγεθος	Τιμή
$\dot{m}_E$	$0.00025 \text{ kg}_w/s$
$\dot{m}_{da}$	$0.043 \text{ kg}_{da}/s$
$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E$	$-2.6 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$

$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E$	0.0406 kW
---	-----------

Πάλι το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με των προηγούμενων δύο δοκιμών. Η ποσότητα μάζας και ενέργειας που συσσωρεύτηκε είναι πολύ μικρή συγκρινόμενη με αυτήν που διακινήθηκε. Επίσης, παρατηρείται η συγκράτηση των σταγονιδίων πάνω στο πληρωτικό υλικό, ακόμα και μετά το πείραμα. Ποσοστά σφάλματος:

Μάζας: ≈ 0

Ενέργειας: 8.1%

5.2 Δεύτερο πείραμα – Σχέση απόδοσης πύργου με το ψυκτικό φορτίο

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε 4 φορές την 1 Νοεμβρίου 2023. Παρέμεναν σταθερές η παροχή μάζας του αέρα (άρα και η διαφορά πίεσης στο καπάκι) και του νερού ενώ μεταβαλλόταν το θερμικό φορτίο. Έτσι, οι τιμές των σταθερών παραμέτρων ήταν:

Σταθερές παράμετροι: $\dot{m}_{da} = 0.04 \text{ kg}_w/s$, $\Delta p_{cap} = 11.5 \text{ mm H}_2\text{O}$

Μεταβλητές: $Q_H = \{0, 0.5, 1.0, 1.5\}$ (όλα σε kW)

Οι παράμετροι, οι μεταβλητές και οι μετρήσεις καταγράφονται στον Πίνακα 5.5:

Πίνακας 5.5: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 2

Αριθμός δοκιμής	1	2	3	4
Πληρωτικό υλικό	C	C	C	C
Πυκνότητα πλήρωσης d (m ⁻¹)	220	220	220	220
Θερμοκρασία αέρα εισόδου ξηρού βολβού T ₁ (°C)	23.7	24.1	24.5	24.6
Θερμοκρασία αέρα εισόδου υγρού βολβού T ₂ (°C)	19.6	19.3	19.2	19.5
Θερμοκρασία αέρα εξόδου υγρού βολβού T ₃ (°C)	19.4	21.4	22.7	24.7
Θερμοκρασία αέρα εξόδου ξηρού βολβού T ₄ (°C)	20	22.4	24.1	26.3
Θερμοκρασία νερού εισόδου T ₅ (°C)	20	24.5	28	31.7
Θερμοκρασία νερού εξόδου T ₆ (°C)	19.7	21.2	22.4	23.8
Θερμοκρασία νερού αναπλήρωσης T _E (°C)	23.5	25.5	24.8	25.3

Διαφορά πίεσης στο καπάκι $\Delta p_{cap} (mm H_2O)$	11.75	11.75	11.75	11.75
Ταχύτητα αέρα εξόδου $\bar{u} (m/s)$	11.9	11.8	12	12
Παροχή νερού $\dot{m}_w (g_w/s)$	40	40	40	40
Θερμικό φορτίο $Q_H (kW)$	0	0.5	1.0	1.5
Πτώση στάθμης $h (mm)$	42	91	128	170
Χρονικό διάστημα μετρήσεων $\Delta t (s)$	1200	1200	1200	1200

5.2.1 Πρώτη δοκιμή – $Q_C = 0.1 kW$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\begin{aligned}\omega_A &= 0.0126 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da} & \omega_B &= 0.0140 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da} \\ h_A &= 56 \text{ kJ/kg}_{da} & h_B &= 55.7 \text{ kJ/kg}_{da} \\ h_E &= 98.6 \text{ kJ/kg}_w & v_B &= 0.849 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}\end{aligned}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\begin{aligned}\dot{m}_E &= 0.000135 \text{ kg}_w/s \\ \dot{m}_{da} &= 0.0685 \text{ kg}_{da}/s \\ \dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E &= -3.8 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s \\ Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E &= 0.1019 \text{ kW}\end{aligned}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = T_6 - T_2 = 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$

5.2.2 Δεύτερη δοκιμή – $Q_C = 0.6 kW$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\begin{aligned}\omega_A &= 0.0121 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da} & \omega_B &= 0.0157 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da} \\ h_A &= 55.1 \text{ kJ/kg}_{da} & h_B &= 62.6 \text{ kJ/kg}_{da} \\ h_E &= 106.9 \text{ kJ/kg}_w & v_B &= 0.858 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}\end{aligned}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\begin{aligned}\dot{m}_E &= 0.000292 \text{ kg}_w/s \\ \dot{m}_{da} &= 0.0671 \text{ kg}_{da}/s \\ \dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E &= -4.7 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s \\ Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E &= -0.654 \text{ kW}\end{aligned}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = T_6 - T_2 = 1.9 \text{ }^\circ\text{C}$

5.2.3 Τρίτη δοκιμή – $Q_C = 1.1 \text{ kW}$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0118 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0171 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 54.7 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 67.8 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 104 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.865 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000411 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0678 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -4.9 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = -0.1668 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = T_6 - T_2 = 3.3 \text{ }^\circ\text{C}$

5.2.4 Τέταρτη δοκιμή – $Q_C = 1.6 \text{ kW}$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0123 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0191 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 55.9 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 75 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 106.1 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.874 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000545 \text{ kg}_w/s$$

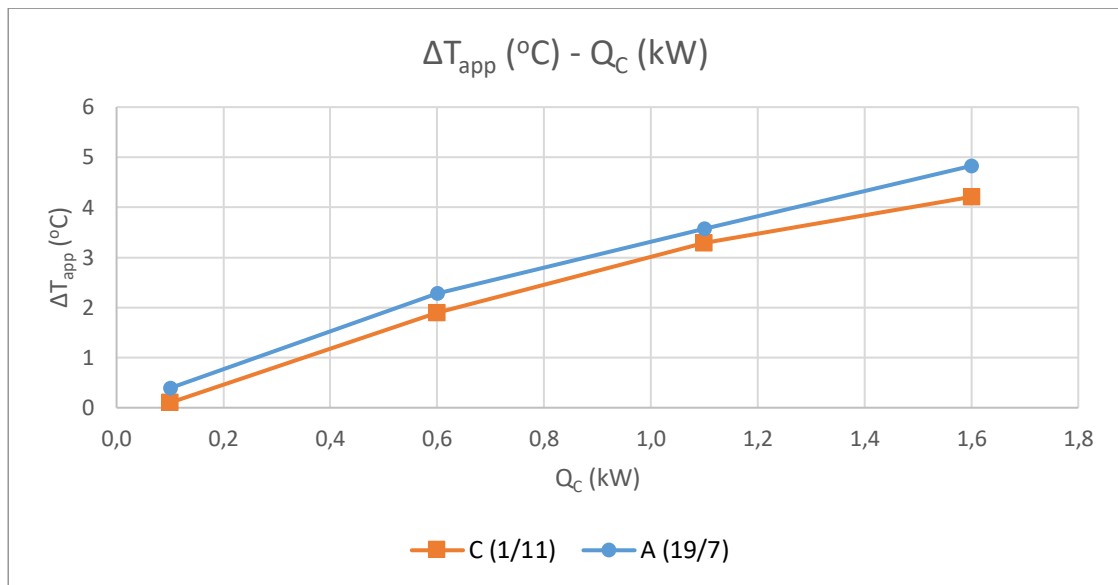
$$\dot{m}_{da} = 0.0674 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -8.6 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.2539 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = T_6 - T_2 = 4.2 \text{ }^\circ\text{C}$

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η προσέγγιση υγρού βολβού σε συνάρτηση με το ψυκτικό φορτίο, το οποίο είναι το άθροισμα των τιμών του θερμικού φορτίου και της ισχύος της αντλίας νερού ($Q_C = Q_H + P$). Η μπλε γραμμή περιγράφει τη λειτουργία της στήλης Α, ενώ η πορτοκαλί γραμμή περιγράφει τη λειτουργία της στήλης C.



