



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ ΣΕ
ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ»**

ΑΤΣΟΝΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Φούντη Μαρία

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2014

Περίληψη

Στις μέρες μας, ο κτιριακός τομέας καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Τα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας δαπανώνται για τη θέρμανση, τον κλιματισμό και τον αερισμό των κτιρίων με σκοπό την επιβολή συνθηκών άνεσης στο εσωτερικό τους. Η θερμοκρασία και η υγρασία είναι οι καθοριστικότεροι παράγοντες για τη θερμική άνεση ενός κτιρίου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνώνται τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας στο εσωτερικό των δομικών υλικών, αναπτύσσοντας ένα μοντέλο προσομοίωσης των φαινομένων σε περιβάλλον ANSYS CFX. Αρχικά, παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των υπολογιστικών μοντέλων μεταφοράς θερμότητας και μάζας που απαντώνται στη βιβλιογραφία. Τα μοντέλα διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την πολυπλοκότητά τους και αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια, περιγράφεται το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Στο μοντέλο αναλύονται οι εξισώσεις που επιλύονται για τη μεταφορά θερμότητας, μάζας και πολυσυστατικής ροής και πώς αυτές μετατρέπονται για τα πορώδη υλικά. Κατόπιν, εισάγονται όλες οι έννοιες και τα μεγέθη που περιγράφουν την παρουσία υγρασίας και αναπτύσσεται ένα μοντέλο δημιουργίας και εξάτμισης συμπυκνωμάτων υγρασίας. Το μοντέλο στηρίζεται σε δύο βασικές παραδοχές: α) τα δομικά υλικά είναι πορώδη με σταθερές ιδιότητες και β) ο αέρας είναι ένα τέλειο μίγμα ξηρού αέρα και υδρατμών. Με βάση αυτές, γίνεται χρήση των εξισώσεων που επιλύει το λογισμικό και υπολογίζονται μεγέθη που απαιτούνται για την περιγραφή της υγρασίας μέσω αλγεβρικών εξισώσεων. Η πιστοποίηση του μοντέλου έγινε βάση πειραματικών μετρήσεων που είναι διαθέσιμες από τη βιβλιογραφία για ύγρανση και αφύγρανση δοκιμίου ενός δομικού υλικού. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε μια ολόκληρη πραγματική πολυστρωματική τοιχοποιία ξηράς δόμησης με διάκενο αέρα. Η τοιχοποιία στην οποία εφαρμόστηκε έχει τοποθετημένα ένα είδος υπερ-μονωτικών (super-insulator) υλικών, τα Μονωτικά Πανέλα Κενού Vacuum Insulation Panels (VIP). Ο πολύ μικρός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και το αδιαπέραστο μεταλλικό τους κάλυμμα κάνουν πολύ ενδιαφέρουσα τη διερεύνηση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας στην τοιχοποιία αυτή. Στην παρούσα εργασία, μελετάται η υγροθερμική συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε περίπτωση βροχερών εξωτερικών συνθηκών και εσωτερικών συνθηκών άνεσης. Μεταξύ των παρατηρήσεων από την υπολογιστική προσομοίωση που διενεργήθηκε είναι η ανάπτυξη συμπυκνωμάτων στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, διαστρωματώσεις στη θερμοκρασία και την υγρασία καθ ύψος της τοιχοποιίας εξαιτίας του διακένου και η δημιουργία δύο ανεξάρτητων περιοχών για τη μεταφορά των υδρατμών λόγω των αδιαπέραστων VIPs.

Abstract

Nowadays, building sector has the lion's share in energy consumption. Most of energy is dedicated to the heating, air-conditioning and ventilation of the building in order to enforce comfort conditions at the indoor. Temperature and humidity are the most important parameters for the thermal comfort in a building. In this master thesis, the effects of heat and mass transfer at the internal of the building materials are investigated. A simulation model at ANSYS CFX environment is developed and presented. At first, a literature survey about the computational models of heat and mass transfer that are met in other studies is carried out. These models are divided in three categories, regarding their complexity. At the next chapter, the simulation model that was developed in this study is described. The governing equations of the heat & mass transfer and multi-component flow are illustrated. The modification of the abovementioned equations for porous media is presented in detail. The simulation of moisture generation and vaporization is completed by the introduction of the quantities related to the air humidity to the model. In the model two main assumptions are made: a) the building materials are porous media with constant properties and b) the air is considered as an ideal mixture of dry air and humidity. Based on these assumptions, the software ANSYS CFX solves the equations and the quantities of humidity are calculated via algebraic equations. The model validation is based on experimental data for sorption and desorption of humidity at a sample of calcium silicate available in the literature. This model is applied at a whole real multilayer dry construction wall with air cavity. In this wall, a kind of super insulator material called Vacuum Insulation Panel (VIP) has been installed. The insulator has very low value of thermal conductivity and is covered with metallic barrier, making it impermeable at the air. These features attract the attention of researchers about the investigation of heat and mass transfer effects. In the frameworks of this thesis the hygrothermal behavior of the wall under rainy conditions in the outdoor and constant comfort conditions in the indoor is examined. Among the observations of this simulation study are the existence of condensates inside the wall, temperature and humidity stratification at the height of the wall due to the air cavity and the generation of two independent areas for the vapor transfer due to the impermeable VIPs.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την καθηγήτρια κα Μαρία Φούντη για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω τη μεταπτυχιακή μου εργασία και να ασχοληθώ με το αντικείμενο της υπολογιστικής προσομοίωσης των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε δομικά υλικά. Θερμές ευχαριστίες στο Δρ. Διονύση Κολαΐτη για τις χρήσιμες συμβουλές και την καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συνεργάτες και συναδέλφους μου στο εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης για τη συμπαράσταση, τη στήριξη και τη βοήθειά τους καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	10
1.1. Ενεργειακή απόδοση κτιρίων.....	10
1.2. Ροή θερμότητας σε τοιχοποιίες.....	11
1.3. VIP.....	12
1.4. Υγρασία- Συμπύκνωση υδρατμών - Προβλήματα σε υλικά.....	14
1.5. Στόχοι εργασίας.....	19
2. Υπολογιστική προσομοίωση φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε κτίρια	20
2.1. Απλουστευτικές προσεγγίσεις μονοδιάστατης ροής θερμότητας.....	20
2.2. Μονοδιάστατες και δισδιάστατες προσεγγίσεις μεταφοράς θερμότητας και μάζας	21
2.3. Πολύπλοκες επιλύσεις τρισδιάστατων ροών μεταφοράς θερμότητας και μάζας (CFD)	24
3. Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε τοιχοποιίες.....	25
3.1. ANSYS CFX - Μέθοδος πεπερασμένων όγκων - Εξισώσεις Navier Stokes.....	25
3.2. Μοντέλο μεταφοράς θερμότητας.....	27
3.2.1. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.....	27
3.2.2. Συντελεστής θερμικής διάχυσης.....	28
3.3. Πολυσυστατική ροή.....	29
3.4. Ροή σε πορώδη υλικά.....	31
3.4.1. Το πλήρες πορώδες μοντέλο.....	31
3.4.2. Μοντέλα απώλειας ορμής.....	34
3.5. Ανάπτυξη μοντέλου συμπύκνωσης υδρατμού.....	36
3.5.1. Ιδιότητες υγρού αέρα.....	36
3.5.2. Μοντέλο συμπύκνωσης υδρατμού.....	42
4. Προσομοίωση φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε πειραματικό θάλαμο	44
4.1. Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	44

Υπολογιστική Προσομοίωση Φαινομένων Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζας σε Δομικά Υλικά

4.1.1.	Πειραματικός Θάλαμος	44
4.1.2.	Κεντρική κλιματιστική μονάδα	45
4.1.3.	Συστήματα οργάνων και παρακολούθησης.....	46
4.1.4.	Εξεταζόμενο δομικό υλικό	46
4.2.	Υπολογιστικές λεπτομέρειες	48
4.2.1.	Γεωμετρία	48
4.2.2.	Υπολογιστικό Πλέγμα	49
4.2.3.	Μοντελοποίηση - Παραδοχές.....	50
4.3.	Παραμετρική μελέτη: Υπολογιστικό πλέγμα	52
4.4.	Παραμετρική μελέτη: Συντελεστής διάχυσης υγρασίας	57
4.5.	Πιστοποίηση αποτελεσμάτων	59
4.6.	Χαρακτηριστικά πεδίου ροής	62
5.	Προσομοίωση φαινομένου μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε πειραματικό οικίσκο	67
5.1.	Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	67
5.2.	Περιγραφή τοιχοποιίας.....	69
5.3.	Υπολογιστικές λεπτομέρειες	71
5.3.1.	Γεωμετρία.....	71
5.3.2.	Υπολογιστικό Πλέγμα	72
5.3.3.	Μοντελοποίηση – Παραδοχές	73
5.4.	Χαρακτηριστικά πεδίου ροής	75
6.	Συμπεράσματα.....	91
7.	Μελλοντικές προοπτικές	93
8.	Βιβλιογραφία	95

Πίνακας Συμβόλων

A_a	Κλάσμα επιφάνειας επαφής του ρευστού a στο στερεό	-
C_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα	J/(kgK)
d	Πυκνότητα υδρατμού	kg/m ³
D	Συντελεστής διάχυσης	m ² /s
e	Σχετικό σφάλμα	-
h	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας	W/(m ² K)
k	Θερμική Αγωγιμότητα	W/(mK)
K_{loss}	Συντελεστής απωλειών	m ⁻¹
K_{perm}	Συντελεστής διαπερατότητας	m ²
m_C	Μάζα του συστατικού C στο σωματίδιο	kg
p	Βαρομετρική πίεση	Pa
R	Σταθερά αερίου για τον υδρατμό	J/(kg _w K)
RH	Σχετική υγρασία	-
S_{ct}	Αριθμός Schmidt	-
Sh	Αριθμός Sherwood	-
T	Θερμοκρασία	°C
u	Πραγματική ταχύτητα	m/s
v	Ειδικός όγκος	m ³ /kg
V'	Όγκος των πόρων	m ³
w	Ισόθερμη προσρόφηση	kg/m ³
W	Λόγος υγρασίας	-
x	Γραμμομοριακό κλάσμα	-
α	Συντελεστής θερμικής διάχυσης	m ² /s
Γ_e	Ενεργή θερμική διαχυτότητα	kg/(ms)
Γ_i	Συντελεστής μοριακής διάχυσης	kg/(ms)
γ_s	Διεπιφανειακή μεταφορά θερμότητας	-
M	Μάζα	kg
μ	Βαθμός κορεσμού	-
μ_e	Ενεργό ιξώδες	kg/(ms)
ρ	Πυκνότητα	kg/m ³

Υπολογιστική Προσομοίωση Φαινομένων Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζας σε Δομικά Υλικά

$\rho_F D_F$	Δυναμική διαχυτότητα του κλάσματος μάζας	kg/(ms)
Y	Ειδική υγρασία ή κλάσμα μάζας	-
ψ	Πορώδες	-

Δείκτες

air	Αέρας
CFX	Τιμές του μοντέλου
da	Ξηρός αέρας
exp	Πειραματικές τιμές
porous	Πορώδες
v	Όγκος
w	Υδρατμός
ws	Υδρατμός σε κατάσταση κορεσμού

1. Εισαγωγή

Η ενέργεια είναι η κύρια πηγή όλων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και η κατανάλωσή της πρέπει να μειωθεί σε κάθε στάδιο της οικονομικής αλυσίδας των βιομηχανικών δραστηριοτήτων που οδηγούν στην τεχνολογική και κοινωνική ανάπτυξη. Οι φυσικοί πόροι είναι θεμελιώδους σημασίας για την οικονομία και τη διατήρηση της ποιότητας ζωής. Στην πραγματικότητα, είναι πλέον ζωτικής σημασίας η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κάθε δραστηριότητας προκειμένου να διασφαλιστεί η οικονομική ανάπτυξη. Μια πιο αποδοτική χρήση της ενέργειας θα δημιουργήσει σημαντικές οικονομικές ευκαιρίες, θα βελτιώσει την παραγωγικότητα, θα μειώνει το κόστος και θα ενίσχυε την ανταγωνιστικότητα των κρατών [1].

1.1. Ενεργειακή απόδοση κτιρίων

Σύμφωνα με την έκθεση του International Energy Outlook 2013 [2], η ενέργεια που καταναλώνεται στον κτιριακό τομέα (συνδυάζοντας την κατασκευή και τη χρήση) είναι υπεύθυνη για περίπου το ένα τέταρτο της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται σε ολόκληρο τον κόσμο και το ποσό αυτό εξακολουθεί και αυξάνεται κάθε χρόνο [3]. Για το λόγο αυτό, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Για παράδειγμα, οι Mohsen και Akash [4] διερεύνησαν μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας σε μονώσεις κτηρίων για διάφορα υλικά όπως, πολυστερίνη, πετροβάμβακα και διάκενο αέρα και βρήκαν ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας έως και 77% όταν χρησιμοποιείται πολυστερίνη και 73% για πετροβάμβακα, τόσο στους εξωτερικούς τοίχους, όσο και στην οροφή. Οι Sage-Lauckand και Sailor [5] έδειξαν ότι η προσθήκη υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials - PCM) σε αναλογία 0.9kg/m^2 επιφάνειας δαπέδου, θα μπορούσε να μειώσει τις ώρες υπέρ-θέρμανσης κατά περίπου 50%.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταφορά ενέργειας μεταξύ του κτιρίου και του περιβάλλοντος επηρεάζει ουσιαστικά τη θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου. Στην πραγματικότητα, όταν ένα συγκεκριμένο σύστημα δόμησης είναι θερμικά μη αποδοτικό, οι απαιτήσεις σε θέρμανση, αερισμό και κλιματισμό (Heat, Ventilation and Air-Conditioning HVAC) θα είναι μεγάλες και σε μόνιμη κατάσταση, αυξάνοντας έτσι το υποκείμενο κόστος της ενέργειας. Επιπλέον, το επίπεδο της ενεργειακής κατανάλωσης σε πυκνοκατοικημένες περιοχές προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας, το επονομαζόμενο *φαινόμενο θερμικής νησίδας*.

1.2. Ροή θερμότητας σε τοιχοποιίες

Σε ένα τυπικό κτίριο κατοικίας τα θερμικά κέρδη προέρχονται από τα συστήματα θέρμανσης, την ηλιακή ακτινοβολία και από εσωτερικά κέρδη όπως οι συσκευές, ο φωτισμός και η θερμότητα που εκλύεται από τους ένοικους του κτιρίου. Οι θερμικές απώλειες οφείλονται στη ροή θερμότητας διαμέσου των τοιχοποιιών, των ανοιγμάτων (παράθυρα και πόρτες), την οροφή, το δάπεδο, τον εξαερισμό, τη διείσδυση αέρα και την ηλιακή ακτινοβολία [6]. Η **Εικόνα 1.1** παρουσιάζει σχηματικά τις θερμικές απώλειες και τα κέρδη σε ένα κτίριο.

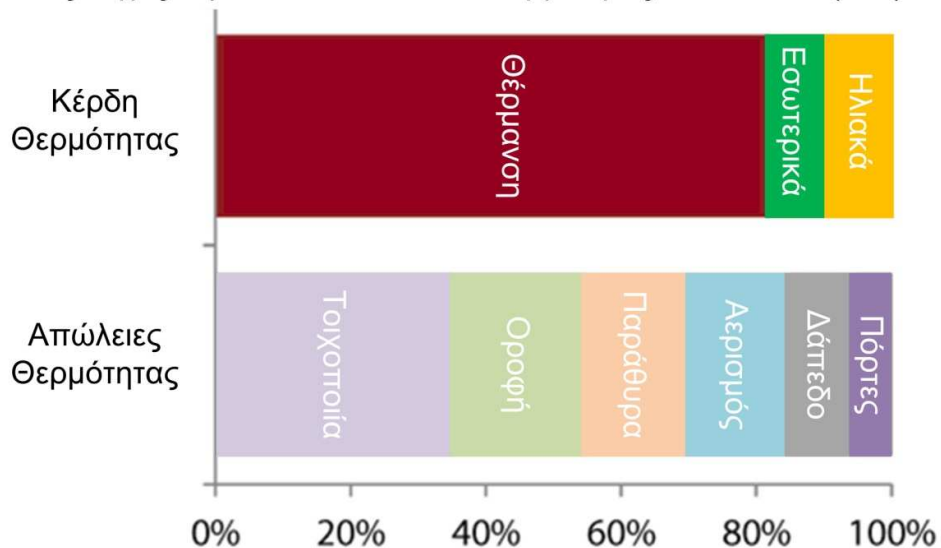


Εικόνα 1.1 - Σχηματική απεικόνιση θερμικών κερδών και απωλειών σε ένα κτίριο [6]

Η **Εικόνα 1.2** παρουσιάζει το ποσοστό των θερμικών απωλειών και κερδών καθένα από τους παραπάνω παράγοντες για μία μέση ευρωπαϊκή κατοικία. Η κύρια πηγή απωλειών προέρχεται από το κέλυφος, συνολικά 65% των συνολικών θερμικών κερδών/απωλειών. Πιο συγκεκριμένα, οι τοιχοποιίες αποτελούν περίπου το 35%, η στέγη 20% και το δάπεδο 10%. Οι υπόλοιποι παράγοντες έχουν ως εξής: τα παράθυρα 15%, ο εξαερισμός 15% και οι πόρτες 5% [7]. Τα ποσοστά αυτά, μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικά για κάθε περίπτωση. Για παράδειγμα, για ένα διαμέρισμα με ένοικους στα γύρω διαμερίσματα, το ποσοστό των απωλειών εξαιτίας των τοιχοποιιών, είναι πολύ χαμηλό. Οι απώλειες θερμότητας μπορούν να μειωθούν βελτιώνοντας τη μόνωση του κελύφους και την αεροστεγανότητα του κτιρίου.

Κέρδη και Απώλειες θερμότητας σε τυπική κατοικία

Μέσες πηγές κερδών και απωλειών θερμότητας σε 200kWh/(m²a)



Εικόνα 1.2 - Σχηματική απεικόνιση των ποσοστών θερμικών απωλειών/κερδών σε ένα τυπικό σπίτι [7]

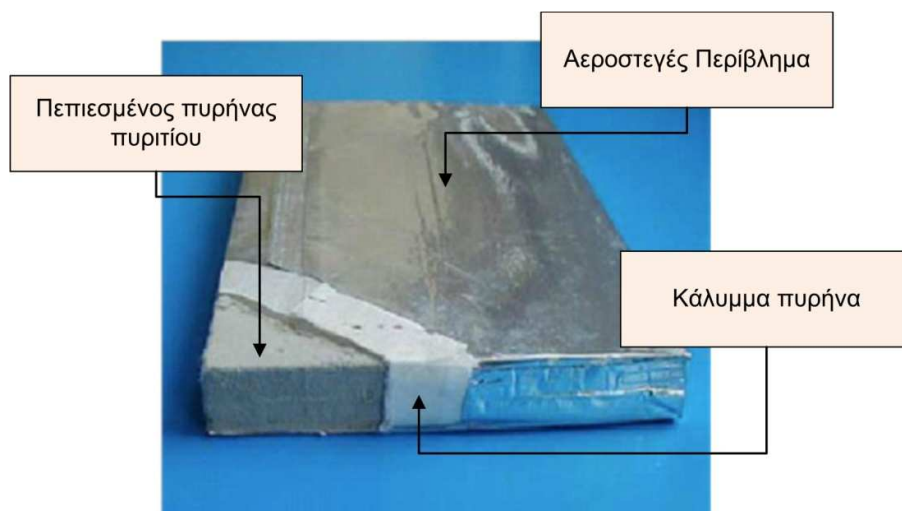
Η εισαγωγή της θερμομόνωσης είχε σημαντική θετική επίδραση στην ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων που κατασκευάστηκαν την τελευταία εικοσαετία, στην Ελλάδα. Αν διακρίνει κανείς την κατανάλωση των κτιρίων ανάλογα με την ηλικία και τα κτιριοδομικά τους χαρακτηριστικά, αυτά που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, ποσοτικά και ποιοτικά, είναι τα νεότερα. Από την ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη χρήση των κτιρίων, το 89% της ενέργειας καταναλώνεται για τη θέρμανση και τον κλιματισμό, το 7% για το φωτισμό και όλες οι υπόλοιπες ανάγκες απορροφούν συνολικά 4% [8]. Η κατανομή αυτή οφείλεται κυρίως στην έλλειψη θερμικής προστασίας των κτιρίων που οδηγεί σε δυσανάλογα μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, προκειμένου να επιτευχθούν ικανοποιητικές συνθήκες θερμικής άνεσης, καθώς επίσης και στην έλλειψη σύγχρονου εξοπλισμού θέρμανσης και κλιματισμού.

1.3. VIP

Οι βιομηχανίες, για την ενεργειακή βελτίωση των κτιρίων, έχουν προχωρήσει στην ανάπτυξη μιας νέας γενιάς μονωτικών υλικών, που ονομάζονται υπέρ-μονωτικά υλικά (*super insulation materials - SIM*) με θερμική αγωγιμότητα κάτω των 0.025W/mK. Τα μονωτικά

αυτά βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο. Ένα από τα πιο ελπιδοφόρα υπέρ - μονωτικά υλικά για κτιριακές εφαρμογές είναι τα Μονωτικά Πάνελ Κενού (Vacuum Insulation Panels ή VIPs). Κατά τη δεκαετία του '90 τα VIPs εισήχθησαν στη βιομηχανία της ψύξης στις ΗΠΑ, την Ιαπωνία και την Ευρώπη. Στη συνέχεια, τα VIPs βρήκαν οικοδομικές εφαρμογές στις αρχές του 21ου αιώνα στην Ευρώπη και τώρα εξαπλώνεται στην Ανατολική Ασία και την Βόρεια Αμερική [9].

Τα VIPs είναι ένας τύπος θερμικής μόνωσης που αποτελείται από ένα αεροστεγές περίβλημα γύρω από έναν άκαμπτο πυρήνα, από τον οποίο έχει εκκενωθεί ο αέρας. Δημιουργώντας αυτό το κενό, ουσιαστικά εξαλείφεται η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή στο εσωτερικό του μονωτή, αφού εξαρτάται από την παρουσία των μορίων του αερίου. Επίσης οι συνθήκες κενού μειώνουν σημαντικά την αγωγή της θερμότητας καθώς υπάρχουν πολύ λιγότερες συγκρούσεις μεταξύ των γειτονικών μορίων του αερίου ή του αερίου και των ατόμων του υλικού του πυρήνα. Η **Εικόνα 1.3** παρουσιάζει σε τομή ένα VIP δείχνοντας τα επιμέρους στοιχεία του.



Εικόνα 1.3 - VIP σε τομή (Φωτογραφία: va-Q-tec)

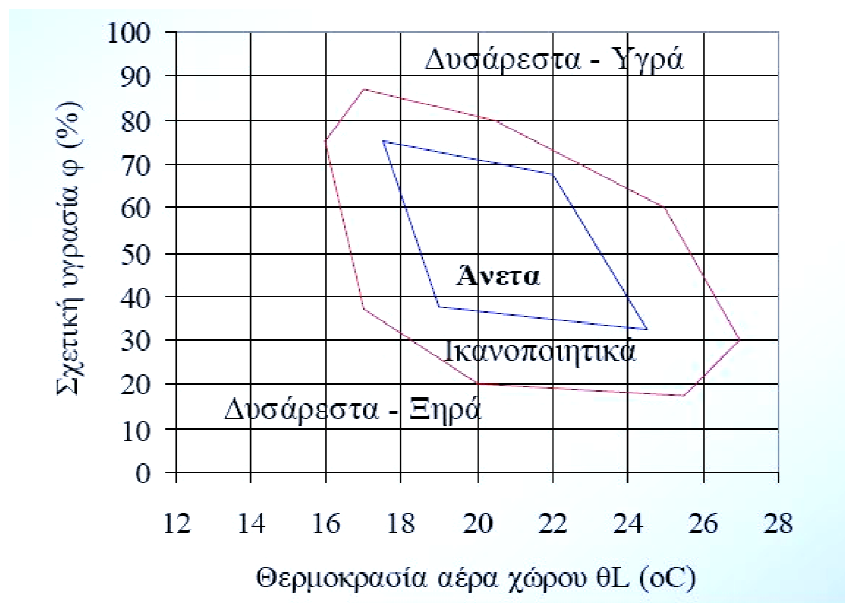
Το υλικό ενός πυρήνα VIP έχει παρόμοια θερμικά χαρακτηριστικά για υλικά που χρησιμοποιούνται στην συμβατή μόνωση. Αφαιρώντας τον αέρα, επιτυγχάνεται μια πολύ χαμηλότερη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με τη συμβατή μόνωση, δηλαδή υψηλότερη θερμική αντίσταση ανά μονάδα πάχους. Τυπικά VIPs έχουν επιτευχθεί με θερμική αγωγιμότητα 0.004 W/mK στο κέντρο του πάνελ, ενώ αν συμπεριληφθούν και οι θερμογέφυρες που δημιουργούνται στις επιφάνειες εξαιτίας του περιβλήματος, η ενεργός τιμή κυμαίνεται από 0.006 έως 0.008 W/mK . Η διαφορά αυτής της θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ των VIPs και των συμβατικών μονωτικών σημαίνει ότι τα VIPs έχουν περίπου το ένα

πέμπτο της θερμικής αγωγιμότητας με τη συμβατή μόνωση και ως εκ τούτου περίπου πέντε φορές τη θερμική αντίσταση ανά μονάδα πάχους. Για μια τυπική τιμή θερμικής αγωγιμότητας (0.007W/mK), ένα VIP πάχους 25mm είναι ισοδύναμο με 154mm πετροβάμβακα ή 121mm EPS [10].

Σε αντίθεση με τη συμβατή μόνωση, η οποία παρουσιάζει υψηλή αντοχή στο χρόνο, στα VIPs υπάρχει σταδιακή απώλεια του κενού με την πάροδο του χρόνου, επηρεάζοντας αισθητά την θερμική τους αγωγιμότητα [11]. Επιπλέον, τα VIPs δεν μπορούν να κοπούν για να ταιριάζουν στην τοιχοποιία, όπως γίνεται με τη συμβατική μόνωση, καθώς αυτό θα κατέστρεφε το κενό, πράγμα το οποίο τα κάνει δύσκολα στην εφαρμογή τους. Μέχρι στιγμής το κόστος των VIPs είναι αρκετά υψηλό σε σχέση με τη συμβατή μόνωση.

1.4. Υγρασία- Συμπύκνωση υδρατμών - Προβλήματα σε υλικά

Για τον καθορισμό των εσωτερικών κλιματικών συνθηκών στα κτίρια, σημαντικό ρόλο παίζουν τόσο η θερμοκρασία, όσο και η υγρασία. Ενώ η επίδραση της θερμοκρασίας είναι γνωστή, αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι η εσωτερική υγρασία έχει σοβαρές επιπτώσεις στη αντιλαμβανόμενη ποιότητα του εσωτερικού αέρα [12, 13]. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση είναι η ταχύτητα του αέρα, η θερμοκρασία ακτινοβολίας, ο ρουχισμός, ο μεταβολισμός και οι δραστηριότητες των ενοίκων. Η **Εικόνα 1.4** παρουσιάζει τις συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας για την επίτευξη θερμικής άνεσης [14].



Εικόνα 1.4 - Συνθήκες θερμικής άνεσης [14]

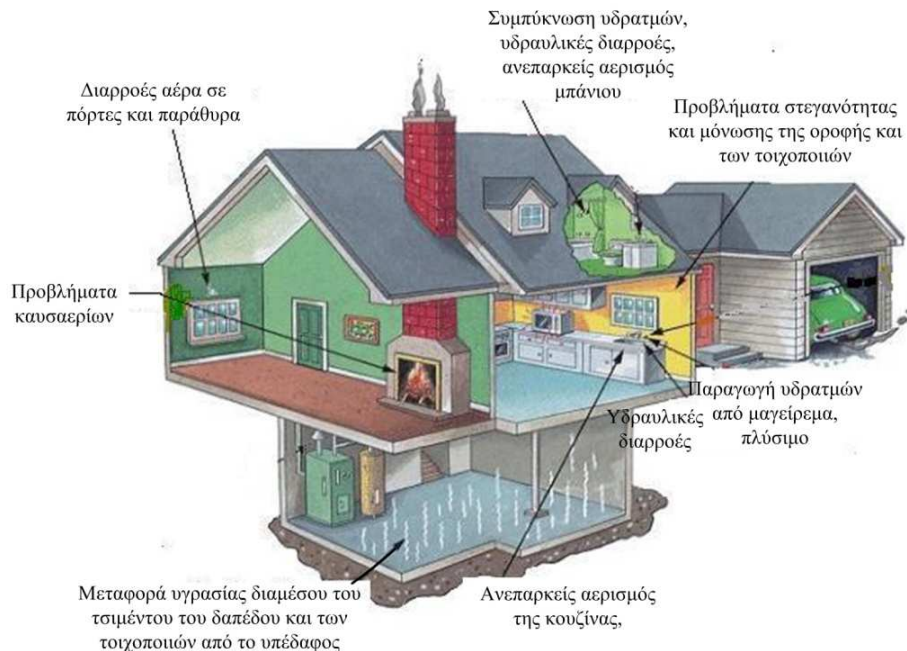
Όπως είναι γνωστό, στον ατμοσφαιρικό αέρα περιέχονται και υδρατμοί που προέρχονται από την εξάτμιση υγρών επιφανειών, κυρίως των θαλασσών. Η παρουσία αυτών των υδρατμών στον αέρα καλείται υγρασία. Η αναλογία της μάζας των υδρατμών που περιέχεται σε ένα όγκο αέρα προσδιορίζεται από την απόλυτη υγρασία. Όμως η μέγιστη ποσότητα των υδρατμών που μπορεί να υπάρξει σε ένα όγκο αέρα είναι συγκεκριμένη και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεσή του. Η υπόλοιπη ποσότητα, πέραν της μέγιστης, που δεν μπορεί να συγκρατηθεί στον αέρα, υγροποιείται και παίρνει τη μορφή συμπυκνωμάτων (σταγόνων), όπου στις περισσότερες περιπτώσεις είναι η αιτία δημιουργίας πολλών προβλημάτων. Για το λόγο αυτό, στις περισσότερες εφαρμογές αυτό που ενδιαφέρει είναι το πόσο κοντά στην μέγιστη τιμή φτάνει η αναλογία των υδρατμών στον αέρα και όχι τόσο η μάζα των υδρατμών του αέρα. Το μέγεθος που το περιγράφει, είναι η σχετική υγρασία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, με τον όρο υδρατμός, περιγράφεται η αέρια φάση του νερού που βρίσκεται στον αέρα, ενώ με τον όρο συμπυκνώματα περιγράφεται η υγρή φάση του νερού που προέρχεται από τους υδρατμούς. Τόσο η αέρια φάση των υδρατμών, όσο και η υγρή φάση των συμπυκνωμάτων έχει καθιερωθεί από τη γενική έννοια της *υγρασίας*. Στην αγγλική ορολογία η έννοια της αέριας φάσης της υγρασίας, αυτό που εδώ καλείται *υδρατμός*, περιγράφεται με τον όρο *humidity*, ενώ η υγρή φάση, που εδώ καλείται ως *συμπυκνώματα υγρασίας*, περιγράφεται με τον όρο *moisture*. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις ιδιότητες του υγρού αέρα δίνονται σε επόμενη ενότητα.