Εικόνα 5.1: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει του ψυκτικού φορτίου

Όπως και στη στήλη Α, διεξάγεται το συμπέρασμα ότι η απόδοση του πύργου ψύξης μειώνεται με την αύξηση του προσδιδόμενου ψυκτικού (άρα και θερμικού) φορτίου. Το συμπέρασμα είναι αναμενόμενο καθώς όσο περισσότερη θερμότητα λαμβάνει το νερό, τόσο περισσότερη ψύξη πρέπει να υποστεί.

5.3 Τρίτο πείραμα – Σχέση πτώσης πίεσης καθ' ύψος της στήλης και απόδοσης πύργου με την παροχή αέρα

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε 2 φορές στις 30 και 31 Οκτωβρίου 2023. Παρέμεναν σταθερά το θερμικό φορτίο και η παροχή μάζας του νερού ενώ μεταβαλλόταν η παροχή μάζας του αέρα.

Σταθερές παράμετροι: $Q_H = 0.5 \text{ kW}$, $\dot{m}_w = 40 \text{ g}_w/\text{s}$

Μεταβλητές: $\Delta p_{cap} \in \{11.75, 8, 5, 1\}$ (όλα σε $\text{mm H}_2\text{O}$)

Οι δύο δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στις 30, είναι κοινές με αυτές του πρώτου πειράματος, οπότε θα παραληφθούν τα ισοζύγια για εκείνες τις περιπτώσεις. Η κάθε δοκιμή διαρκούσε 20 λεπτά και οι μετρήσεις, που παρουσιάζονται στον

Πίνακας 5.6, λαμβάνονταν κάθε 2 λεπτά. Όπως και στο δεύτερο πείραμα, έτσι κι εδώ υπολογίζονται τα ισοζύγια.

Πίνακας 5.6: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 3

Αριθμός δοκιμής	1	2	3	4
Πληρωτικό υλικό	C	C	C	C
Πυκνότητα πλήρωσης d (m^{-1})	220	220	220	220
Θερμοκρασία αέρα εισόδου ξηρού βολβού T_1 ($^{\circ}C$)	23.8	24.3	24.5	26.3
Θερμοκρασία αέρα εισόδου υγρού βολβού T_2 ($^{\circ}C$)	19.3	19.6	19.3	20.5
Θερμοκρασία αέρα εξόδου υγρού βολβού T_3 ($^{\circ}C$)	21.5	22.1	22.6	27.5
Θερμοκρασία αέρα εξόδου ξηρού βολβού T_4 ($^{\circ}C$)	22.4	23.3	23.7	29.1
Θερμοκρασία νερού εισόδου T_5 ($^{\circ}C$)	24.4	25.4	25.6	30.6
Θερμοκρασία νερού εξόδου T_6 ($^{\circ}C$)	21.2	22.1	22.5	27.5
Θερμοκρασία νερού αναπλήρωσης T_E ($^{\circ}C$)	24.7	24.4	24.8	25.8
Διαφορά πίεσης στο καπάκι Δp_{cap} ($mm\ H_2O$)	11.75	8	5	1
Ταχύτητα αέρα εξόδου $\bar{u}$ (m/s)	11.9	10.0	7.6	3.3
Παροχή νερού $\dot{m}_w$ (g_w/s)	40	40	40	40
Θερμικό φορτίο Q_H (kW)	0.5	0.5	0.5	0.5
Πτώση στάθμης h (mm)	85	79	78	67
Χρονικό διάστημα μετρήσεων Δt (s)	1200	1200	1200	1200
Πτώση πίεσης καθ' ύψος στήλης με πληρωτικό υλικό Δp ($mm\ H_2O$)	3.3	2.1	1.5	0.4

5.3.1 Πρώτη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.0679 \text{ kg}_{da}/s$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 1.9 \text{ } ^\circ C$

5.3.2 Δεύτερη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.0643 \text{ kg}_{da}/s$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0125 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0166 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 56.2 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 65.6 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 102.3 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.862 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000253 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0566 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -2.2 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.0452 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 2.5 \text{ } ^\circ C$

5.3.3 Τρίτη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.043 \text{ kg}_{da}/s$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 3.2 \text{ } ^\circ C$

5.3.4 Τέταρτη δοκιμή – $\dot{m}_{da} = 0.0179 \text{ kg}_{da}/s$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0128 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0231 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 59 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 88.3 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 108.2 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.888 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000215 \text{ kg}_w/s$$

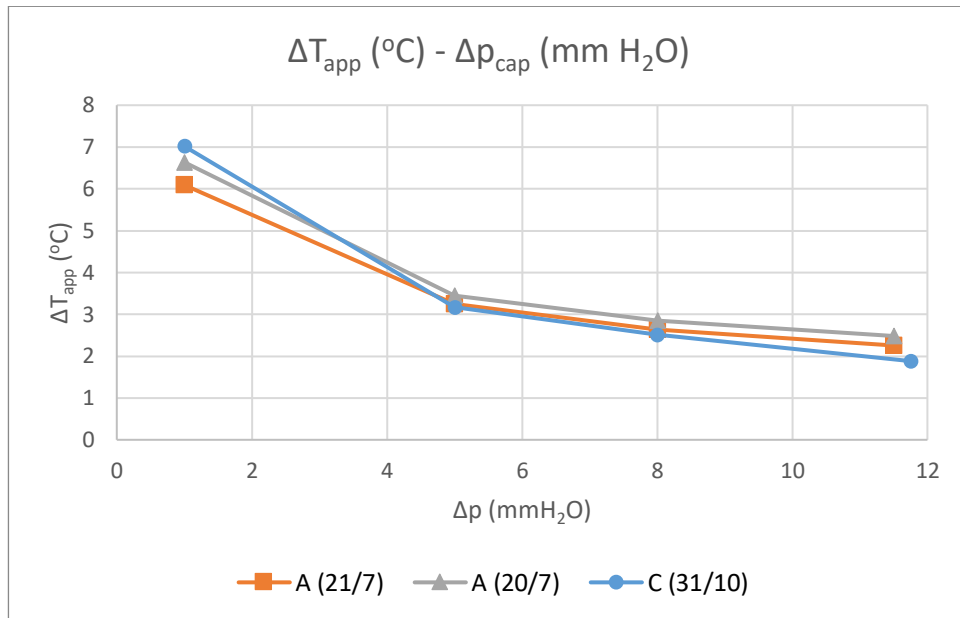
$$\dot{m}_{da} = 0.0179 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -2.9 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.0522 \text{ kW}$$

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = 7 \text{ } ^\circ C$

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η προσέγγιση υγρού βολβού σε συνάρτηση με τη διαφορά πίεσης στο καπάκι. Στις πορτοκαλί και γκρι καμπύλες περιγράφονται τα πειράματα της στήλης Α, ενώ στην μπλε περιγράφεται το πείραμα της στήλης C.



Εικόνα 5.2: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει της πτώσης πίεσης στο καπάκι της στήλης

Πάλι, όπως και με τη στήλη Α, η απόδοση του πύργου ψύξης αυξάνεται με την αύξηση της παροχής μάζας του αέρα.

5.4 Τέταρτο πείραμα – Σχέση εύρους ψύξης νερού με το ψυκτικό φορτίο

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα με το 2^ο πείραμα καθώς ο σκοπός των δύο είναι παραπλήσιος. Συνεπώς, οι μετρήσεις και τα ισοζύγια ταυτίζονται.

5.4.1 Πρώτη δοκιμή – $Q_c = 0.1 \text{ kW}$

$$\Delta T_{range} = T_5 - T_6 = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

5.4.2 Δεύτερη δοκιμή – $Q_c = 0.6 \text{ kW}$

$$\Delta T_{range} = T_5 - T_6 = 3.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

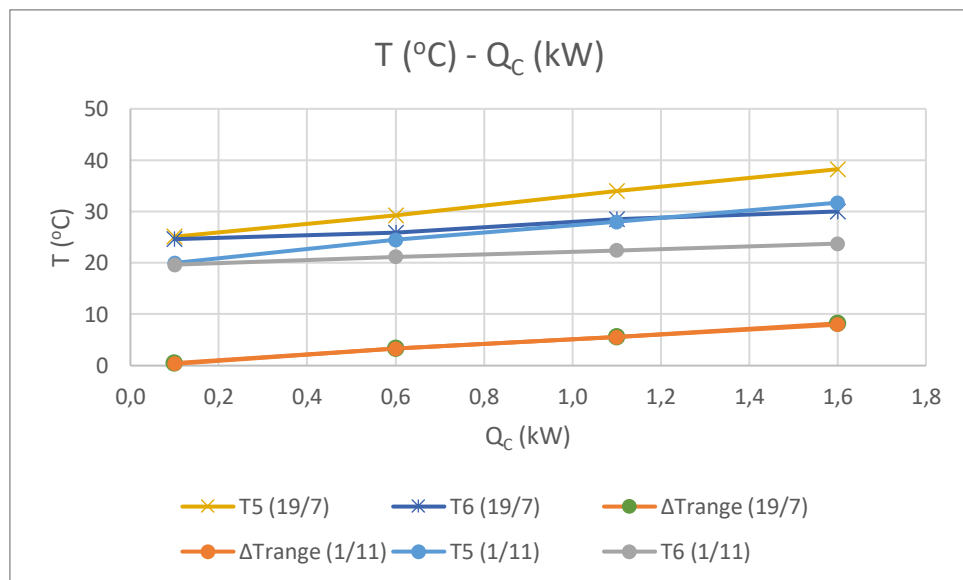
5.4.3 Τρίτη δοκιμή – $Q_c = 1.1 \text{ kW}$

$$\Delta T_{range} = T_5 - T_6 = 5.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

5.4.4 Τέταρτη δοκιμή – $Q_c = 1.6 \text{ kW}$

$$\Delta T_{range} = T_5 - T_6 = 8.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το εύρος ψύξης σε συνάρτηση με το ψυκτικό φορτίο (άξονας x, σε kW), το οποίο είναι το άθροισμα των τιμών του θερμικού φορτίου και της ισχύος της αντλίας νερού ($Q_H + P$). Ταυτόχρονα προστίθενται και τα αντίστοιχα στοιχεία του πειράματος στη στήλη Α, που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.4.



Εικόνα 5.3: Συμπεριφορά εύρους ψύξης συναρτήσει του ψυκτικού φορτίου

Πάλι το συμπέρασμα είναι ίδιο με αυτό που εξήλθε από το πείραμα της στήλης Α. Όσο πιο πολλή θερμότητα προσδίδεται στο νερό, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ψύξης, ή αλλιώς η απαίτηση. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται η θερμοκρασία επιστροφής του νερού (T_6) οπότε η λειτουργία του πύργου είναι λιγότερο αποδοτική. Επίσης, όπως και στον πύργο Α, έτσι κι εδώ το συμπέρασμα του πειράματος παραλληλίζεται με αυτό του 2^{ου} πειράματος, όπου με την αύξηση του ψυκτικού φορτίου μειωνόταν και η προσέγγιση υγρού βολβού άρα και η απόδοση του πύργου ψύξης.

5.5 Πέμπτο πείραμα – Επίδραση πληρωτικού υλικού στην απόδοση του πύργου

Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιούνται μετρήσεις οι οποίες πάρθηκαν από τρεις διαφορετικές στήλες πληρωτικού υλικού. Η μέτρηση του πύργου Α έγινε στις 20 Ιουλίου 2023, του πύργου C έγινε στις 31 Οκτωβρίου 2023 και του πύργου Β έγινε στις 3 Νοεμβρίου 2023. Παρέμεναν σταθερά το θερμικό φορτίο, η παροχή μάζας του νερού και η παροχή μάζας του αέρα. Η ισορροπία επαληθεύεται από το σταθερό ρυθμό πτώσης της στάθμης στη δεξαμενή αναπλήρωσης που κυμαινόταν μεταξύ των τιμών 7 και 12 χιλιοστών.

Σταθερές παράμετροι: $Q = 0.5 \text{ kW}$, $\dot{m}_w = 40 \text{ g}_w/\text{s}$, $\Delta p_{cap} = 11.75 \text{ mm H}_2\text{O}$

Μεταβλητές: πυκνότητα πλήρωσης $d = \{77, 110, 220\} \text{ (m}^{-1}\text{)}$

Στον Πίνακα 5.7 καταγράφονται οι μετρήσεις του πειράματος:

Πίνακας 5.7: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 5

Αριθμός δοκιμής	1	2	3
Πληρωτικό υλικό	A	B	C
Πυκνότητα πλήρωσης $d \text{ (m}^{-1}\text{)}$	77	110	220
Θερμοκρασία αέρα εισόδου ξηρού βολβού $T_1 \text{ (}^\circ\text{C)}$	31.1	23.9	23.9
Θερμοκρασία αέρα εισόδου υγρού βολβού $T_2 \text{ (}^\circ\text{C)}$	23.5	19.3	19.3
Θερμοκρασία αέρα εξόδου υγρού βολβού $T_3 \text{ (}^\circ\text{C)}$	25.7	21.4	21.4
Θερμοκρασία αέρα εξόδου ξηρού βολβού $T_4 \text{ (}^\circ\text{C)}$	27.8	22.9	22.9
Θερμοκρασία νερού εισόδου $T_5 \text{ (}^\circ\text{C)}$	29.3	25.6	25.6
Θερμοκρασία νερού εξόδου $T_6 \text{ (}^\circ\text{C)}$	25.9	21.7	22.4
Θερμοκρασία νερού αναπλήρωσης $T_E \text{ (}^\circ\text{C)}$	31	23.5	23.5
Διαφορά πίεσης στο καπάκι $\Delta p_{cap} \text{ (mm H}_2\text{O)}$	11.75	11.75	11.75
Ταχύτητα αέρα εξόδου $\bar{u} \text{ (m/s)}$	11.4	12	12
Παροχή νερού $\dot{m}_w \text{ (g}_w/\text{s)}$	40	40	40

Θερμικό φορτίο Q_H (kW)	0.5	0.5	0.5
Πτώση στάθμης h (mm)	100	83	80
Χρονικό διάστημα μετρήσεων Δt (s)	1200	1200	1200
Πτώση πίεσης καθ' ύψος στήλης με πληρωτικό υλικό Δp (mm H_2O)	4	3.1	3.3

Επειδή οι μετρήσεις των στηλών Α και C είναι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα πειράματα, παραλείπεται η εφαρμογή των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας.

5.5.1 Πρώτη δοκιμή – Α

Πύργος ψύξης με πληρωτικό υλικό τύπου Α ($d_A = 77 \text{ m}^{-1}$):

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = T_6 - T_2 = 2.5 \text{ } ^\circ C$

5.5.2 Δεύτερη δοκιμή – Β

Πύργος ψύξης με πληρωτικό υλικό τύπου Β ($d_B = 110 \text{ m}^{-1}$):

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0122 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0157 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 55.0 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 62.9 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 98.6 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 98.6 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000266 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0683 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -2.8 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.0364 \text{ kW}$$

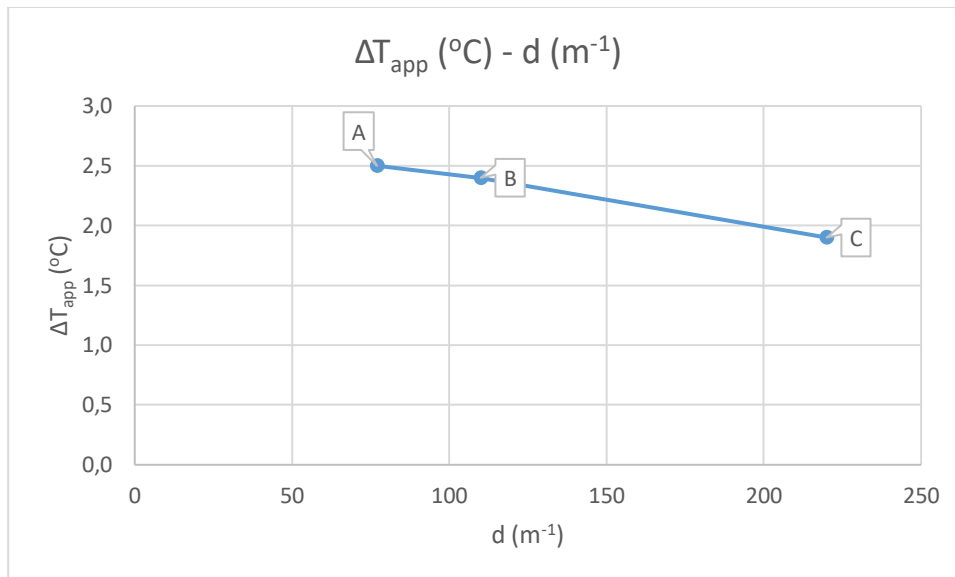
Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = T_6 - T_2 = 3.1 \text{ } ^\circ C$

5.5.3 Τρίτη δοκιμή – C

Πύργος ψύξης με πληρωτικό υλικό τύπου C ($d_C = 220 \text{ m}^{-1}$):

Προσέγγιση υγρού βολβού: $\Delta T_{app} = T_6 - T_2 = 1.9 \text{ } ^\circ C$

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η προσέγγιση υγρού βολβού σε συνάρτηση με την πυκνότητα πλέγματος στήλης, η οποία είναι ο λόγος της επιφάνειας προς τον όγκο του πληρωτικού υλικού (d).