Η υγρασία με τη μορφή των υδρατμών κινείται από το ένα σημείο στο άλλο είτε μέσω της μεταφοράς μάζας, δηλαδή από την κίνηση του υγρού αέρα, είτε μέσω διάχυσης. Η κινητήρια δύναμη της μεταφοράς μάζας είναι η διαφορά πίεσης του αέρα, ενώ η κινητήρια δύναμη στη διάχυση η τάση των υδρατμών. Τα σταγονίδια των υδρατμών στο εσωτερικό των υλικών μεταφέρονται μέσω των ρωγμών και των ενόσεων, ως συνέπεια της βαρύτητας και της διαφοράς πίεσης.

Ο θερμός αέρας μπορεί να συγκρατήσει περισσότερη μάζα υγρασίας από το ψυχρό αέρα. Η συμπύκνωση λαμβάνει χώρα όταν θερμός αέρας ψύχεται καθώς έρχεται σε επαφή με ψυχρότερη επιφάνεια. Από το γεγονός ότι, ο ψυχρός αέρας έχει τη δυνατότητα συγκράτησης μικρότερης μάζας υδρατμών από το θερμό, η παραπάνω υγρασία συμπυκνώνεται. Η θερμοκρασία στην οποία ο αέρας δεν μπορεί να συγκρατήσει επιπλέον υγρασία καλείται *θερμοκρασία δρόσου* (dew point).

Η εσωτερική υγρασία είναι το αποτέλεσμα του παραγόμενου ποσού υγρασίας στους εσωτερικούς χώρους, της σχετικής υγρασίας του εξωτερικού αέρα, και του ρυθμού εναλλαγής αέρα. Εξαρτώμενη από τον αερισμό του κτιρίου, το ίδιο ποσό υγρασίας μπορεί να μην προκαλέσει πρόβλημα σε ένα κτίριο, ενώ να προκαλέσει μούχλα και μύκητες σε άλλο. Σε

παράκτιες περιοχές, όπου η ετήσια εξωτερική σχετική υγρασία είναι αρκετά υψηλότερη, ο εξωτερικός αερισμός δεν προκαλεί επίπεδα χαμηλής υγρασίας στον εσωτερικό χώρο. Η **Εικόνα 1.5** παρουσιάζει μερικές από τις αιτίες δημιουργίας και εισαγωγής υγρασίας στο εσωτερικό κτιρίου κατοικίας.



Εικόνα 1.5 - Αιτίες δημιουργίας υγρασία σε κτίριο κατοικίας

Τα προβλήματα υγρασίας μπορούν να παρατηρηθούν σε πολλά σημεία του κτιρίου και για διάφορους λόγους: όταν υπερβολική υγρασία εισέρχεται στο κτίριο ή παράγεται στους εσωτερικούς χώρους ή όταν ο εσωτερικός αέρας έρχεται σε επαφή με ψυχρές επιφάνειες, όπως παράθυρα ή μη μονωμένους τοίχους. Η υγρασία συχνά προέρχεται εξωτερικά του κτιρίου ή ως αποτέλεσμα των δραστηριοτήτων των ανθρώπων που βρίσκονται μέσα στο κτίριο. Οι κρύες επιφάνειες είναι αποτέλεσμα διαρροής αέρα ή ανεπαρκείς μόνωσης στα διάκενα του κτιρίου, ή σε δωμάτια όπου δεν θερμαίνονται επαρκώς κατά τους χειμερινούς μήνες. Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία επίσης παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην αντοχή του κτιρίου. Αρκετοί μηχανισμοί βλαβών σε κτίρια προκαλούνται από τη θερμοκρασία ή τη σχετική υγρασία ή τον συνδυασμό των δύο. Για παράδειγμα, ο περιορισμός της εσωτερικής υγρασίας είναι απαραίτητος για την προστασία πολύτιμων αντικειμένων από καταστροφές που σχετίζονται με την υγρασία, όπως πίνακες ζωγραφικής [15-17].

Τα επίπεδα της εσωτερικής σχετικής υγρασίας ανάμεσα σε 30% και 50% είναι ανεκτά για τους περισσότερους ανθρώπους και ελαχιστοποιούν προβλήματα υγρασίας στην υγεία και στις κατασκευές. Τα προβλήματα οφείλονται κυρίως στη δημιουργία συμπυκνωμάτων στις επιφάνειες. Τόσο η δημιουργία συμπυκνωμάτων υγρασίας, όσο και οι υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας, οδηγούν στην ανάπτυξη μυκήτων, μούχλας και μεγάλων συγκεντρώσεων βιολογικών μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, ακάρεα τα οποία επηρεάζουν στην υγεία των ατόμων. Η υψηλή υγρασία στα διάκενα της δομής των κτιρίων, όπως σοφίτες, τοιχοποιίες και στην περιοχή των θεμελίων, μπορούν να οδηγήσουν σε φθορά των ξύλων και εν τέλει σε αστοχία των δομικών υλικών. Πολλά προβλήματα υγρασίας είναι εμφανές μέσα στο κτίριο και άλλα όχι. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα πιο κοινά προβλήματα εξαιτίας της υγρασίας:

- **Οσμή.** Σε εσωτερικούς χώρους με υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας, οι οσμές είναι σημάδια μούχλας και μυκήτων που δημιουργήθηκαν εξαιτίας της υγρασίας. Η μούχλα μπορεί να εμφανιστεί όταν η σχετική υγρασία του αέρα κοντά στην επιφάνεια είναι πάνω από 70% και αναπτύσσεται γρηγορότερα σε περιβάλλον με συμπυκνώματα και θερμοκρασίας πάνω από 5°C
- **Πάγος σε ψυχρές επιφάνειες.** Ο πάγος σε παράθυρα, στο πλαίσιο της σοφίτας ή σε οποιαδήποτε άλλη επιφάνεια κάνουν εμφανές το πρόβλημα. Η δημιουργία πάγου είναι συνηθισμένη σε ψυχρά περιβάλλοντα και οφείλεται στην επαφή θερμού αέρα σε ψυχρές επιφάνειες.
- **Αίσθηση υγρασίας.** Η υγρασία είναι ένας από τους παράγοντες άνεσης για τον ανθρώπινο οργανισμό.
- **Ξεθώριασμα και αλλαγή στην υφή.** Συχνά η υγρασία προκαλεί καταστροφές στο χρώμα και την τραχύτητα των αντικειμένων ανεξάρτητα από το υλικό.
- **Παραμορφώσεις και φθορά ξύλινων αντικειμένων.** Το ξύλο μυρίζει ότι είναι υγρό και σκεβρώνει ή κάμπτεται όταν ξηραίνει. Επίσης εμφανίζεται μούχλα και είναι δυνατή η αποσύνθεσή του.
- **Ηλεκτροχημικές διαβρώσεις** σε μεταλλικά στοιχεία, όπως ο εξοπλισμός κλιματισμού, αγωγούς, ορθοστάτες τοιχοποιίας κλπ.

Η **Εικόνα 1.6** παρουσιάζει μερικές επιπτώσεις της υψηλής σχετικής υγρασίας.



Εικόνα 1.6 - Προβλήματα από την υγρασία

Από την άλλη, η έλλειψη υγρασίας μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα σε ένα κτίριο με πολύ μεγάλα ποσά εναλλαγής αέρα. Τα κτίρια «στεγνώνουν» όταν κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ο ψυχρός αέρας εισέρχεται στο κτίριο μέσω διείσδυσης και θερμαίνεται από θερμαντικό σύστημα. Το συνολικό ποσό της υγρασίας που μπορεί να συγκρατηθεί στον ψυχρό αέρα είναι μικρότερο από το ποσό υγρασία που μπορεί να συγκρατηθεί στο θερμό αέρα, συνεπώς όταν ο ψυχρός αέρας θερμαίνεται στους εσωτερικούς χώρους, η σχετική υγρασία μειώνεται και έχει την αίσθηση του ξηρού αέρα. Έτσι κτίρια με σοβαρά προβλήματα διαρροής αέρα, συχνά απαιτούν υγραντές αέρα για να διατηρούν σε επίπεδα άνεσης την εσωτερική υγρασία.

Η επίλυση των προβλημάτων της υγρασίας ξεκινάει με την αναζήτηση της πηγής της υγρασίας εκτός του κτιρίου, καθορίζοντας τον τρόπο ελαχιστοποίησης της παραγωγής της εσωτερικής υγρασίας και εγκαθιστώντας συστήματα αερισμού όπου χρειάζεται. Τα προβλήματα της εντοπισμένης υγρασίας μπορούν να λυθούν θερμαίνοντας τις εσωτερικές επιφάνειες, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η επίλυση του προβλήματος της υγρασίας δεν είναι ούτε εύκολη, ούτε φθηνή και η χρήση αφυγραντήρων ή συστημάτων αερισμού σε όλο το κτίριο αποτελούν ένα μόνο μέρος της λύσης.

1.5. Στόχοι εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε δομικά υλικά. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας στα δομικά υλικά και η ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης σε περιβάλλον ANSYS CFX. Το μοντέλο αυτό θα στοχεύει σε εφαρμογή του σε τοιχοποιίες με σκοπό τη μελέτη της υγραστικής τους συμπεριφοράς σε διάφορες καιρικές συνθήκες, με έμφαση σε περιόδους βροχόπτωσης.

Στην εργασία αυτή γίνεται μια σύντομη περιγραφή των μοντέλων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και στη συνέχεια περιγράφεται το μοντέλο που δημιουργήθηκε στην παρούσα διπλωματική. Η πιστοποίηση του μοντέλου έγινε με την εφαρμογή του σε μια σχετικά απλή περίπτωση με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα που βρέθηκαν από τη βιβλιογραφία. Κατόπιν, έγινε παραμετρική μελέτη του πλέγματος και ενός από τους βασικότερους συντελεστές για τη μεταφορά υγρασίας και στη συνέχεια αναλύονται όλα τα αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας, γίνεται η εφαρμογή του μοντέλου σε μια πραγματική πολυστρωματική τοιχοποιία η οποία περιλαμβάνει υπερ-μονωτικά panels, (Vacuum Insulation Panels) και διάκενο αέρα. Μελετάται η υγραστική συμπεριφορά της τοιχοποιίας για δύο ημέρες με βροχόπτωση. Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η συμπεριφορά του VIP, τόσο στη μεταφορά θερμότητας ως πολύ καλός μονωτής, όσο και στη μεταφορά υγρασίας ως αδιαπέραστα panel. Γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων που αφορούν τη ροή θερμότητας και υγρασίας, αλλά και του αέρα στο διάκενο της τοιχοποιίας.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από ολόκληρη τη διπλωματική εργασία και οι μελλοντικές προοπτικές που προτείνονται για περαιτέρω βελτίωση και εφαρμογή του μοντέλου.

2. Υπολογιστική προσομοίωση φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε κτίρια

Η προσομοίωση συνδυασμένης μεταφοράς θερμότητας και μάζας διαμέσου δομικών υλικών έχει απασχολήσει αρκετά ερευνητές και μηχανικούς [18-20]. Έτσι, πολλά μοντέλα και εμπορικά πακέτα έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας στις τοιχοποιίες. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται συνοπτικά τα μοντέλα που συναντώνται συχνότερα στη βιβλιογραφία. Τα υπολογιστικά εργαλεία έχουν ταξινομηθεί σε τρεις κατηγορίες: Απλουστευτικές προσεγγίσεις μονοδιάστατης ροής θερμότητας, μονοδιάστατες και δισδιάστατες προσεγγίσεις μεταφοράς θερμότητας και μάζας και πολύπλοκες επιλύσεις τρισδιάστατων ροών μεταφοράς θερμότητας και μάζας (CFD).

2.1. Απλουστευτικές προσεγγίσεις μονοδιάστατης ροής θερμότητας

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνεται τα υπολογιστικά εργαλεία τα οποία επιλύουν μονοδιάστατα τη ροή θερμότητας στις τοιχοποιίες ενός κτιρίου χρησιμοποιώντας απλουστευτικές προσεγγίσεις.

- Το **TRNSYS** είναι ένα ευέλικτο εμπορικό πακέτο λογισμικού για τη δυναμική προσομοίωση που επιτρέπει μια λεπτομερή εξέταση και αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς κτιρίων, λαμβάνοντας υπόψη τη θερμική μάζα και τα ηλιακά κέρδη. Το πρόγραμμα είναι εξοπλισμένο με ευφυείς στρατηγικές για τον έλεγχο του αέρα, τη θέρμανση και τη ψύξη [21]. Επικρατούσες συνθήκες, όπως μετεωρολογικά δεδομένα και εσωτερικά φορτία, μπορούν να ενσωματωθούν στην προσομοίωση και να απεικονιστούν με μεγάλη λεπτομέρεια. Στο λογισμικό μπορούν να προσομοιωθούν επίσης καινοτόμα ενεργειακά συστήματα για την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και της γεωθεμίας τα οποία μπορούν είτε να ενσωματωθούν στο κτίριο, είτε χωριστά. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση είναι γενικές τιμές όπως ετήσιες θερμικές ανάγκες αλλά και χρονικά εξαρτώμενες τιμές, όπως θερμοκρασίες σε διάφορες δομικές ζώνες. Για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης λαμβάνονται υπόψη, εκτός από τις θερμοκρασίες του αέρα, οι θερμοκρασίες στις επιφάνειες των τοιχοποιιών σε κάθε δωμάτιο. Όλα τα μοντέλα είναι κατασκευασμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι χρήστες να μπορούν να τα τροποποιήσουν καθώς έχει τη δυνατότητα να συνδέεται με άλλα προγράμματα προσομοίωσης και μη (Microsoft Excel, MATLAB/SIMULINK κλπ) [22, 23].
- Το **EnergyPlus** είναι ένα λεπτομερές πρόγραμμα προσομοίωσης, σχεδιασμένο για τη μοντελοποίηση κτιρίων, συμπεριλαμβανομένων και όλων των σχετικών

εγκαταστάσεων θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού. Το πρόγραμμα είναι επεκτάσιμο και κατά συνέπεια εφαρμόσιμο σε διάφορες περιπτώσεις, χάριν στην αρθρωτή του δομή, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να συμπεριλάβει διάφορα προγράμματα και υπολογιστικά μοντέλα (όπως DOE-2, WINDOW 5, BLAST, Ground Heat Transfer κ.α.). Διαθέτει δύο δυνατούς τύπους προσομοίωσης: την προσομοίωση ημέρας σχεδιασμού και την προσομοίωση για χρονικό διάστημα ενός έτους. Η ευελιξία που παρουσιάζει η χρήση αυτού του προγράμματος ενδυναμώνεται από τη δυνατότητα επιλογής από το χρήστη διαφόρων συστημάτων από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος και να τα προσαρμόζει στην κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, ενώ παράλληλα μπορεί, αν το επιθυμεί, να επεμβαίνει στον κώδικα του προγράμματος, που είναι γραμμένους σε FORTRAN. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι, ενώ το συγκεκριμένο πρόγραμμα ανταποκρίνεται καλά στη μοντελοποίηση του κτιριακού κελύφους, είναι σχετικά δυσκίνητο στην προσομοίωση των συστημάτων, διότι δεν υπάρχει η δυνατότητα της συρόμενης τοποθέτησης των συστημάτων σε γραφική διεπαφή [24].

2.2. Μονοδιάστατες και δισδιάστατες προσεγγίσεις μεταφοράς θερμότητας και μάζας

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται υπολογιστικά εργαλεία τα οποία επιλύουν τόσο το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας, όσο και τη μεταφορά μάζας διαμέσου των τοιχοποιιών, είτε μονοδιάστατα, είτε δισδιάστατα.

- Το **HETRAN** (HEat TRansfer ANalysis) είναι ένας in-house κώδικας που αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το μοντέλο προσομοιώνει τη μεταφορά θερμότητας και μάζας σε πορώδη δομικά υλικά και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας και μάζας στα δομικά υλικά. Ο κώδικας επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις διατήρησης ενέργειας και μάζας, υποθέτοντας ομογενή υλικά, θερμοδυναμική ισορροπία και μεταφορά μάζας εξαιτίας διάχυσης και διαφοράς πίεσης [25].
- Το **MATCH** (Moisture And Temperature Calculation for constructions of Hygroscopic materials) αναπτύχθηκε απ το Technical University της Δανίας [26]. Το μοντέλο προσομοιάζει τη μονοδιάστατη χρονικά μεταβαλλόμενη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας και ήταν η βάση για το μοντέλο που ενσωματώνεται στο MOIST 3.0.
- Το **MOIST 3.0** αναπτύχθηκε από το NIST στα μέσα της δεκαετίας του '90, χωρίς περεταίρω εξέλιξη από το 1997. Χρησιμοποιεί το μονοδιάστατο μοντέλο MATCH, για τη χρονικά μεταβαλλόμενη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας, που

περιγράφηκε παραπάνω. Ένα ολοκληρωμένο εργαστηριακό πείραμα διεξήχθη από Zarf et al (1995) [27] για την πιστοποίηση της ακρίβειας του MOIST 3.0. Προέκυψε καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και των προβλέψεων για την περιεκτικότητα σε υγρασία και της επιφανειακής ροής θερμότητας. Όμως μια διαφορετική πιστοποίηση του μοντέλου από τους Sipes et al. (2000) [28] δεν έδειξε αξιόπιστα αποτελέσματα, πιθανόν εξαιτίας των διδιάστατων φαινομένων μεταφοράς και της υπόθεσης για αμελητέα ακτινοβολία από τον ουρανό στο μοντέλο. Το MOIST εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των κτιριακών κελυφών στη μεταφορά της υγρασίας υπό σταθερές εσωτερικές συνθήκες [29], μεταβαλλόμενη εσωτερική σχετική υγρασία [30] και οροφών [31, 32], όσον αφορά τις σχετικές υγρασίες των επιφανειών των δομικών υλικών και την περιεκτικότητα της υγρασίας στο εσωτερικό τους.

- Το **hygIRC-1D** είναι υδροθερμικό υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Institute for Research in Construction του Καναδά με στόχο την ανάλυση μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας στα δομικά υλικά στις κλιματολογικές συνθήκες του Καναδά. Συγκρίνοντάς το με το MOIST, περιλαμβάνει και τη μεταφορά της υγρασίας εξαιτίας της ροής του αέρα στο εσωτερικό των πορωδών δομικών υλικών. Μια σειρά από δημοσιεύσεις καλύπτει την ανάλυση [33], την παραμετρική μελέτη για την διαχείριση της υγρασίας [34, 35] και μεσαίας και μεγάλης κλίμακας μετρήσεις [36, 37]. Επιπλέον το hygIRC επεκτάθηκε και σε ένα διάστατο μοντέλο, το hygIRC-2D, το οποίο μπορεί να αντιμετωπίσει και διαρροή αέρα και νερού για τα δομικά υλικά, ενώ στα προβλήματα που σχετίζονται με την τριχοειδή μεταφορά εμπεριέχει και την επίδραση της βαρύτητας. Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της απόδοσης της υγρασίας σε δομικά στοιχεία [38].
- Το **MEWS** (Moisture management for Exterior Wall Systems) αναπτύχθηκε στο National Research Council του Καναδά το 1998 (MEWS Project reports Task 2~8,2002)[39-44]. Το μοντέλο προσομοίωσης είναι βασισμένο στο hygIRC.
- Το **HAM** (Heat, Air and Moisture transport) είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης για θέματα που αφορούν κτίρια. Παρέχει μονοδιάστατους υπολογισμούς για την μεταφορά θερμότητας, αέρα και υγρασίας στο κτιριακό κέλυφος. Το πρόγραμμα είναι βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών με ρητές εμπρός διαφορές στο χρόνο. Χρησιμοποιείται αναλυτική επίλυση για τη σύνδεση μεταξύ των υπολογιστικών κελιών για μία δεδομένη ροή του αέρα διαμέσου της κατασκευής. Για την υγρασία, στη φάση του ατμού, λαμβάνει υπόψη τη μεταφορά της με διάχυση και συναγωγή, ενώ η υγρή φάση δεν λαμβάνεται υπόψη. Το HAM ξεκίνησε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και υποστηρίζεται από την IEA - Annex 24 [45]. Επίσης έχει αναπτυχθεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο προσομοίωσης (HAM-Tools) για την ανάλυση της θερμότητας, του αέρα και της υγρασίας σε ολόκληρα τα κτίρια. Το HAM-Tools είναι ένα λογισμικό με σπονδυλωτή δομή σχεδιασμένο χρησιμοποιώντας

ένα γραφικό προγραμματιστικό περιβάλλον. Παρέχει επίσης, μονοδιάστατους υπολογισμούς για τη μεταφορά θερμότητας, αέρα και υγρασίας και υποθέτει πολύ καλή ανάμειξη του αέρα στις διάφορες ζώνες του κτιρίου [46]. Το λογισμικό είναι αξιόπιστο και συγκρίθηκε με άλλα μοντέλα για το έργο HAMSTAD (Heat Air and Moisture STAnDardization) και είχε λογική συμφωνία.

- Το **WUFI**[®] (Wärme und Feuchte instationär – στα γερμανικά Χρονικά Μεταβαλλόμενη Θερμότητα και Υγρασία) αναπτύχθηκε στο IBP (Institute for Building Physics, Γερμανία) για τον υπολογισμό χρονικά μεταβαλλόμενης υgroθερμικής συμπεριφοράς κτιριακών κελυφών πολλαπλών στρώσεων εκτεθειμένα σε φυσικές κλιματολογικές συνθήκες. Το WUFI λαμβάνει υπόψη την επίδραση της βροχής κινούμενη κατά τη διεύθυνση του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία και την νυχτερινή ακτινοβολία του ουρανού στην υgroθερμική απόδοση των τοιχοποιιών. Η ανάλυση του μοντέλου είναι τόσο μονοδιάστατη, όσο και δισδιάστατη. Το WUFI πιστοποιήθηκε με πειράματα, όπου προέκυψαν άψογες συμφωνίες στο σύνολο της περιεκτικότητας της υγρασίας ανάμεσα στις πειραματικές μετρήσεις και στις προβλέψεις του μοντέλου [47]. Το WUFI έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μεταφοράς της υγρασίας στο σύνολό της για ξηρές μονοστρωματικές τοιχοποιίες από τούβλο μετά από εμποτισμό υγρασίας (ο εμποτισμός μπορεί να θεωρηθεί μετά από βροχή μεγάλης διάρκειας) και έχουν προκύψει πολύ καλές συμφωνίες των προβλεπόμενων τιμών του μοντέλου με τις μετρήσεις [48].

Το WUFI έχει μια διεθνή συνεργασία με το Oak Ridge National Laboratory (USA) για την ανάπτυξη ενός υgroθερμικού σχεδιαστικού εργαλείου, με την ονομασία WUFI-ORNL/IBP. Το μοντέλο περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο πακέτο δεδομένων (που περιέχουν θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, καθοδηγούμενη βροχή και ηλιακή ακτινοβολία) για περισσότερες από 50 τοποθεσίες της Αμερικής. Αυτό το υgroθερμικό σχεδιαστικό μοντέλο μπορεί να εκτιμήσει την ανταπόκριση του συστήματος του κτιριακού κελύφους όσον αφορά τα φορτία θερμότητας και υγρασίας και μπορεί να παρέχει μια πολύ χρήσιμη μέθοδο για την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των κτιριακών κελυφών [49].

- Το **UMIDUS** είναι ένα εργαλείο για την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας μέσα σε πορώδες μέσα. Με σκοπό την υgroθερμική ανάλυση των κτιριακών στοιχείων όταν υπόκεινται σε κάθε είδους καιρικές συνθήκες, λαμβάνονται υπόψη τόσο η διάχυση όσο και τα τριχοειδή. Το UMIDUS έχει δημιουργηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ένα γρήγορο και εύκολο στη χρήση λογισμικό [50, 51].

2.3. Πολύπλοκες επιλύσεις τρισδιάστατων ροών μεταφοράς θερμότητας και μάζας (CFD)

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα υπολογιστικά εργαλεία τα οποία επιλύουν τα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε περίπλοκες γεωμετρίες τριών διαστάσεων. Τα εργαλεία αυτά χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ή στοιχείων και επιλύουν τις εξισώσεις της Ρευστομηχανικής.

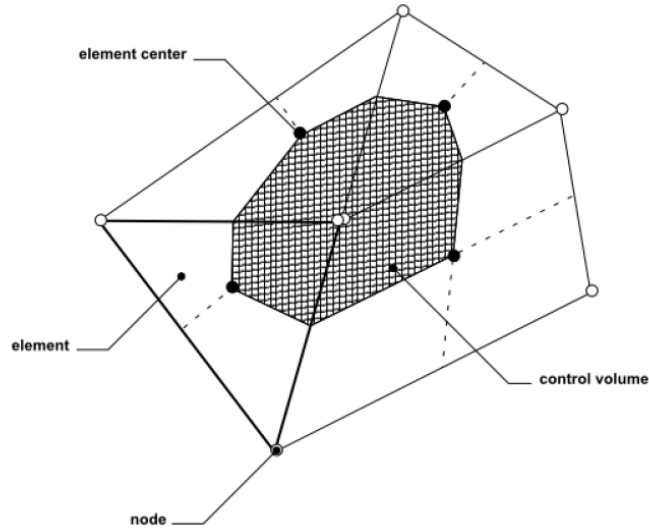
- Το **ANSYS** (FLUENT και CFX) είναι ένα εργαλείο Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics – CFD) που παρέχει στο χρήστη αριθμητικές επιλύσεις φαινομένων ροής ρευστού, μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων για την επίλυση των εξισώσεων και παρέχει μια μεγάλη βιβλιοθήκη φυσικών μοντέλων για την ανάλυση τυρβωδών ροών, μεταφοράς θερμότητας, χημικής ανάμιξης, πολυσυστατικών ροών, καύσης κλπ. Το πρόγραμμα επιλύει φαινόμενα δύο ή και τριών διαστάσεων. Στα επόμενα κεφάλαια αναπτύσσεται αναλυτικά ο τρόπος επίλυσης του λογισμικού, καθώς στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε μοντέλο σε περιβάλλον ANSYS.
- Το λογισμικό **COMSOL** χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων επιστημονικής και μηχανικής φύσης. Δίνει στον χρήστη την δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων με βασική προϋπόθεση τον καθορισμό των απαραίτητων φυσικών ποσοτήτων οι οποίες χαρακτηρίζουν την μελετώμενη εφαρμογή, όπως: οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών, τα φορτία, οι ροές κλπ., χωρίς να απαιτείται όμως ο καθορισμός των εξισώσεων επίλυσης απ' τον ίδιο. Το λογισμικό COMSOL Multiphysics βασίζεται τις υπολογιστικές τεχνικές του στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) και δύναται να προσομοιώνει τα συστήματα γραμμικών και μη γραμμικών μη μόνιμων μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες αποτυπώνουν την φύση του εκάστοτε προβλήματος. Η προσομοίωση του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας, με το κατάλληλα επιλεγμένο χρονικό βήμα προσομοίωσης από το COMSOL, εξελίσσεται σε μια σειρά διαδοχικών βημάτων ως εξής: Αρχικά κατασκευάζεται γεωμετρικά το μοντέλο της μελετώμενης εφαρμογής και ακολουθεί η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου και η κατασκευή του πλέγματος, εξαρτώμενη από τις αρχικές και οριακές συνθήκες. Οι εξισώσεις ροής θερμότητας (π.χ. μεταφοράς θερμότητας διά αγωγής και συναγωγής) συγκροτούνται στο COMSOL Multiphysics κι εν τέλει το λογισμικό επιλύει αυτά τα συστήματα των μερικών διαφορικών εξισώσεων εφαρμόζοντας τις κατάλληλες αρχικές κι οριακές συνθήκες [52].
- Το **CHAMPS** (Coupled Heat, Air, Moisture and Pollutant Simulations) σχεδιάστηκε από το Syracuse University, USA και επιτρέπει μέχρι και την τρισδιάστατη προσομοίωση της συνδυασμένης μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας. Το CHAMPS θα περιλαμβάνει την ικανότητα πρόβλεψης τη μεταφορά μόλυνσης μέσω των δομικών υλικών, επιπλέον με τη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας. [53]

3. Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε τοιχοποιίες

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται ένα υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε δομικά υλικά. Χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό πακέτο CFX της ANSYS το οποίο είναι κατάλληλο για την επίλυση ροών σε περίπλοκες 3D γεωμετρίες. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η φυσική έννοια των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας με τις εξισώσεις που επιλύονται και τις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης που χρησιμοποιήθηκαν.