Εικόνα 5.4: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει της πυκνότητας πλέγματος στήλης

Από το διάγραμμα, διεξάγεται το πόρισμα ότι η απόδοση του πύργου ψύξης αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας πλέγματος του πληρωτικού υλικού.

5.6 Έκτο πείραμα – Μεταβολή παροχής νερού

Το τελευταίο πείραμα, δεν ανήκει στα προτεινόμενα του εγχειριδίου. Είναι μια πρόταση – ιδέα για περαιτέρω έρευνα. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής, μελετήθηκε η συμπεριφορά του πύργου ψύξης με τις παραμέτρους παροχής μάζας αέρα και θερμικού φορτίου να μεταβάλλονται. Τι συμβαίνει, όμως, αν αυτές οι παράμετροι είναι σταθερές και αυτό που μεταβάλλεται είναι η παροχή μάζας νερού; Σε αυτό το ερώτημα έρχεται να απαντήσει αυτό το πείραμα.

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε 3 φορές στις 3 Νοεμβρίου 2023. Παρέμεναν σταθερά το θερμικό φορτίο και η παροχή μάζας του αέρα ενώ μεταβαλλόταν η παροχή μάζας του νερού. Δηλαδή:

Σταθερές παράμετροι: $Q_H = 0.5 \text{ kW}$, $\Delta p_{cap} = 11.75 \text{ mm H}_2\text{O}$,

Μεταβλητές: $\dot{m}_w \in \{20, 40, 50\}$ (όλα σε g_w/s)

Οι παράμετροι και οι μετρήσεις καταγράφονται στον Πίνακα 5.8:

Πίνακας 5.8: Φύλλο καταγραφής μετρήσεων πειράματος 6

Αριθμός δοκιμής	1	2	3
Πληρωτικό υλικό	C	C	C
Πυκνότητα πλήρωσης d (m^{-1})	220	220	220
Θερμοκρασία αέρα εισόδου ξηρού βολβού T_1 ($^{\circ}C$)	23.4	23.8	23.6
Θερμοκρασία αέρα εισόδου υγρού βολβού T_2 ($^{\circ}C$)	19.3	19.3	19.2
Θερμοκρασία αέρα εξόδου υγρού βολβού T_3 ($^{\circ}C$)	21.4	21.5	21.5
Θερμοκρασία αέρα εξόδου ξηρού βολβού T_4 ($^{\circ}C$)	22.2	22.4	21.9
Θερμοκρασία νερού εισόδου T_5 ($^{\circ}C$)	23.5	24.4	27.1
Θερμοκρασία νερού εξόδου T_6 ($^{\circ}C$)	21.2	21.2	20.5
Θερμοκρασία νερού αναπλήρωσης T_E ($^{\circ}C$)	24.1	24.7	23.5
Διαφορά πίεσης στο καπάκι Δp_{cap} ($mm\ H_2O$)	11.75	11.75	11.75
Ταχύτητα αέρα εξόδου $\bar{u}$ (m/s)	12	11.9	11.5
Παροχή νερού $\dot{m}_w$ (g_w/s)	50	40	20
Θερμικό φορτίο Q_H (kW)	0.5	0.5	0.5
Πτώση στάθμης h (mm)	85	85	82
Χρονικό διάστημα μετρήσεων Δt (s)	1200	1200	1200
Πτώση πίεσης καθ' ύψος στήλης με πληρωτικό υλικό Δp ($mm\ H_2O$)	3.1	3.3	3.4

5.6.1 Πρώτη δοκιμή – $\dot{m}_w = 50\ g_w/s$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0125\ kg_w/kg_{da}$$

$$\omega_B = 0.0158\ kg_w/kg_{da}$$

$$h_A = 55.3\ kJ/kg_{da}$$

$$h_B = 62.6\ kJ/kg_{da}$$

$$h_E = 101.1\ kJ/kg_w$$

$$v_B = 0.858\ m^3/kg_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000273 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0686 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -4.2 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.0732 \text{ kW}$$

$$\text{Προσέγγιση υγρού βολβού: } \Delta T_{app} = T_6 - T_2 = 1.91 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Εύρος ψύξης: } \Delta T_{range} = T_5 - T_6 = 2.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

5.6.2 Δεύτερη δοκιμή – $\dot{m}_w = 40 \text{ g}_w/s$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0122 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0159 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 55 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 62.9 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 103.6 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.858 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000273 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0679 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -2.3 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.0349 \text{ kW}$$

$$\text{Προσέγγιση υγρού βολβού: } \Delta T_{app} = T_6 - T_2 = 1.88 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Εύρος ψύξης: } \Delta T_{range} = T_5 - T_6 = 3.2 \text{ }^\circ\text{C}$$

5.6.3 Τρίτη δοκιμή – $\dot{m}_w = 20 \text{ g}_w/s$

Από τους πίνακες εντοπίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$\omega_A = 0.0123 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$\omega_B = 0.0163 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

$$h_A = 55 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_B = 63.3 \text{ kJ/kg}_{da}$$

$$h_E = 98.6 \text{ kJ/kg}_w$$

$$v_B = 0.857 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

Από τις εξισώσεις 3.2, 3.6, 3.9 και 3.10 υπολογίζονται τα υπόλοιπα:

$$\dot{m}_E = 0.000263 \text{ kg}_w/s$$

$$\dot{m}_{da} = 0.0658 \text{ kg}_{da}/s$$

$$\dot{m}_{da}(\omega_B - \omega_A) - \dot{m}_E = -1.7 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_w/s$$

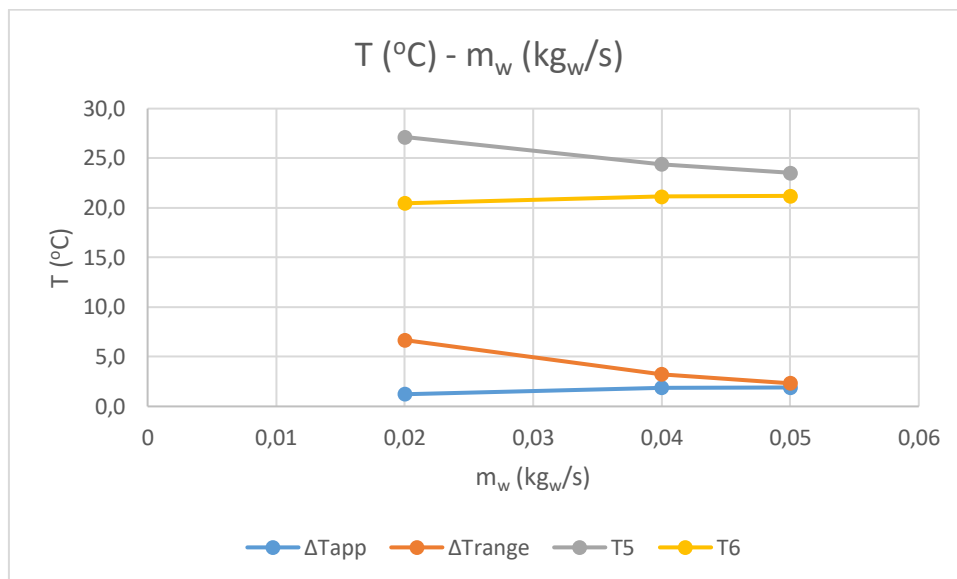
$$Q_H - P - \dot{m}_{da}(h_B - h_A) + \dot{m}_E h_E = 0.0261 \text{ kW}$$

$$\text{Προσέγγιση υγρού βολβού: } \Delta T_{app} = T_6 - T_2 = 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Εύρος ψύξης: } \Delta T_{range} = T_5 - T_6 = 6.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Στα παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η συμπεριφορά όλων όσων μελετήθηκαν στα προηγούμενα πειράματα συναρτήσει της παροχής μάζας νερού. Συγκεκριμένα:

- Προσέγγιση υγρού βολβού – ένδειξη της απόδοσης της διεργασίας (Εικόνα 5.5)
- Εύρος ψύξης – εύρος απαιτητικότητας της διεργασίας (Εικόνα 5.5)



Εικόνα 5.5: Συμπεριφορά προσέγγισης υγρού βολβού και εύρους ψύξης συναρτήσει της παροχής μάζας νερού

Τα συμπεράσματα που διεξάγονται από το διάγραμμα είναι ότι με την αύξηση της παροχής μάζας του νερού:

- Η προσέγγιση υγρού βολβού αυξάνεται ελαφρώς
- Το εύρος ψύξης μειώνεται σημαντικά

Ενώ το εύρος ψύξης παρουσιάζει σημαντική μείωση κατά την αύξηση της παροχής μάζας του νερού, αυτό δε σημαίνει ότι η θερμοκρασία εξόδου του νερού, στην περίπτωση του μικρότερου εύρους ψύξης, είναι μεγαλύτερη ή λιγότερο βολική απ' ότι στις άλλες δύο. Στην πραγματικότητα, συνεπάγεται ότι για κάθε μία από τις παροχές του νερού, οι οποίες επιφέρουν στο θερμαινόμενο νερό διαφορετική αύξηση της θερμοκρασίας, ο πύργος ψύξης είναι ικανός να φέρει το νερό σε θερμοκρασία η οποία είναι περίπου ίδια για όλες τις περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται στην παροχή μάζας αέρα, ο οποίος είναι άφθονος για να ψύξει το νερό.

Συνεπώς, το τελευταίο αυτό πείραμα αποδεικνύει ότι ο εργαστηριακός πύργος ψύξης μπορεί να λειτουργήσει με διαφορετικές παροχές μάζας νερού με περίπου την ίδια απόδοση (μικρή μεταβολή προσέγγισης υγρού βολβού), φέροντας το ίδιο αποτέλεσμα (μεγάλη μεταβολή εύρους ψύξης με κοινή τιμή τελικής θερμοκρασίας). Εν κατακλείδι, η παροχή μάζας νερού δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη λειτουργία του πύργου ψύξης για τη συγκεκριμένη παροχή μάζας αέρα.

6.1 Η αξία των πειραμάτων στη θεωρητική κατάρτιση

Ο πρωταρχικός στόχος της εργασίας είναι ο προκαταρκτικός έλεγχος του πειραματικού πύργου ψύξης ώστε να ενταχθεί στο μέλλον στα πλαίσια της εκπαίδευσης των φοιτητών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών στο μάθημα της Θερμοδυναμικής 1. Κατά τη χρήση του πύργου ψύξης γίνονται κατανοητές βασικές έννοιες του μαθήματος, όπως υγρός και ξηρός αέρας, πώς μετράται η υγρασία αλλά και τί σημαίνει κορεσμός του ατμού. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η μετάβαση του υγρού νερού προς την αέρια κατάσταση δε γίνεται ακαριαία, αλλά περιλαμβάνει σταδιακή ύγρανση του αέρα, μέχρις ότου ο τελευταίος κορεστεί σε υγρασία, οπότε δεν μπορεί να εξατμιστεί περισσότερο νερό.

Επίσης, οι φοιτητές θα έρθουν σε άμεση επαφή με προβλήματα που αφορούν την ειδική ενθαλπία του νερού, καθώς μέσα σε όλες τις πράξεις απαιτείται ο εντοπισμός από πίνακες, της ειδικής ενθαλπίας του νερού αναπληρώσεως. Μαζί με την ενθαλπία έρχεται και το ισοζύγιο ενέργειας, το οποίο είναι ένας από του βασικούς στόχους του μαθήματος της Θερμοδυναμικής 1. Το πρώτο πείραμα, που μελετάει την ισχύ των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας για διάφορες παροχές αέρα, δίνει στους φοιτητές την ευκαιρία να εφαρμόσουν τη θεωρία του 1^{ου} Θερμοδυναμικού Νόμου, με την έκφραση του ισοζυγίου ενέργειας, σε πραγματικές συνθήκες με τιμές παρμένες από το εργαστήριο. Γίνεται, έτσι, εύκολα αντιληπτό ότι η ενέργεια δε χάνεται, ούτε δημιουργείται, χωρίς να δοθεί κάποια εξήγηση. Παραδείγματος χάριν, η ενέργεια που συσσωρεύτηκε στο εσωτερικό της στήλης εκφράστηκε με ένα υπόλοιπο στο ισοζύγιο. Συνεπώς, κάθε φυσικό φαινόμενο έχει και τη μαθηματική του εξήγηση.

Στο δεύτερο πείραμα οι φοιτητές αντιλαμβάνονται πώς η μεταβολή του θερμικού καθήκοντος μιας διεργασίας επηρεάζει την απόδοσή της. Έτσι, έρχονται σε επαφή με μία άλλη βασική έννοια του μαθήματος, αλλά και της επιστήμης γενικότερα, του μηχανολόγου. Είθισται η απόδοση να εκφράζεται με ποσοστά, αλλά δεν αυτό δεν είναι απαραίτητο. Στο πείραμα αυτό, η απόδοση εκφράζεται συγκριτικά με τη βέλτιστη τιμή, η οποία είναι η μηδενική. Έτσι, εισέρχεται ο/η φοιτητής/τρια στη λογική της αύξησης της απόδοσης.

Στο τρίτο πείραμα, όπου μελετάται η συμπεριφορά της προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει της παροχής μάζας αέρα, οι φοιτητές μπορούν να αντιληφθούν τις επιπτώσεις

που έχει η μεταβολή της παροχής αέρα στην ενεργειακή απόδοση του πύργου. Η προσέγγιση υγρού βολβού εκφράζει την απόκλιση από τη βέλτιστη λειτουργία του πύργου.

Στο τέταρτο πείραμα οι φοιτητές κατανοούν την έννοια της απαίτησης μιας διεργασίας, καθώς παρατηρούν τη μεταβολή του εύρους ψύξης. Στην προκειμένη περίπτωση μελετάται η θερμοκρασιακή διαφορά που μπορεί να επιτευχθεί με το κάθε θερμικό φορτίο.

Στο πέμπτο πείραμα γίνεται η εναλλαγή του πληρωτικού υλικού, όπου οι φοιτητές θα καταλάβουν την επιρροή που έχει αυτό στη διεργασία και συγκεκριμένα στην προσέγγιση υγρού βολβού. Το πληρωτικό υλικό είναι έννοια που συζητείται στο μάθημα των φυσικών διεργασιών, αλλά μπορούν οι φοιτητές να καταλάβουν σε αυτό στάδιο, ότι δίνοντας περισσότερη επιφάνεια επαφής μεταξύ νερού και αέρα επιτυγχάνεται καλύτερη μετάδοση θερμότητας, άρα και η απόδοση της διεργασίας βελτιώνεται.

Το έκτο πείραμα, η μελέτη των ιδιοτήτων για τις διάφορες παροχές νερού, δεν προσφέρει κάποια παραπάνω γνώση από αυτές που προσφέρουν τα προηγούμενα 5 πειράματα, αλλά μπορεί κανείς μελετώντας το να συμπεράνει ότι δεν επηρεάζουν όλες οι παράμετροι, με τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας, μια διεργασία.