3.1. ANSYS CFX - Μέθοδος πεπερασμένων όγκων - Εξισώσεις Navier Stokes

Το λογισμικό ANSYS-CFX για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το εκάστοτε πρόβλημα, χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων, η οποία αρχικά περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση του χωρικού πεδίου με την κατασκευή ενός πλέγματος. Το πλέγμα χρησιμοποιείται για την δημιουργία των πεπερασμένων όγκων στους οποίους θα επιλυθούν οι εξισώσεις διατήρησης των σχετικών ποσοτήτων, όπως μάζα, ορμή και ενέργεια. Το πλέγμα είναι πάντα τριών διαστάσεων, όμως για λόγους απλότητας θα παρουσιαστούν πλέγματα δύο διαστάσεων. Η **Εικόνα 3.1** παρουσιάζει ένα τυπικό δισδιάστατο πλέγμα τεσσάρων στοιχειωδών όγκων. Όλες οι μεταβλητές της λύσης και οι ιδιότητες των ρευστών αποθηκεύονται στους κόμβους (nodes), δηλαδή τις κορυφές των στοιχείων του πλέγματος. Γύρω από κάθε κόμβο του πλέγματος δημιουργείται ένας όγκος ελέγχου (γραμμοσκιασμένη περιοχή) που ορίζεται από τις γραμμές που ενώνουν τα μέσα των ακμών που συνδέουν τον κόμβο με τα κέντρα των στοιχείων που περιβάλλουν τον κόμβο [54].



Εικόνα 3.1 - Ορισμός όγκου ελέγχου [54]

Για την απεικόνιση της μεθοδολογίας των πεπερασμένων όγκων, εξετάζονται οι εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενός βαθμωτού μεγέθους ϕ , εκφρασμένες σε Καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad 3.1$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad 3.2$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \right) + S_\phi \quad 3.3$$

Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται σε κάθε όγκο ελέγχου και εφαρμόζεται το θεώρημα Gauss για την μετατροπή των ολοκληρωμάτων όγκου που περιέχουν τελεστές διαφοράς και κλίσης σε επιφανειακά ολοκληρώματα. Αν ο όγκος ελέγχου δεν παραμορφώνεται στο χρόνο στη συνέχεια, οι παράγωγοι του χρόνου μπορούν να βγουν έξω από τα ολοκληρώματα και οι εξισώσεις να γίνουν:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho U_j dn_j = 0 \quad 3.4$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_j U_i dn_j = -\int_S P dn_j + \int_S \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{U_i} dV \quad 3.5$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho U_j \phi dn_j = \int_S \Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_\phi dV \quad 3.6$$

Όπου V και S αντίστοιχα υποδηλώνουν τις περιοχές όγκου και επιφάνειας της ολοκλήρωσης και dn_j είναι οι διαφορικές Καρτεσιανές συνιστώσες του προς τα έξω κάθετου διανύσματος της επιφάνειας. Τα ολοκληρώματα όγκου αντιπροσωπεύουν όρους πηγής ή συσσώρευσης και τα επιφανειακά ολοκληρώματα αντιπροσωπεύουν το άθροισμα των ροών [54].

3.2. Μοντέλο μεταφοράς θερμότητας

Το CFX έχει τη δυνατότητα δημιουργίας στερεής περιοχής στην οποία επιλύονται οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας, αλλά χωρίς ροή. Αυτό είναι γνωστό ως σύζευξη μεταφοράς θερμότητας (conjugate heat transfer) και η στερεή περιοχή ως στερεό σώμα. Στο εσωτερικό των στερεών σωμάτων η διατήρηση της εξίσωσης της ενέργειας μπορεί να λάβει υπόψη τη μεταφορά θερμότητας εξαιτίας της αγωγής, της κίνησης του στερεού και ογκομετρικές πηγές θερμότητας:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_s h) = \nabla(k \nabla T) + S_E \quad 3.7$$

όπου h , ρ και k η ενθαλπία, η πυκνότητα και η θερμική αγωγιμότητα του στερεού, αντίστοιχα, U_s είναι η ταχύτητα του στερεού, αν υπάρχει, και S_E είναι η ογκομετρική πηγή θερμότητας. Ο όρος της οριζόντιας μεταφορικής κίνησης του στερεού είναι προαιρετικός και προστίθεται μόνο όταν έχει οριστεί η κίνηση του στερεού [54].

3.2.1. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική αγωγιμότητα ενός υλικού μπορεί να οριστεί ως το ποσό της θερμότητας που διαχέεται διαμέσου ενός υλικού ανά μονάδα «πάχους» του υλικού και ανά μονάδα θερμοκρασιακής διαφοράς. Ο συντελεστής αγωγιμότητας εκφράζει την ικανότητα του υλικού στην διάχυση θερμότητας διαμέσου αυτού, έχει μονάδες W/mK ή W/m°C και συνήθως συμβολίζεται είτε με k , είτε με λ . Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει τη θερμική αγωγιμότητα κάποιων υλικών, το εύρος των οποίων είναι αρκετά μεγάλο. Ο λόγος για τον οποίο υπάρχουν αυτές οι διακυμάνσεις για την θερμική αγωγιμότητα μεταξύ των υλικών βρίσκεται στην μικροσκοπική δομή των υλικών αυτών, δηλαδή στην διάταξη και την κίνηση των μικροσωματιδίων τους (μόρια ή άτομα) [55].

Πίνακας 3.1 - Θερμικές αγωγιμότητες ορισμένων υλικών σε θερμοκρασία δωματίου [56]

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα [W/mK]	Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα [W/mK]
Διαμάντι	2300	Τούβλο	0.72
Ασήμι	429	Νερό	0.607
Χαλκός	401	Ανθρώπινο δέρμα	0.37
Χρυσός	317	Ξύλο (δρυς)	0.17
Αλουμίνιο	237	Μαλακό λάστιχο	0.13
Σίδηρος	80.2	Ίνες γυαλιού	0.043
Υδράργυρος	8.54	Αέρας (g)	0.026
Γυαλί	0.78	Ουρεθάνη	0.026

3.2.2. Συντελεστής θερμικής διάχυσης

Πρακτικά, το πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας σε μια τοιχοποιία είναι μη μόνιμο. Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad 3.8$$

Ο συντελεστής a είναι ο συντελεστής θερμικής διάχυσης της τοιχοποιίας και προσδιορίζεται μέσω της σχέσης:

$$a = \frac{k}{\rho C_p} \quad 3.9$$

και εμφανίζεται σε όλα τα προβλήματα μη μόνιμης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή.

Η θερμική διάχυση είναι μια ιδιότητα του υλικού του σώματος, από την τιμή της οποίας εξαρτάται ο απαιτούμενος χρόνος για την μεταβολή της θερμοκρασίας στο σώμα. Ο συντελεστής θερμικής διάχυσης a , εκφράζει το πόσο γρήγορα διαχέεται η θερμότητα δια μέσου ενός υλικού και ορίζεται ως:

$$a = \frac{\text{Θερμική αγωγιμότητα}}{\text{Αποθήκευση θερμότητας}} = \frac{k}{\rho C_p} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

Ο παράγοντας ρC_p που βρίσκεται στον παρονομαστή της σχέσης ορισμού της θερμικής διάχυσης, συναντάται συχνά στα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, και καλείται θερμοχωρητικότητα του υλικού. Η ειδική θερμοχωρητικότητα C_p εκφράζει την ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα μάζας ενός μέσου, με μονάδες J/kgK, ενώ πολλαπλασιαζόμενη με την πυκνότητα, ρ , προκύπτει η θερμοχωρητικότητα του μέσου,

εκφράζοντας την ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου και έχει μονάδες J/m^3K .

Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμική αγωγιμότητα k εκφράζει το πόσο καλός αγωγός της θερμότητας είναι το υλικό του μέσου, ενώ η θερμοχωρητικότητα ρC_p το πόσο μεγάλο ποσό θερμότητας μπορεί να αποθηκεύσει. Συνεπώς η θερμική διάχυση είναι ο λόγος της θερμότητας που άγεται από μια μονάδα όγκου του υλικού προς τη θερμότητα που αποθηκεύεται. Όσο μεγαλύτερη θερμική διάχυση έχει ένα υλικό, τόσο γρηγορότερα διαδίδεται η θερμότητα στο μέσο. Μικρή θερμική διάχυση σημαίνει ότι η θερμότητα κυρίως απορροφάται από το υλικό, και μικρότερη άγεται περαιτέρω. Ενδεικτικά, ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει τις τιμές της θερμικής διάχυσης για κοινά υλικά, στους 20 °C [55].

Πίνακας 3.2 - Θερμικές διαχύσεις ορισμένων υλικών σε θερμοκρασία δωματίου [56]

Υλικό	Θερμική Διάχυση [m^2/s]	Υλικό	Θερμική Διάχυση [m^2/s]
Ασήμι	$146 \cdot 10^{-6}$	Τσιμέντο	$0.75 \cdot 10^{-6}$
Χρυσός	$127 \cdot 10^{-6}$	Τούβλο	$0.52 \cdot 10^{-6}$
Χαλκός	$113 \cdot 10^{-6}$	Σκληρό έδαφος (ξηρό)	$0.52 \cdot 10^{-6}$
Αλουμίνιο	$97.5 \cdot 10^{-6}$	Γυαλί	$0.34 \cdot 10^{-6}$
Σίδηρος	$22.8 \cdot 10^{-6}$	Υαλοβάμβακας	$0.23 \cdot 10^{-6}$
Υδράργυρος	$4.7 \cdot 10^{-6}$	Νερό	$0.14 \cdot 10^{-6}$
Μάρμαρο	$1.2 \cdot 10^{-6}$	Βοδινό κρέας	$0.14 \cdot 10^{-6}$
Πάγος	$1.2 \cdot 10^{-6}$	Ξύλο (δρυς)	$0.13 \cdot 10^{-6}$

3.3. Πολυσυστατική ροή

Σε ένα πολυσυστατικό ρευστό, η βαθμωτή εξίσωση μεταφοράς λύνεται για την ταχύτητα, την πίεση, τη θερμοκρασία και άλλες ποσότητες του ρευστού. Όμως, επιπλέον εξισώσεις πρέπει να λύνονται για να καθοριστεί η μεταφορά των συστατικών μέσα στο ρευστό. Οι κινήσεις στο χώρο του ρευστού προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας ξεχωριστά τα πεδία της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και της τύρβης. Η επίδραση των πολλαπλών συστατικών γίνεται αισθητή μόνο αν τα διάφορα συστατικά έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Κάθε συστατικό i , έχει τη δική του εξίσωση για τη διατήρηση της μάζας, η οποία μπορεί να εκφραστεί στη μορφή:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_j u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_i (u_{ij} - u_j) - \rho_i'' u'') + S_i \quad 3.10$$

όπου ρ_i είναι η μέση πυκνότητα του συστατικού i του ρευστού στο μείγμα, δηλαδή η μάζα του συστατικού ανά μονάδα όγκου, $\mathbf{u}_j = \frac{\Sigma(\rho_i u_{ij})}{\bar{\rho}}$ είναι η μέση ταχύτητα του πεδίου, \bar{u}_{ij} είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού συστατικού i , $\rho_i(\mathbf{u}_{ij} - \mathbf{u}_j)$ είναι η σχετική ροή μάζας και S_i ο

όρος πηγής για το συστατικό i το οποίο περιλαμβάνει την επίδραση των χημικών αντιδράσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν όλοι οι όροι της εξίσωσης **3.10** αθροιστούν για όλα τα συστατικά, προκύπτει η εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \mathbf{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad 3.11$$

Καθώς το άθροισμα του ρυθμού των αντιδράσεων είναι μηδέν, ο όρος της σχετικής ροής μάζας αντιστοιχεί στη διαφορική κίνηση των μεμονωμένων συστατικών. Ο όρος αυτός μπορεί να μοντελοποιηθεί με διαφόρους τρόπους όπου συμπεριλαμβάνονται οι συνέπειες των διαφορών των συγκεντρώσεων, της κλίσης πίεσης, τις εξωτερικές δυνάμεις και τις θερμοκρασιακές διαφορές. Από τις παραπάνω πιθανές αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν σχετική κίνηση μεταξύ των συστατικών του μίγματος, η κύρια επίδραση είναι η διαφορά των συγκεντρώσεων. Για την επίδραση αυτού του όρου, το μοντέλο δημιουργεί έναν όρο διάχυσης:

$$\rho_i(\mathbf{u}_{ij} - \mathbf{u}_j) = -\frac{\Gamma_i}{\rho} \frac{\partial \rho_i}{\partial x_j} \quad 3.12$$

Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, Γ_i , θεωρείται ότι είναι ίσος με το γινόμενο $\rho \cdot D_i$, όπου D_i είναι ο συντελεστής διάχυσης.

Το κλάσμα μάζας του συστατικού i ορίζεται ως:

$$Y_i = \frac{\rho_i}{\rho} \quad 3.13$$

Όπου εξ ορισμού, το άθροισμα των επί μέρους κλασμάτων μαζών όλων των συστατικών ισούται με μονάδα. Αντικαθιστώντας τον ορισμό αυτό στην εξίσωση **3.10** προκύπτει:

$$\frac{\partial(\rho \cdot Y)_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \mathbf{u}_j \cdot Y_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot Y_i'' \cdot \mathbf{u}_j'') + S_i \quad 3.14$$

Οι βαθμωτές τυρβώδεις ροές μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας την υπόθεση της καταστροφής δίνης (eddy dissipation).

$$\rho \cdot Y_i'' \cdot \mathbf{u}_j'' = \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \quad 3.15$$

Όπου Sc_t είναι ο αδιάστατος τυρβώδης αριθμός Schmidt ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της συνεκτικότητας προς τη διάχυση και χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό μιας ροής. Δηλαδή:

$$Sh_i = \frac{\mu_i}{\rho D_i} \quad 3.16$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 3.15 στην 3.14 προκύπτει:

$$\frac{\partial(\rho \cdot Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \mathbf{u}_j \cdot Y_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_{i,eff} \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) + S_i \quad 3.17$$

Όπου

$$\rho D_{i,eff} = \rho D_i + \frac{\mu_i}{Sc_i} \quad 3.18$$

Η εξίσωση 3.17 είναι μια γενική εξίσωση μεταφοράς – διάχυσης της γνωστής μορφής των εξισώσεων που λύνονται για κάθε εξαρτημένη μεταβλητή στον υπολογισμό της ροής του ρευστού. Συνεπώς, είναι βολική η επίλυση για το κλάσμα Y_i με σκοπό τον καθορισμό της σύνθεσης του μίγματος του ρευστού.

3.4. Ροή σε πορώδη υλικά

Η ροή σε πορώδες μέσο μπορεί να υπολογιστεί με δύο μεθόδους:

- Η μέθοδος του *πλήρους πορώδους μοντέλου* ή της πραγματικής ταχύτητας, όπου μοντελοποιείται ένα πορώδες πεδίο το οποίο περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα ρευστά και προαιρετικά ένα στερεό. Το πορώδες, ψ , τροποποιεί όλους τους όρους των εξισώσεων, καθώς επίσης και τους όρους απωλειών. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για στερεά μοντέλα και για μοντέλα για την αλληλεπίδραση μεταξύ στερεών και ρευστών περιοχών.
- Η μέθοδος της *προσεγγιστικής ταχύτητας*, όπου το πορώδες μέσο προσομοιώνεται ως ένα πεδίο ρευστού και χρησιμοποιείται επιπλέον στις εξισώσεις επίλυσης, ένα μοντέλο απώλειας ορμής. Η επίδραση του πορώδους λαμβάνεται υπόψη μόνο μέσω αυτής της απώλειας, οι άλλοι όροι των εξισώσεων δεν αλλάζουν.

Στις επόμενες ενότητες αναλύονται οι δύο αυτές μέθοδοι, δίνοντας λεπτομέρειες για την μετατροπή των εξισώσεων ροής στο πορώδες μέσο.

3.4.1. Το πλήρες πορώδες μοντέλο

Το πλήρες πορώδες μοντέλο είναι ταυτόχρονα μια γενίκευση τόσο των εξισώσεων Navier-Stokes όσο και του νόμου του Darcy, διατηρώντας τους όρους μεταφοράς και διάχυσης, και

χρησιμοποιούνται ευρέως για πορώδεις περιοχές. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μοντέλα ροών με περίπλοκες γεωμετρίες.

Οι εξισώσεις του μοντέλου επιλύονται σε απειροελάχιστους όγκους και επιφάνειες ελέγχου. Οι όγκοι αυτοί είναι αρκετά μικροί σε σχέση με τη συνολική γεωμετρία του προβλήματος, είναι όμως αρκετά μεγάλοι σε σχέση με το μέγεθος των πόρων. Έτσι οι δεδομένοι όγκοι και επιφάνειες ελέγχου (κελιά) υποτίθενται ότι έχουν τόσο στερεές, όσο και ρευστές περιοχές. Το μέγεθος που δίνει την αναλογία των περιοχών στα κελιά αυτά, αλλά και γενικότερα σε όλο το μέσο, είναι το πορώδες, και είναι το βασικότερο μέγεθος στη ροή πορωδών μέσων. Το πορώδες, ψ , σε ένα σημείο είναι ο λόγος του όγκου των πόρων V' , δηλαδή του διαθέσιμου όγκου στη ροή, προς τον συνολικό φυσικό όγκο, V . Δηλαδή:

$$V' = \psi \cdot V \quad 3.19$$

Με βάση το πορώδες, όλες οι εξισώσεις τροποποιούνται. Η διανυσματική εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης για ένα οποιοδήποτε μέγεθος Φ σε ένα πορώδες μέσο, γίνεται:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\psi \cdot \rho \cdot \Phi) + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} \cdot \Phi) - \nabla \cdot (\rho D \cdot \mathbf{K} \cdot \nabla \Phi) = \psi \cdot S \quad 3.20$$

όπου \mathbf{K} είναι ένας συμμετρικός τανυστής δεύτερης τάξεως, που ονομάζεται *τανυστής επιφανειακού πορώδους*. Εκτός από τους συνήθεις όρους παραγωγής και κατανάλωσης, ο όρος πηγής S θα περιέχει όρους μεταφοράς από το ρευστό στο στερεά τμήματα του πορώδους μέσου.

- Εξισώσεις Διατήρησης Μάζας

Ειδικότερα, οι εξισώσεις διατήρησης μάζας και ορμής, εξαιτίας του πορώδους γίνονται:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\psi \cdot \rho) + \nabla \cdot (\rho \cdot K \cdot u) = 0 \quad 3.21$$

Και

$$\frac{\partial}{\partial t}(\psi \cdot \rho \cdot u) + \nabla \cdot (\rho(K \cdot u) \otimes u) - \nabla \cdot \left(\mu_e \cdot K \cdot \left(\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3} \delta \cdot \nabla \cdot u \right) \right) = \psi \cdot S_M - \psi \cdot \nabla p \quad 3.22$$

όπου \mathbf{u} είναι η πραγματική ταχύτητα, μ_e το ενεργό ιξώδες, είτε το στρωτό ιξώδες είτε μία τυρβώδης ποσότητα και S_M είναι μια πηγή ορμής, η οποία μπορεί να γραφεί ως $-\mathbf{R} \cdot \mathbf{u}$, όπου $\mathbf{R} = \mathbf{R}^{ij}$ και παριστάνει μια αντίσταση στη ροή για το πορώδες μέσο. Γενικά είναι ένας συμμετρικός θετικά ορισμένος τανυστής δευτέρου βαθμού, που αντιπροσωπεύει πιθανές ανισοτροπίες στην αντίσταση.

- Εξισώσεις Μεταφοράς Θερμότητας

Η γενική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας μπορεί να γραφτεί σε μια εξίσωση της μορφής:

$$\frac{\partial(\psi \cdot \rho \cdot H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot K \cdot u \cdot H) - \nabla \cdot (\Gamma_e \cdot K \cdot \nabla H) = S^H \quad 3.23$$

όπου Γ_e είναι η ενεργή θερμική διαχυτότητα και S^H περιέχει μια πηγή ή καταβόθρα θερμότητας προς ή από το πορώδες μέσο.

Η σχέση της μεταφοράς θερμότητας στο πορώδες στερεό θεωρεί μια πεπερασμένη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των φάσεων του ρευστού και του στερεού. Επειδή, δεν είναι ένα ισοδύναμο μοντέλο μεταφοράς ενέργειας για κάθε φάση, ως εκ τούτου υπάρχουν διαφορετικές εξισώσεις ενέργειας για τη φάση του ρευστού και διαφορετική για τη στερεή φάση.

Για τις φάσεις του ρευστού:

$$\frac{\partial(\psi \cdot \rho \cdot h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} \cdot H) - \nabla \cdot (\Gamma_e \cdot \mathbf{K} \cdot \nabla H) = \psi \cdot S_k^h + Q_{fs} \quad 3.24$$

Για τη στερεή φάση:

$$\frac{\partial(\psi_s \rho_s C_s T_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{K}_s \cdot \mathbf{u}_s \cdot C_s \cdot T_s) - \nabla \cdot (\lambda \cdot \mathbf{K}_s \cdot \nabla T_s) = \psi_s \cdot S_s^T + Q_{sf} \quad 3.25$$

όπου $\gamma_s = 1 - \gamma$ και η διεπιφανειακή μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ρευστού και του στερεού, Q_{fs} , καθορίζεται χρησιμοποιώντας έναν συνολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας:

$$Q_{fs} = -Q_{sf} = h \cdot A_{fs} (T_s - T_f) \quad 3.26$$

όπου h είναι ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ανάμεσα στο ρευστό και στο στερεό και A_{fs} είναι η πυκνότητα διεπιφανειακής περιοχής ανάμεσα στα ρευστά και στο στερεό

- Γενικά

Οι εξισώσεις μεταφοράς διαμέσου του ρευστού και του στερεού τροποποιούνται ως εξής:

Για τις φάσεις του ρευστού:

$$\frac{\partial(\psi \cdot \rho \cdot \Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot K \cdot u \cdot \Phi) - \nabla \cdot (\Gamma_e \cdot K \cdot \nabla \Phi) = S^\Phi + T_{fs} \quad 3.27$$

Για τις φάσεις του στερεού:

$$\frac{\partial(\psi_s \rho_s \phi_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{K}_s \cdot \mathbf{u}_s \cdot \Phi) - \nabla \cdot (\Gamma \cdot \mathbf{K}_s \cdot \nabla \phi) = S_s^\phi + T_{sf} \quad 3.28$$

όπου $\psi_s = 1 - \psi$ ενώ η διεπιφανειακή μεταφορά ανάμεσα στο ρευστό και το στερεό, Q_{fs} , καθορίζεται χρησιμοποιώντας ένα συνολικό συντελεστή μεταφοράς του μοντέλου:

$$T_{fs} = -T_{sf} = \tau A_v (\phi_s - \phi_f) \quad 3.29$$

με τ είναι η συνολικός προστιθέμενος συντελεστής μεταφοράς ανάμεσα στο ρευστό και το στερεό.

Σε πολυφασικές και πολυσυστατικές ροές, η εξίσωση μεταφοράς για το κλάσμα μάζας των συστατικών, $Y_{A\alpha}$, υποτίθεται ότι παίρνει μια παρόμοια μορφή με εκείνη που χρησιμοποιείται στη μονοφασική πολυσυστατική ροή:

$$\frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha Y_{A\alpha}) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha \mathbf{u}_\alpha Y_{A\alpha} - \rho_\alpha D_{A\alpha} (\nabla Y_{A\alpha}))) = S_{A\alpha} \quad 3.30$$

Παρατηρείται ότι οι συντελεστές μοριακής διάχυσης δίνονται από $\rho_\alpha D_{A\alpha}$, όπου $D_{A\alpha}$ είναι η κινηματική διαχυτότητα.

3.4.2. Μοντέλα απώλειας ορμής

Τα μοντέλα απώλειας ορμής για το πορώδες μέσο είναι πανομοιότυπα με τα μοντέλα απωλειών του τύπου της προσεγγιστικής ταχύτητας. Ειδικότερα, τα μοντέλα είναι τα εξής:

- το ιστροπικό μοντέλο απωλειών
- το μοντέλο απωλειών κατεύθυνσης

Αξίζει να σημειωθεί ότι, στα μοντέλα αυτά, η ταχύτητα αναφέρεται είτε στην πραγματική ταχύτητα, είτε στην προσεγγιστική ταχύτητα. Η αλλαγή από τη μία στην άλλη ταχύτητα οδηγεί σε διαφορετικούς συντελεστές. Για τα πεδία των ρευστών, ο επιλύτης υποθέτει ότι οι συντελεστές πολλαπλασιάζονται με την προσεγγιστική ταχύτητα, ενώ για τα πορώδης πεδία μπορεί να επιλεγεί είτε η πραγματική, είτε η προσεγγιστική ταχύτητα.

Στη βιβλιογραφία απαντάται πολύ συχνά το ιστροπικό μοντέλο απωλειών, το οποίο και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Η απώλεια ορμής μέσω μιας ιστροπικής πορώδους περιοχής, S_M , εισέρχεται στην εξίσωση της ορμής (Εξίσωση 3.22) ως πηγή και μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

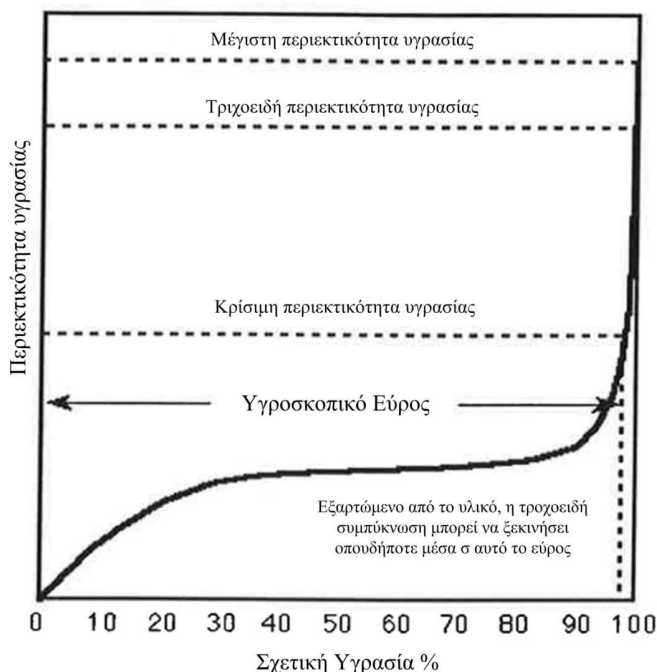
$$S_{M,i} = -\frac{\mu}{K_{perm}} u_i - K_{loss} \frac{\rho}{2} |u| u_i \quad 3.31$$

Όπου i η κάθε συνιστώσα x, y και z , K_{perm} , ο συντελεστής διαπερατότητας (permeability) και K_{loss} , ο συντελεστής απωλειών. Η γραμμική συνιστώσα της παραπάνω πηγής αντιπροσωπεύει τις απώλειες λόγω ιξώδους και ο τετραγωνικός όρος τις απώλειες αδράνειας. Ο συντελεστής απωλειών, K_{loss} , συνδέεται με την κλίση πίεσης ανά μονάδα μήκους.

Η διαπερατότητα στην υγρασία ενός υλικού σε ένα σημείο και προς μία κατεύθυνση ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας του ρυθμού της ροής της υγρασίας στο σημείο και της κλίσης της αναρρόφησης κατά τη διεύθυνση της ροής. Η αναρρόφηση περιλαμβάνει το τριχοειδές φαινόμενο (capillarity), τη βαρύτητα και την εξωτερική πίεση. Ο ορισμός της διαπερατότητας της υγρασίας προέρχεται από την εξίσωση μεταφοράς:

$$\dot{m}_m = -K_{perm} \cdot grads \quad 3.32$$

Όπου s είναι η συνολική αναρρόφηση (suction), σε μονάδες πίεσης, όπου για τριχοειδούς αναρρόφηση περιλαμβάνει τη πίεση των υγρών πόρων και για τη βαρύτητα περιλαμβάνει την επιτάχυνση της βαρύτητας, την πυκνότητα του νερού και το ύψος. Η καμπύλη προσρόφησης στην περιοχή πάνω από την κρίσιμη περιεκτικότητα σε υγρασία, περιλαμβάνει την αναρρόφηση, όμως δεν είναι ιδιαίτερα εμφανής. Ως εκ τούτου, είναι πρακτική η κατασκευή μιας καμπύλης η οποία αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε υγρασία και της σχετικής υγρασίας, η οποία ονομάζεται *καμπύλη προσρόφησης (sorption curve)*. Τότε το πλήρες εύρος της περιεκτικότητας σε υγρασία μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέχρι την κρίσιμη περιεκτικότητα σε υγρασία με τη μορφή μιας καμπύλης προσρόφησης και η δεύτερη, από την κρίσιμη περιεκτικότητα μέχρι τη μέγιστη περιεκτικότητα σε υγρασία με τη μορφή μιας καμπύλης αναρρόφησης [45]. Η **Εικόνα 3.2** παρουσιάζει ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα της περιεκτικότητας σε υγρασία ενός πορώδους υλικού συναρτήσει της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος.



Εικόνα 3.2 - Ισοθερμοκρασιακή καμπύλη προσρόφησης για ένα πορώδες δομικό υλικό

3.5. Ανάπτυξη μοντέλου συμπίκνωσης υδρατμού

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ανάπτυξη του μοντέλου που ενσωματώθηκε στο λογισμικό ANSYS CFX. Το μοντέλο υπολογίζει όλα τα μεγέθη που σχετίζονται με τις ιδιότητες του υγρού αέρα και στη συνέχεια προσδιορίζεται το ποσό των υδρατμών που συμπυκνώνεται ή εξατμίζεται, τροποποιώντας παράλληλα της εξισώσεις μεταφοράς.

3.5.1. Ιδιότητες υγρού αέρα

Ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει πολλά αέρια συστατικά, καθώς επίσης και υδρατμούς και διάφορους ρυπαντές (π.χ. καπνός, γύρη και αέριοι ρύποι που δεν υπάρχουν κανονικά στον ελεύθερο αέρα μακριά από πηγές ρύπανσης). Ο ξηρός αέρας είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας έχοντας αφαιρέσει όλους τους υδρατμούς και τους ρυπαντές. Η σύστασή του είναι σχετικά σταθερή, αλλά παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις στις ποσότητες των επιμέρους συστατικών με το χρόνο, τη γεωγραφική θέση και το υψόμετρο. Ο Harrison (1965) [57] παρουσίασε προσεγγιστικά την ποσοστιαία κατ όγκο σύσταση του ξηρού αέρα: άζωτο 78.084%, οξυγόνο 20.9476%, αργό 0.934%, νέον 0.001818%, ήλιο 0.000524%, μεθάνιο 0.00015%, διοξείδιο του θείου 0 - 0.0001%, υδρογόνο 0.00005% και μικρότερης σημασίας συστατικά όπως το κρυπτόν, το ξέρον και το όζον 0.0002%. Ο Harrison και οι

Hyland και Wexler (1983) [58] χρησιμοποίησαν την τιμή 0.0314% για το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο έφτασε και την τιμή 0.0379% το 2005, με αύξηση 0.00019% το χρόνο και προβλέπεται να φτάσει 0.0438% το 2036 [59-61]. Με την αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα έπεται μείωση του οξυγόνου και προβλέπεται η σύσταση του να φτάσει το 20.9452% το 2036.