6.2 Εκτενέστερος κατάλογος βασικών γνώσεων για μηχανικούς

Τα εκπαιδευτικά κέρδη από τον εργαστηριακό πύργο ψύξης είναι πολλά και δεν περιορίζονται μόνο στο μάθημα της θερμοδυναμικής 1. Οι φοιτητές έχουν την ευκαιρία να δουν με πολύ απλό τρόπο πώς ο αέρας υγραίνεται και τι σχέση έχει αυτό με τη θερμοκρασία του, ώστε ο ψυχομετρικός χάρτης να αποκτήσει πρακτικό νόημα παράλληλο με το θεωρητικό των διαλέξεων. Ταυτόχρονα με την ύγρανση του αέρα, οι φοιτητές μπορούν να αντιληφθούν πώς η υγρασία και η θερμοκρασία επηρεάζουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης και πώς αυτό εκφράζεται σε αριθμούς με μονάδες μέτρησης. Ακόμα μπορούν να κατανοήσουν πρακτικά το μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας μέσω εξάτμισης, γνώσεις που δεν προσφέρει το μάθημα της θερμοδυναμικής 1.

Τέλος, ευαισθητοποιείται στο ζωτικό θέμα εξοικονόμησης του νερού, καθώς αυτό, μαζί με την υψηλή απόδοση και ασφάλεια, είναι το κύριο μέλημα όσων ασχολούνται με το σχεδιασμό βιομηχανικών πύργων ψύξης. Συνεπώς, ο εργαστηριακός πύργος ψύξης δίνει την ευκαιρία στο φοιτητή να γνωρίσει εκ των έσω τις βασικές αρχές που διέπουν τα περισσότερα μαθήματα του τομέα Ενέργειας, Βιομηχανικών Διεργασιών & Αντιρρυπαντικής Τεχνολογίας. Η θερμοδυναμική, η μηχανική ρευστών, η μετάδοση θερμότητας και μάζας, οι φυσικές διεργασίες, ο κλιματισμός είναι μαθήματα των οποίων η θεωρητική διδασκαλία θα

σημειώσει σημαντική βελτίωση αν γίνει ταυτόχρονα με τη βιωματική εμπειρία του εργαστηρίου.

7.1 Σύνοψη πειραμάτων

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο εργαστηριακός πύργος ψύξης και πώς αυτός συμπεριφέρεται στα πειράματα που διεξήχθησαν. Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται σύνοψη πάνω στα αποτελέσματα των πειραμάτων καθώς και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο πρώτο πείραμα εξετάστηκε η συνέπεια των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας. Τα αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα, με τα ποσοστιαία σφάλματα να είναι ως επί των πλείστων κοντά στο 0. Για όλες τις αποκλίσεις που προκύπτουν, δίνεται η εξήγηση ότι ένα πείραμα με πραγματικές μετρήσεις δεν μπορεί να ακολουθήσει με απόλυτη ακρίβεια τους νόμους των μαθηματικών και της θερμοδυναμικής. Φυσικά, πιο εξειδικευμένη εξήγηση δίνεται σε κάθε πείραμα. Συνεπώς, ο εργαστηριακός πύργος ψύξης μπορεί να λειτουργήσει υπακούοντας τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής αλλά και το νόμο διατήρησης της μάζας.

Στο δεύτερο πείραμα μελετήθηκε η επίδραση του ψυκτικού φορτίου πάνω στην προσέγγιση υγρού βολβού. Υπενθυμίζεται ότι το ψυκτικό φορτίο είναι το άθροισμα των τιμών θερμικού φορτίου και ισχύος της αντλίας νερού, ενώ η προσέγγιση υγρού βολβού είναι η διαφορά της θερμοκρασίας υγρού βολβού εισόδου του αέρα (T_2) από τη θερμοκρασία εισόδου του νερού (T_6). Από τα αποτελέσματα μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι όσο αυξάνεται το ψυκτικό φορτίο, τόσο αυξάνεται η προσέγγιση του υγρού βολβού. Αυτό συνεπάγεται τη μείωση της απόδοσης του πύργου ψύξης καθώς στόχος του είναι η ελαχιστοποίηση της προσέγγισης υγρού βολβού. Αυτό το συμπέρασμα είναι το αναμενόμενο καθώς και μόνο από τη διαίσθηση, η απόδοση μιας διεργασίας μειώνεται όσο αυξάνεται το ενεργειακό καθήκον της.

Στο τρίτο πείραμα μελετήθηκε η επίδραση της ταχύτητας του αέρα, η οποία εκφράζεται με τη διαφορά πίεσης στο καπάκι της στήλης, πάνω στην προσέγγιση υγρού βολβού. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο η διαφορά πίεσης στο καπάκι της στήλης (άρα και η ταχύτητα του αέρα) μειώνεται, η προσέγγιση υγρού βολβού αυξάνεται. Άρα, το πρώτο συμπέρασμα που λαμβάνεται είναι ότι η απόδοση του πύργου ψύξης διατηρείται υψηλή όσο η ταχύτητα, και κατ' επέκταση η παροχή μάζας, αέρα παραμένει υψηλή· κάτι που είναι απολύτως φυσιολογικό καθώς με την υψηλή ταχύτητα φρέσκου αέρα υπάρχει περισσότερη

μεταφορά θερμότητας με αποτέλεσμα η θερμοκρασία εξόδου του νερού να μειώνεται πιο πολύ και να πλησιάζει τη θερμοκρασία υγρού βολβού εισόδου του αέρα.

Στο τέταρτο πείραμα μετρήθηκε το εύρος ψύξης συναρτήσει του ψυκτικού φορτίου. Υπενθυμίζεται ότι το εύρος ψύξης είναι η διαφορά των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του νερού. Εξάγεται, λοιπόν, το αναμενόμενο συμπέρασμα ότι με την αύξηση του ψυκτικού φορτίου, αυξάνεται και το εύρος ψύξης. Δηλαδή, όταν στη βιομηχανία απαιτηθεί να ψυχθεί μια επιφάνεια ή μια διεργασία με νερό, όσο αυξάνεται ενέργεια που απαγάγει το νερό τόσο θα αυξάνεται η διαφορά της θερμοκρασίας που θα επιχειρεί να πετύχει ο πύργος ψύξης. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνονται οι απαιτήσεις.

Στο πέμπτο πείραμα παρατηρήθηκε η συμπεριφορά της προσέγγισης υγρού βολβού συναρτήσει του πληρωτικού υλικού. Το συμπέρασμα που διεξήχθη είναι ότι όσο αυξάνεται η επιφάνεια του πληρωτικού υλικού, αυξάνεται και η προσέγγιση υγρού βολβού. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς με την αύξηση της επιφάνειας επαφής μεταξύ νερού κι αέρα υπάρχει περισσότερη συναγωγή θερμότητας αλλά και εξάτμιση νερού. Σημαντική παρατήρηση σε αυτό το πείραμα είναι ότι οι τρεις στήλες που διατίθενται στο εργαστήριο έχουν πληρωτικό υλικό διαφορετικής πυκνότητας πλήρωσης το καθένα, αλλά και διαφορετικού υλικού, το οποίο επηρεάζει τη μεταφορά ενέργειας και μάζας.

Στο έκτο πείραμα μελετήθηκε η συμπεριφορά της προσέγγισης υγρού βολβού και του εύρους ψύξης για τρεις διαφορετικές τιμές της παροχής μάζας νερού. Όπως εξηγήθηκε, ο μόνος όρος που παρουσιάζει ουσιαστική διαφορά, είναι το εύρος ψύξης. Στο τέλος, παρατηρήθηκε ότι ο πύργος ψύξης είναι ικανός να λειτουργήσει με σχεδόν σταθερή απόδοση και ασφάλεια σε όλες τις παροχές μάζας νερού που εφαρμόστηκαν.

7.2 Προτάσεις

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκαν στοιχεία του H893 Bench Top Cooling Tower τα οποία χρειάζονται βελτίωση. Για να μπορέσει, όμως, ο οποιοσδήποτε επιστήμονας να χειρίζεται αυτόν τον πύργο με τρόπο αποδοτικό και εργονομικό, προτείνονται μερικές διαφοροποιήσεις στις μεθόδους που παραθέτει το εγχειρίδιο χρήσης:

- Στη λήξη κάθε περιόδου μιας δοκιμής ενός πειράματος, μαζί με τις θερμοκρασίες, ο χρήστης πρέπει να μετρά με χάρακα την πτώση της στάθμης του νερού στη δεξαμενή αναπλήρωσης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αφενός η μέτρηση του απολεσθέντος νερού στο τέλος του πειράματος,

αφετέρου ο έλεγχος θερμοδυναμικής ισορροπίας του νερού κατά τη διάρκεια του πειράματος, η οποία επαληθεύεται από τη σταθερή πτώση της στάθμης.