Ο υγρός αέρας (moist air) είναι ένα δι-συστατικό μίγμα ξηρού αέρα και υδρατμού. Η ποσότητα του υδρατμού κυμαίνεται από μηδέν μέχρι ένα μέγιστο, το οποίο εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση. Η κατάσταση κορεσμού (saturation) είναι η κατάσταση ουδέτερης ισορροπίας μεταξύ υγρού αέρα και συμπυκνωμένου νερού υγρής ή στερεής φάσης. Η σταθερά του αερίου για τον υδρατμό είναι $R_w = 461.524 \text{ J/kg}_w \text{ K}$

Για τον υπολογισμό μιας σειράς ιδιοτήτων του υγρού αέρα καθώς επίσης και της αναλογίας κορεσμένου υδρατμού απαιτείται ο προσδιορισμός της πίεσης κορεσμού του υδρατμού (water vapor saturation pressure), p_{ws} . Οι τιμές μπορούν να ληφθούν είτε από πίνακες (Table 3, 2009 ASHRAE Handbook-Fundamentals [14]) είτε μπορούν να υπολογιστούν από τύπους [62]. Για υψηλότερη ακρίβεια, κατασκευαστές λογισμικών αναφέρονται στο IARWS 2007 και 2008 [63, 64].

Η πίεση κορεσμού του νερού σε υγρή μορφή για θερμοκρασιακό εύρος 0 έως 200°C, δίνεται από τη σχέση:

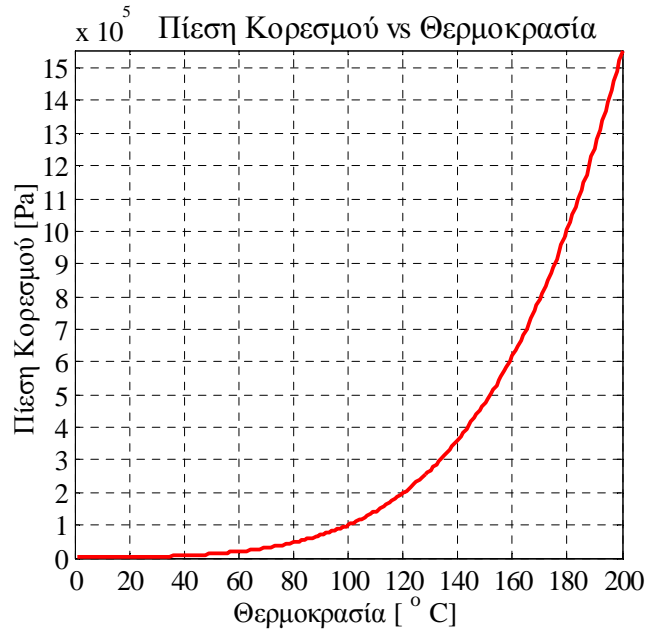
$$\ln p_{ws} = C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6 \ln T \quad 3.33$$

όπου:

$$C_1 = -5.8002206 \cdot 10^3, C_2 = 1.3914993 \cdot 10^0, C_3 = -4.8640239 \cdot 10^{-2}, C_4 = 4.1764768 \cdot 10^{-5}$$

$$C_5 = -1.4452093 \cdot 10^{-8}, C_6 = 6.5459673 \cdot 10^0$$

και p_{ws} η πίεση κορεσμού σε Pa και T η απόλυτη θερμοκρασία σε K [14]. Η **Εικόνα 3.3** παρουσιάζει την πίεση κορεσμού συναρτήσει της θερμοκρασίας του αέρα. Η αύξηση της πίεσης είναι σχεδόν εκθετική.



Εικόνα 3.3 - Εξάρτηση πίεσης κορεσμού με τη θερμοκρασία

Η πίεση υδρατμού p_s (vapor pressure) σε κορεσμένο υγρό αέρα διαφέρει αμελητέα από την τάση κορεσμού του υδρατμού p_{ws} σε καθαρό νερό στην ίδια θερμοκρασία. Συνεπώς, η πίεση των υδρατμών, p_s , μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις εξισώσεις αντί της πίεσης κορεσμού, p_{ws} , με πολύ μικρό σφάλμα:

$$p_s = x_{ws} p \quad 3.34$$

όπου x_{ws} είναι το γραμμομοριακό κλάσμα του υδρατμού στον κορεσμένο υγρό αέρα σε θερμοκρασία T και πίεση p και p η συνολική βαρομετρική πίεση του υγρού αέρα.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι ορισμοί και οι εξισώσεις υπολογισμού βασικών παραμέτρων για την ποσοτικοποίηση της υγρασίας στον υγρό αέρα.

Ο λόγος υγρασίας ή εναλλακτικά η περιεκτικότητα υγρασίας (humidity ratio ή moisture content) W για μία δεδομένη ποσότητα υγρού αέρα, ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του υδρατμού προς τη μάζα του ξηρού αέρα της ποσότητας:

$$W = \frac{M_w}{M_{da}} \quad 3.35$$

Επίσης ο λόγος υγρασίας W ισούται με την λόγο των γραμμομοριακών κλασμάτων x_w/x_{da} πολλαπλασιασμένο με το λόγο των γραμμομοριακών μαζών ($18.015268/28.966=0.621945$), δηλαδή

$$W = 0.621945 \frac{X_w}{X_{da}} \quad 3.36$$

Η ειδική υγρασία ή κλάσμα μάζας, Y , (specific humidity), είναι ο λόγος της μάζας του υδρατμού προς τη συνολική μάζα του υγρού αέρα:

$$Y = \frac{M_w}{M_w + M_{da}} \quad 3.37$$

και με όρους λόγου υγρασίας W :

$$Y = \frac{W}{1 + W} \quad 3.38$$

Η απόλυτη υγρασία (absolute humidity) ή πυκνότητα υδρατμού, d_v , είναι ο λόγος της μάζας του υδρατμού προς το συνολικό όγκο.

$$d_v = \frac{M_w}{V} \quad 3.39$$

Η πυκνότητα, ρ , του υγρού αέρα είναι ο λόγος της συνολικής μάζας προς τον συνολικό όγκο:

$$\rho = \frac{M_w + M_{da}}{V} = \frac{1}{v} (1 + W) \quad 3.40$$

όπου v , είναι ο ειδικός όγκος του υγρού αέρα, m^3/kg_{da} .

Οι επόμενοι ορισμοί των παραμέτρων υγρασίας περιλαμβάνουν την έννοια του κορεσμού του υγρού αέρα.

Ο λόγος υγρασίας κορεσμού (saturation humidity ratio), $W_s(T,p)$, είναι ο λόγος υγρασίας του κορεσμένου υγρού αέρα σε σχέση με το νερό στην ίδια θερμοκρασία T και πίεση p [14].

Ο βαθμός κορεσμού (degree of saturation), μ , είναι η αναλογία του λόγου υγρασίας, W , σε σχέση με το λόγο υγρασίας του κορεσμένου υγρού αέρα, W_s , στην ίδια θερμοκρασία T και πίεση p :

$$\mu = \frac{W}{W_s} \Big|_{T,p} \quad 3.41$$

Η σχετική υγρασία (relative humidity), RH ή ϕ , είναι ο λόγος του γραμμομοριακού κλάσματος του υδρατμού x_w σε ένα δεδομένο όγκο υγρού αέρα, προς το γραμμομοριακό κλάσμα x_{ws} , σε ένα κορεσμένο όγκο στην ίδια θερμοκρασία και πίεση:

$$RH = \frac{x_w}{x_{ws}|_{T,p}} \quad 3.42$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.36, 3.41 και 3.42 προκύπτει:

$$\mu = \frac{RH}{1 + \frac{(1-RH)W_s}{0.621945}} \quad 3.43$$

Η θερμοκρασία δρόσου (dew-point temperature), T_d , είναι η θερμοκρασία του υγρού κορεσμένου αέρα σε πίεση p , με τον ίδιο λόγο υγρασίας W όπως εκείνη της δεδομένης ποσότητας υγρού αέρα. Ορίζεται ως η λύση της εξίσωσης:

$$W_s(p, T_d) = W \quad 3.44$$

Η θερμοδυναμική θερμοκρασία υγρού βολβού (thermodynamic wet-bulb temperature), T^* , είναι η θερμοκρασία στην οποία το νερό (υγρό ή στερεό), εξατμίζοντας το από τον υγρό αέρα σε θερμοκρασία ξηρού βολβού και λόγου υγρασίας W , μπορεί να φέρει τον αέρα σε κορεσμό αδιαβατικά στην ίδια θερμοκρασία T , ενώ η συνολική πίεση, p , είναι σταθερή.

Καθώς ο υγρός αέρας θεωρείται ως ένα μείγμα ανεξάρτητων τελείων αερίων, δηλαδή του ξηρού αέρα και των υδρατμών, το καθένα υποτίθεται ότι υπακούει στις εξισώσεις των τελείων αερίων:

$$p_i V = n_i RT \quad 3.45$$

όπου ο δείκτης i αναφέρεται είτε για τον ξηρό αέρα (da), είτε για τον υδρατμό (w), p_i η μερική πίεση του κάθε συστατικού, V ο συνολικός όγκος του μίγματος, n_i ο αριθμός των γραμμομορίων του κάθε συστατικού, $R=8314.472 \text{ J/kmol}\cdot\text{K}$ η παγκόσμια σταθερά των αερίων και T η απόλυτη θερμοκρασία σε K .

Από τους νόμους Dalton, η συνολική πίεση είναι ίση με $p = p_{da} + p_w$ και ο συνολικός αριθμός γραμμομορίων του μίγματος $n = n_{da} + n_w$. Από τις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να υπολογιστούν τα γραμμομοριακά κλάσματα του ξηρού αέρα και του υδρατμού, αντίστοιχα.

$$x_{da} = \frac{p_{da}}{p_{da} + p_w} = \frac{p_{da}}{p} \quad 3.46$$

Και

$$x_w = \frac{p_w}{p_{da} + p_w} = \frac{p_w}{p} \quad 3.47$$

Έτσι ο λόγος υγρασίας W , από την εξίσωση 3.36, προκύπτει:

$$W = 0.621945 \frac{p_w}{p - p_w} \quad 3.48$$

ενώ ο βαθμός κορεσμού μ , από την εξίσωση 3.43, γίνεται:

$$\mu = 0.621945 \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} \quad 3.49$$

Ο όρος p_{ws} παριστάνει την πίεση κορεσμού των υδρατμών σε απουσία αέρα σε δεδομένη θερμοκρασία T . Η πίεση αυτή, p_{ws} , είναι μια συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας και διαφέρει ελάχιστα από την πίεση υδρατμών σε κορεσμένο υγρό αέρα.

Έχοντας ορίσει τη μερική πίεση των υδρατμών p_w και την πίεση κορεσμού των υδρατμών p_{ws} η σχετική υγρασία RH ορίζεται και από την εξίσωση:

$$RH = \frac{p_w}{p_{ws}|_{T,p}} \quad 3.50$$

και καταλήγει στην εξίσωση:

$$RH = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu) \frac{p_w}{p}} \quad 3.51$$

Τόσο η σχετική υγρασία, RH , όσο και ο βαθμός κορεσμού, μ , είναι μηδέν για τον ξηρό αέρα και μονάδα για τον κορεσμένο υγρό αέρα. Για ενδιάμεσες καταστάσεις οι τιμές τους διαφέρουν ουσιαστικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Για ορισμένες υπολογιστικές και πειραματικές μελέτες, ειδικότερα στον τομέα της μεταφοράς θερμότητα, πολλές άλλες ιδιότητες υγρού αέρα είναι επίσης σημαντικές. Γενικά, κατατάσσονται ως ιδιότητες μεταφοράς και περιλαμβάνουν το συντελεστή διάχυσης, το ιξώδες, τη θερμική αγωγιμότητα και τον συντελεστή θερμικής διάχυσης. Οι ιδιότητες αυτές βρίσκονται σε πίνακες και διαγράμματα της ASHRAE, ενώ οι Mason και Monchick (1965) [65] προσδιορίζουν τις ιδιότητες αυτές με υπολογισμούς. Το ιξώδες μεταβάλλεται ελάχιστα από εκείνο του ξηρού αέρα σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση και η θερμική αγωγιμότητα είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από την περιεκτικότητα του αέρα σε υγρασία.

3.5.2. Μοντέλο συμπύκνωσης υδρατμού

Επιλύοντας τις εξισώσεις ροής, ενέργειας και μεταφοράς μάζας από το λογισμικό CFX, υπολογίζονται τα βασικά μεγέθη: ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία και κλάσμα μάζας υγρασίας-αέρα (ή ειδική υγρασία), τόσο για το πεδίο του αέρα, όσο και για το πεδίο του πορώδους. Το μοντέλο συμπύκνωσης του υδρατμού, βασίζεται στην εργασία της Teodosiou [66] και χρησιμοποιώντας τα παραπάνω μεγέθη και τις εξισώσεις της ενότητας 3.5.1, από το εγχειρίδιο της ASHRAE [14] υπολογίζονται οι ιδιότητες του υγρού αέρα. Από την εξίσωση 3.33 υπολογίζεται η πίεση κορεσμού p_{ws} , έτσι προσδιορίζεται η μάζα κορεσμένου υδρατμού, m_{vap_sat} , δηλαδή η μέγιστη δυνατή μάζα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει ο υγρός αέρας στη δεδομένη θερμοκρασία:

$$m_{vap_sat} = \frac{p_{ws} \cdot V}{R_w \cdot T} \quad 3.52$$

όπου V , ο όγκος αέρα όπου αναφέρεται η μάζα κορεσμένων υδρατμών.