- Ο υπολογισμός της παροχής μάζας αέρα να γίνεται με τη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα στο καπάκι της στήλης χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.6, ή ακόμα πιο απλά με τη χρήση της εξίσωσης 3.8, η οποία δεν απαιτεί μέτρηση της ταχύτητας του αέρα. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ πιο αξιόπιστη από εκείνην που προτείνει το εγχειρίδιο.

Η εργασία αυτή, όπως αναφέρθηκε, αποτελεί συνέχεια της εργασίας του φοιτητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, Λεμονιά Αντωνίου. Παρ' όλ' αυτά, ανοίγει καινούρια πεδία τα οποία δύναται να ερευνηθούν, όπως:

- Πειραματική μελέτη με χρήση πληρωτικού υλικού φτιαγμένου στο εργαστήριο. Ο/Η φοιτητής/τρια θα μπορούσε να κατασκευάσει πληρωτικά υλικά και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τα να μελετήσει τη συμπεριφορά του πύργου. Η μορφή και η δομή του πληρωτικού υλικού περιορίζεται από τη φαντασία του ερευνητή. Μια πολύ ενδιαφέρουσα μελέτη θα γινόταν αν σε μια άδεια στήλη μπορούσε να κατασκευαστεί διάταξη που να μοντελοποιεί τον πύργο ξηρής ψύξης ή ακόμα και τον πύργο υβριδικής ψύξης. Εφόσον δεν υπάρχει διαθέσιμη άδεια στήλη στο εργαστήριο, μπορεί να αποσυναρμολογηθεί μία από τις υπάρχουσες Α, Β, C στήλες.
- Μελέτη των φαινομένων μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα στις πλάκες του πληρωτικού υλικού. Στην παρούσα εργασία, η στήλη με το πληρωτικό υλικό μελετήθηκε ως ένα μαύρο κουτί, του οποίου το ενδιαφέρον περιορίστηκε στην είσοδο και στην έξοδο. Προτείνεται η μελέτη της μεταφοράς ενέργειας και μάζας πάνω στην πλάκα, η οποία έρχεται σε επαφή με 2 στρώματα ρευστού. Με αυτήν τη μελέτη, μπορεί να σχεδιαστεί το βέλτιστο πληρωτικό υλικό.
- Περεταίρω βιβλιογραφική έρευνα πάνω στις τεχνικές ψύξης, κλιματισμού και εξαερισμού των αρχαίων λαών. Σε αυτήν την εργασία μελετήθηκε σε μικρό βαθμό η αρχιτεκτονική των badgir και των qanat. Υπάρχουν, όμως, κι άλλες τεχνικές των λαών της Μέσης Ανατολής όπως τα ab anbar και τα yakhchal που αναφέρθηκαν, αλλά και τεχνικές που χρησιμοποιούσαν άλλοι λαοί της ερήμου, όπως οι Κινέζοι.

- [1] A. Λεμονιάς, «Μελέτη και διερεύνηση λειτουργίας εργαστηριακού πύργου ψύξης,» Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2015.
- [2] B. Μποντόζογλου, σε *Εισαγωγή στις Φυσικές Διεργασίες: Θεωρητικό Υπόβαθρο και Βασικές Εφαρμογές*, Βόλος, Κάλλιπος (ΣΕΑΒ), 2015.
- [3] ASHRAE, "Psychrometrics," in *ASHRAE Handbook*, 2017.
- [4] Y. Cengel και M. Boles, *Θερμοδυναμική για Μηχανικούς*, 8η έκδοση επιμ., Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2016.
- [5] A. Azami, «Badgir in traditional Iranian architecture,» σε *Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment*, Santorini, Greece, 2005.
- [6] D. Stouhi, «What is a Traditional Windcatcher?,» 3 November 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.archdaily.com/971216/what-is-a-traditional-windcatcher>.
- [7] D. J. Mildrexler, M. Zhao και S. W. Running, «Where are the hottest spots on Earth?,» *Eos*, τόμ. 87, αρ. 43, pp. 461-467, 24 October 2006.
- [8] G. Soltani, A. Nazari και N. Ghanavati, «Energy Management in Iranian Maintanable Ancient Archtiecture, "Introducing Ice Houses and Cisterns in Yazd City",» *Canadian Journal on Environmental, Costruction and Civil Engineering*, τόμ. 3, αρ. 4, pp. 173-178, May 2012.
- [9] P. K. Sangdeh και N. Nasrollahi, «Windcatchers and their applications in contemporary architecture,» *Energy and Built Environment*, τόμ. 3, αρ. 1, January 2022.
- [10] A. Mehdipour και A. Namazian, «Yakhchal; Climate Responsive Persian Traditional Architecture,» σε *2nd International Conference on Environmental Science and Biotechnology*, Singapore, 2012.
- [11] F. Afshari και H. Dehghanpour, «A Review Study On Cooling Towers; Types, Performance and Application,» Alanya Alaaddin Keykubat University, Alanya, 2019.

- [12] F. K. T. van Iterson και G. Kuypers, «Cooling tower of reinforced concrete». United States of America Ευρεσιτεχνία 1343832, 15 June 1920.
- [13] «NY Hospitals Install Cooling Towers To Prevent Legionnaires' Disease,» DELTA Cooling Towers, Inc., 28 May 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://deltacooling.com/resources/news/ny-hospitals-install-cooling-towers-to-prevent-legionnaires-disease>.
- [14] W. L. McCabe, J. C. Smith και P. Harriott, Βασικές Διεργασίες Χημικής Μηχανικής, 7η έκδοση επιμ., Ι. Κ. Κούκος, Επιμ., Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2021.
- [15] Σ. Δερμενάκης, «Μελέτη Εγκατάστασης Υβριδικού Συγκεντρωτικού Ηλιακού Θερμικού Σταθμού (PT CSP Plant / ISCC) στην Δυτική Μακεδονία: Σύγκριση Τεχνολογιών και Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων,» Καστοριά, 2018.
- [16] Μ. Α. Ιωαννίδου, «Υπολογιστική Μέθοδος Θερμικού Σχεδιασμού Ψυκτικών Πύργων,» Αθήνα, 2011.
- [17] N. Belyakov, «Sustainable Power Generation,» N. Belyakov, Επιμ., Academic Press, 2019, pp. 201-243.
- [18] «EVAPCO,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.evapco.com/dry-cooling-101>.
- [19] S. Shinde και N. Gulhane, «Experimental study on the performance of wet cooling towers using different packing materials,» *Materials Today: Proceedings*, τόμ. 72, αρ. 3, pp. 1811-1816, 19 October 2022.
- [20] N. Milosavljevic και P. Heikkila, «A comprehensive approach to cooling tower design,» PERGAMON, Turku, 2000.
- [21] «What you must know about cooling tower fill media,» Tower Tech Cooling Systems PVT.LTD., 20 May 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.towertechindia.com/blog/what-you-must-know-about-cooling-tower-fill-media/>.
- [22] A.-m. El-Shorbagy, «Design with Nature: Windcatcher as a Paradigm of Natural Ventilation Device in Buildings,» *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, τόμ. 10, αρ. 3, June 2010.

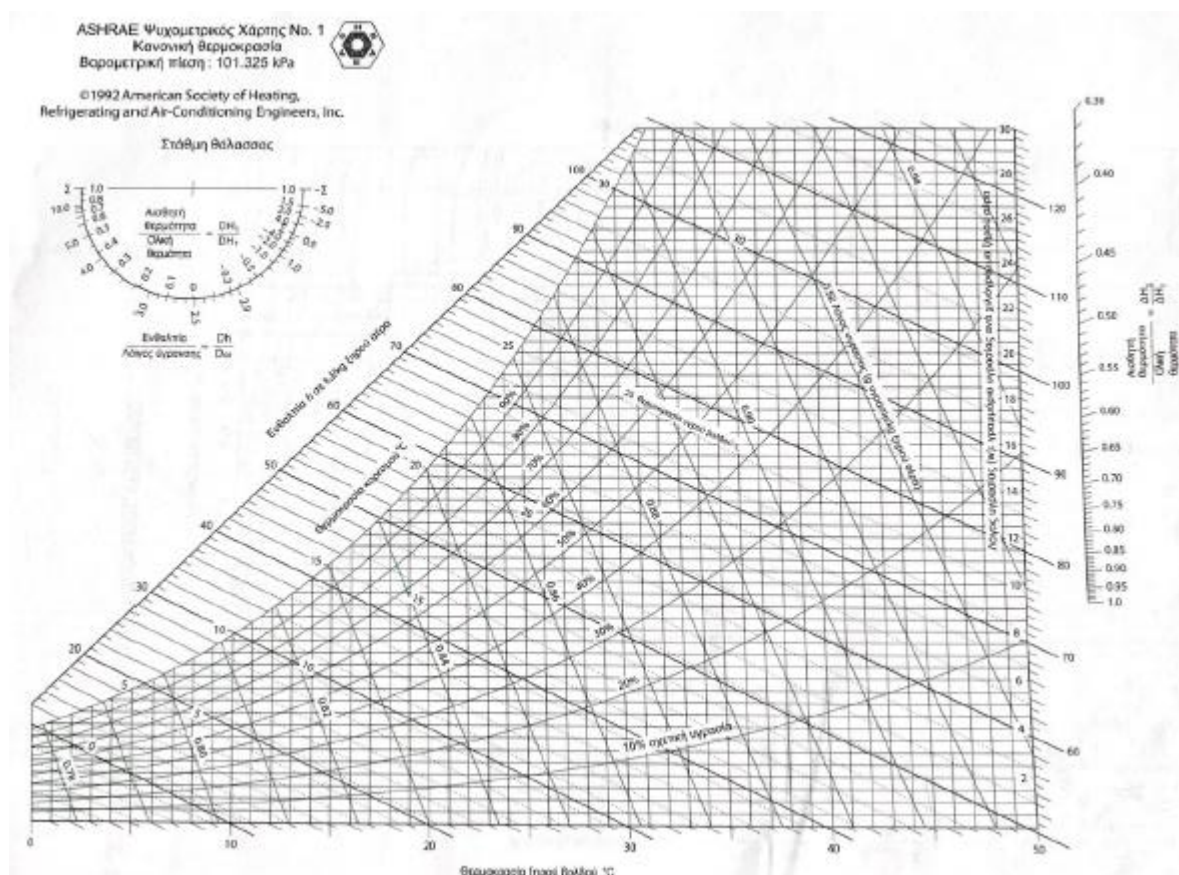
- [23] Κ. Γ. Πασπαλάς, Εναλλάκτες Θερμότητας, 2η έκδοση επιμ., Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
- [24] «V-Bar Filler,» CENK, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.cenk.com.tr/product-detail/121/v-bar-filler>.
- [25] M. N. Bahadori, «Passive Cooling Systems in Iranian Architecture,» σε *Renewable Energy*, 1st επιμ., B. Sorensen, Επιμ., London, England: Routledge, 2011, pp. 144-154.
- [26] «Ο πρώτος καπνός από τον πύργο ψύξης της νέας λιγνιτικής μονάδας Πτολεμαίδα V είναι γεγονός – Ξεκίνησαν οι δοκιμές,» 19 Ιανουάριος 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://kozan.gr/archives/386402>.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω παρατίθενται εργαλεία που μπορούν να βοηθήσουν στους υπολογισμούς που απαιτούν τα πειράματα. Παρ' όλο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεμονωμένες μελέτες, στην περίπτωση όπου ο επιστήμονας θέλει να κάνει πολλά πειράματα θα πρέπει να αναπτύξει δικό του κώδικα υπολογισμού των ιδιοτήτων ή να ανατρέξει σε έτοιμους που υπάρχουν στο διαδίκτυο. Ακόμα, παρατίθενται οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των μεγεθών αντί του ψυχομετρικού χάρτη.

Περιεχόμενα Παραρτήματος

Π - 1: Ψυχομετρικός χάρτης στο μηδενικό υψόμετρο (Cengel και Boles)	75
Π - 2: Ιδιότητες κορεσμένου νερού (Cengel και Boles)	76



Π - 1: Ψυχομετρικός χάρτης στο μηδενικό υψόμετρο [4]

Κορεσμένο νερό-Πίνακας θερμοκρασιών

Θερμότητα, $T^{\circ}\text{C}$	Κορ. πίεση P_{sat} kPa	Ειδικός όγκος, m^3/kg		Εσωτερική ενέργεια, kJ/kg			Ενθαλπία, kJ/kg		
		Κορ. υγρό v_f	Κορ. ατμός v_g	Κορ. υγρό u_f	Εξατμ. u_{fg}	Κορ. ατμός u_g	Κορ. υγρό h_f	Εξατμ. h_{fg}	Κορ. ατμός h_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3

Π - 2: Ιδιότητες κορεσμένου νερού [4]

Γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού, μπορεί να υπολογιστεί η κορεσμένη απόλυτη υγρασία (η υγρασία που θα είχε ο αέρας αν η θερμοκρασία ξηρού βολβού ήταν ίδια με αυτήν του υγρού βολβού):

$$\omega_{\text{sat}} = \frac{P_{\text{sat}}(T_{\text{wb}})}{P_{\text{atm}} - P_{\text{sat}}(T_{\text{wb}})} \cdot \frac{M_A}{M_B} \quad \text{Π.1}$$

Όπου:

ω_{sat} : απόλυτη υγρασία κορεσμένου αέρα [$\text{kg}_w/\text{kg}_{da}$]

$P_{\text{sat}}(T_{\text{wb}})$: τάση ατμών στη θερμοκρασία υγρού βολβού [Pa]

P_{atm} : ατμοσφαιρική πίεση [Pa]

M_A : μοριακό βάρος νερού/υδρατμού [kg_w/kmol]

M_B : μοριακό βάρος ξηρού αέρα [$\text{kg}_{da}/\text{kmol}$]

Ύστερα, υπολογίζεται η υγρασία στην πραγματική κατάσταση, με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$\omega = \frac{(2501 - 2.326T_{\text{wb}})\omega_{\text{sat}} - 1.006(T_{\text{db}} - T_{\text{wb}})}{2501 + 1.86T_{\text{db}} - 4.186T_{\text{wb}}} \quad \text{Π.2}$$

Όπου:

ω : απόλυτη υγρασία του αέρα [$\text{kg}_w/\text{kg}_{da}$]

T_{wb} : θερμοκρασία υγρού βολβού [K]

T_{db} : θερμοκρασία ξηρού βολβού [K]

Για τον υπολογισμό της υγρής ειδικής ενθαλπίας (δηλαδή της ενθαλπίας μείγματος αέρας – νερό, ανά κιλό ξηρού αέρα) πρέπει να προσδιοριστούν πρώτα ο υγρός ειδικός όγκος:

$$V_m = \left(\frac{1}{M_B} + \frac{\omega}{M_A} \right) \frac{RT_{db}}{P_{atm}} \quad \text{Π.3}$$

Όπου:

V_m : υγρός ειδικός όγκος [m^3/kg_{da}]

R: παγκόσμια σταθερά των αερίων [$R = 8314.472 \text{ J/K} \cdot kmol$]

Και η υγρή ειδική θερμοχωρητικότητα:

$$c_m = c_{p,A} \cdot \omega + c_{p,B} \quad \text{Π.4}$$

Όπου:

c_m : υγρή ειδική θερμοχωρητικότητα μείγματος αέρας – νερό [$kJ/kg_{da} K$]

$c_{p,A}$: υγρή ειδική θερμοχωρητικότητα νερού/υδρατμού [$kJ/kg_{da} K$]

$c_{p,B}$: υγρή ειδική θερμοχωρητικότητα ξηρού αέρα [$kJ/kg_{da} K$]

Τέλος υπολογίζεται η υγρή ειδική ενθαλπία του μείγματος:

$$h = c_m \cdot T_{db} + \omega \cdot \lambda \quad \text{Π.5}$$

Όπου:

h : υγρή ειδική ενθαλπία μείγματος αέρας – νερό [kJ/kg_{da}]

λ : ειδική ενθαλπία εξάτμισης νερού στους 0°C [kJ/kg_w]