Από την εξίσωση 3.38 και την ειδική υγρασία, Y , υπολογίζεται ο λόγος υγρασίας W και στη συνέχεια από την εξίσωση 3.48 υπολογίζεται η μερική πίεση των υδρατμών:

$$p_w = \frac{W \cdot p}{0.621945 + W} \quad 3.53$$

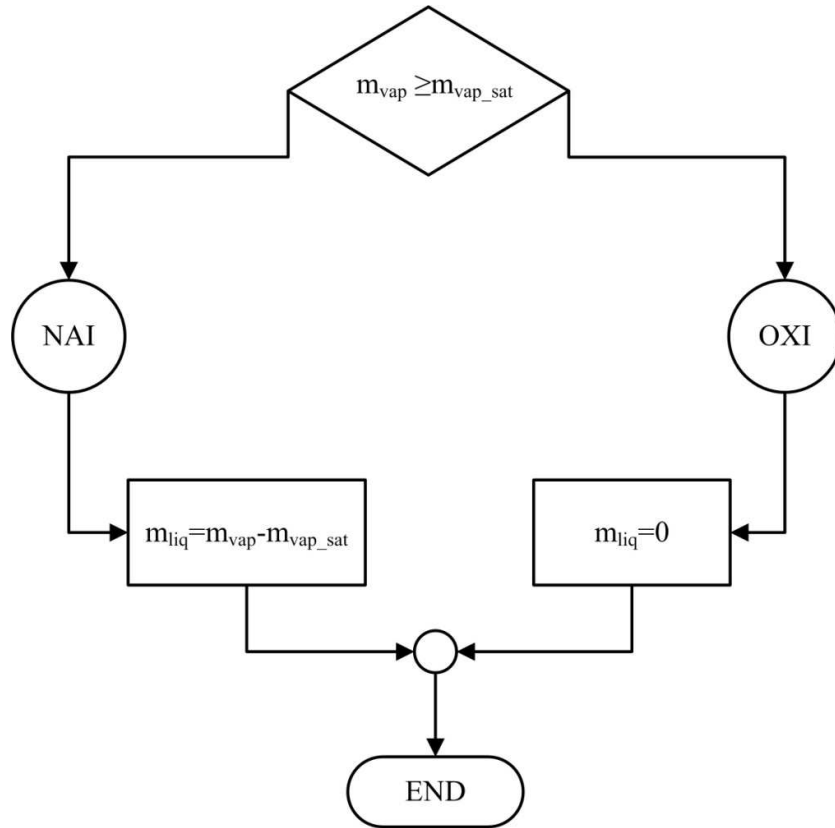
Όπου p , η ολική απόλυτη πίεση.

Έτσι, η μάζα των υδρατμών που βρίσκονται σε έναν όγκο υγρού αέρα V , μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση:

$$m_{vap} = \frac{p_w \cdot V}{R_w \cdot T} \quad \text{ή} \quad m_{vap} = Y \cdot m_{tot} \quad 3.54$$

Όπου m_{tot} η συνολική μάζα του υγρού αέρα.

Για να δημιουργηθεί συμπύκνωμα στον υγρό αέρα για μία δεδομένη θερμοκρασία, θα πρέπει η πίεση των υδρατμών να υπερβαίνει την πίεση κορεσμού ή η μάζα των υδρατμών του υγρού αέρα (m_{vap}) να είναι μεγαλύτερη από τη μάζα κορεσμένων υδρατμών (m_{vap_sat}). Όταν συμβεί αυτό, το ποσό της μάζας των υδρατμών που υπερβαίνει την μάζα κορεσμού, υγροποιείται. Η **Εικόνα 3.4** παρουσιάζει το λογικό διάγραμμα υπολογισμού της μάζας των συμπυκνωμάτων νερού.



Εικόνα 3.4 - Λογικό διάγραμμα υπολογισμού μάζας συμπυκνωμάτων

Όταν θα υπάρξει συμπύκνωση το ποσό της μάζας που συμπυκνώνεται, m_{liq} , μετατρέπεται από την αέρια φάση στην υγρή, προσδίδοντας λανθάνουσα θερμότητα, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην εξίσωση ενέργειας. Η λανθάνουσα θερμότητα για έναν όγκο αέρα V , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_{en} = L \cdot \frac{m_{liq}}{V} \quad 3.55$$

Όπου L , η λανθάνουσα θερμότητα του υδρατμού ίση με 2260000J/kg. Το ποσό αυτό μπαίνει στην εξίσωση της ενέργειας ως πηγή.

Επίσης, κατά τη συμπύκνωση του υδρατμού, το ποσό της μάζας που υγροποιείται, m_{liq} , θα πρέπει να αφαιρεθεί από την εξίσωση μάζας με τη μορφή καταβόθρας. Έτσι το ποσό της μάζας που αφαιρείται από έναν όγκο αέρα V ισούται:

$$S_{mass} = -\frac{m_{liq}}{V} \quad 3.56$$

4. Προσομοίωση φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε πειραματικό θάλαμο

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή και η πιστοποίηση του μοντέλου μεταφοράς θερμότητας και μάζας που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Αρχικά, γίνεται η περιγραφή της πειραματικής διάταξης, η οποία χρησιμοποιείται για την πιστοποίηση του μοντέλου. Στη συνέχεια γίνεται η περιγραφή του μοντέλου με την κατασκευή της εξεταζόμενης γεωμετρίας, τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος και τη μοντελοποίηση με την παράθεση των διαφόρων παραδοχών που έγιναν. Ακόμη, γίνεται παραμετρική μελέτη ως προς τη γεωμετρία (2D ή 3D), το υπολογιστικό πλέγμα και το συντελεστή διάχυσης της υγρασίας όπου μαζί με το πορώδες, δείχνει να παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του κάθε δομικού υλικού. Τέλος, γίνεται η πιστοποίηση των αποτελεσμάτων με τις πειραματικές μετρήσεις και η ανάλυση των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής του προβλήματος.

4.1. Περιγραφή πειραματικής διάταξης

4.1.1. Πειραματικός Θάλαμος

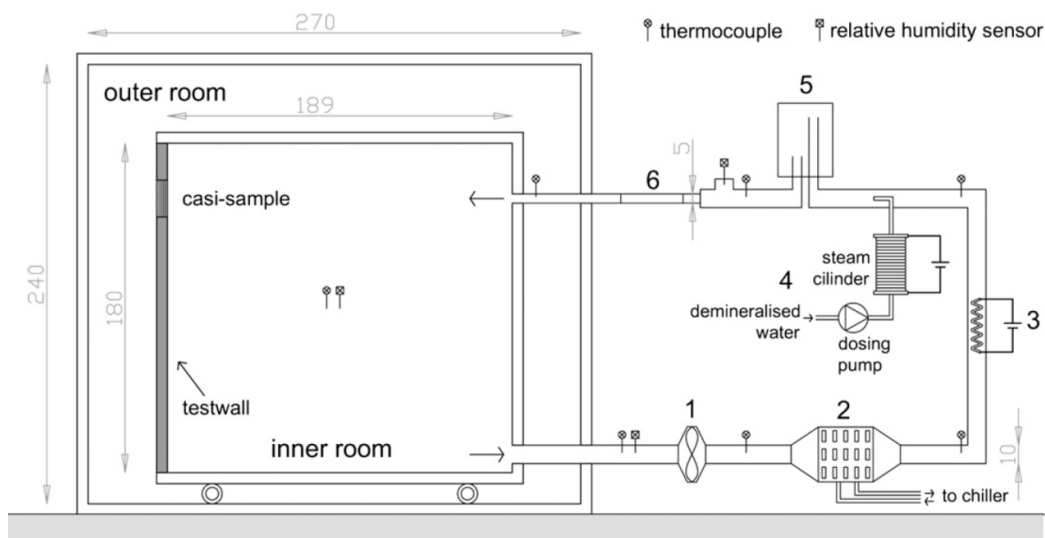
Η πειραματική διάταξη στήθηκε από το εργαστήριο Flow, Heat and Combustion Mechanics του πανεπιστημίου του Ghent και αποτελείται από έναν εσωτερικό και ένα εξωτερικό θάλαμο. Ο εξωτερικός θάλαμος κατασκευάστηκε κυρίως για την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων του περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο πειραματικός θάλαμος είναι ένα μικρό δωμάτιο, συνολικού όγκου 6.12m^3 και διαστάσεων 1.8m πλάτους, 1.89m μήκους και 1.8m ύψους. Ο εξωτερικός θάλαμος έχει διαστάσεις 3.0m πλάτους, 2.7m μήκους και 2.4m ύψους. Η **Εικόνα 4.1** παρουσιάζει σχηματικά την πειραματική διάταξη. Τα τοιχώματα του εσωτερικού και εξωτερικού δωματίου (τύπου ISOCAB [67]) αποτελούνται από 6cm υψηλής πυκνότητας αφρού πολουρεθάνης με θερμική αγωγιμότητα 0.0223W/mK , ψεκασμένο μεταξύ των δύο γαλβανισμένων χαλύβδινων πλακών, πάχους 0.63mm . Τα πάνελ παρουσιάζουν ένα συνολικό συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U-value $0.372\text{W/m}^2\text{K}$ σύμφωνα με τον κατασκευαστή [68]. Το πάτωμα αποτελείται από πολλαπλές στρώσεις με μια αντιολισθητική επιφάνεια ενισχυμένο με ίνες γυαλιού με θερμική αγωγιμότητα 0.366W/mK . Το τοίχωμα απέναντι από την είσοδο του αέρα είναι η εξεταζόμενη τοιχοποιία, αποτελούμενη από 6cm πετροβάμβακα ($\lambda \sim 0.04\text{W/mK}$) σε ξύλινο πλαίσιο. Ένα εξεταζόμενο πάνελ calcium silicate διαστάσεων

20cm×20cm×10cm τοποθετείται στην εξεταζόμενη τοιχοποιία. Αυτό το εξεταζόμενο δείγμα περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω [69].

Με σκοπό την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών προς το εξωτερικό δωμάτιο, τοποθετήθηκε μία μικρή θερμική συσκευή, στον εξωτερικό θάλαμο. Ο λαμπτήρας ανάβει όταν η θερμοκρασία στο εξωτερικό δωμάτιο πέσει τους 25°C [69].

4.1.2. Κεντρική κλιματιστική μονάδα

Ένα κλειστό κύκλωμα κεντρικής κλιματιστικής μονάδας, αντλεί αέρα από το εσωτερικό του θαλάμου μέσω ενός ανεμιστήρα επανακυκλοφορίας. Η είσοδος και η έξοδος του αέρα εξαερισμού τοποθετείται, αντίστοιχα, στο επάνω και το κάτω μέρος της τοιχοποιίας απέναντι από το εξεταζόμενο δοκίμιο, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.1**. Η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του αέρα στο ακροφύσιο ελέγχονται με ένα ειδικό σύστημα κλιματισμού. Ο αέρας εισερχόμενος στην κεντρική κλιματιστική μονάδα ψύχεται και ξηραίνεται από ένα ψύκτη, και όταν ο αέρας φτάσει στο σημείο δρόσου, ξεκινά η συμπύκνωση και ο λόγος υγρασίας του αέρα πέφτει. Ο αέρας σε χαμηλότερη θερμοκρασία περνάει σε έναν εναλλάκτη θερμότητας όπου μία αντίσταση θερμαίνει τον αέρα στην επιθυμητή θερμοκρασία με αποτέλεσμα την πτώση της σχετικής υγρασίας. Κατόπιν, ατμός προστίθεται στον ξηρό αέρα για να υγράνει τον αέρα στην επιθυμητή σχετική υγρασία. Ο αέρας περνάει από ένα ρυθμιστικό δοχείο για τη διασφάλιση της καλής μίξης υδρατμών και αέρα, μετριάζοντας τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Ο αέρας εισέρχεται στον πειραματικό θάλαμο με σταθερή ταχύτητα από έναν ανεμιστήρα με σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του πειραματικού θαλάμου, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα στην είσοδο του θαλάμου ελέγχονται αυστηρά μέσω ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου δύο βρόγχων. Εξαιτίας της αλληλεπίδρασης της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, δεν είναι εύκολη η εξομάλυνση των μεγεθών αυτών. Περισσότερες λεπτομέρειες για την πειραματική εγκατάσταση παρατίθενται στη δημοσίευση [69].



Εικόνα 4.1 - Σχηματική απεικόνιση του θαλάμου και της κεντρικής κλιματιστικής μονάδας [69]

4.1.3. Συστήματα οργάνων και παρακολούθησης

Η σχετική υγρασία στην είσοδο του αέρα στο θάλαμο προσδιορίζεται μέσω ενός χωρητικού αισθητήρα υγρασίας TRANSMICOR T32 από τη GEFRAN. Ο αισθητήρας αυτός έχει ακρίβεια $\pm 2\%$ για σχετική υγρασία, RH, μεταξύ 5% και 95%. Η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του πειραματικού θαλάμου και στο εξεταζόμενο δοκίμιο μετράται με χωρητικούς αισθητήρες σχετικής υγρασίας H1H-4000 της Honeywell. Η θερμοκρασία στην είσοδο του αέρα στον πειραματικό θάλαμο, προσδιορίζεται με τη χρήση θερμοστοιχείων τύπου K [69].

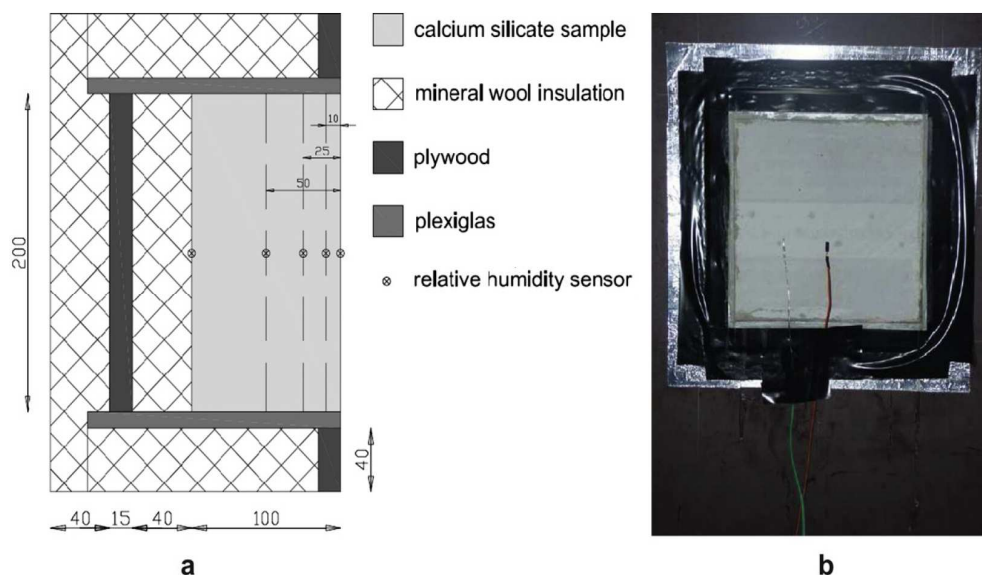
Ένα ανεμόμετρο δύο διαστάσεων χρησιμοποιείται για την μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων στο εσωτερικό του πειραματικού θαλάμου. Το ανεμόμετρο συνδέεται με ένα μηχανικό βραχίονα το οποίο ελέγχεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο μηχανικός βραχίονας μπορεί να κινείται στις δύο διευθύνσεις επιτρέποντας μετρήσεις στο επίπεδο που είναι κάθετο στο επίπεδο της εισόδου του αέρα [69].

Όλα τα σήματα των αισθητήρων διαβάζονται από ένα σαρωτή τάσης και στη συνέχεια, οι μετρούμενες τιμές στέλνονται σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου και αποθηκεύονται. Όλα τα δεδομένα καταγράφονται κάθε 3s κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας [69].

4.1.4. Εξεταζόμενο δομικό υλικό

Στην εξεταζόμενη τοιχοποιία, ένα δοκίμιο calcium silicate διαστάσεων 20cm×20cm×10cm τοποθετήθηκε στην απέναντι πλευρά από την είσοδο του αέρα στον

πειραματικό θάλαμο. Η **Εικόνα 4.2a** απεικονίζει μια τομή του δοκιμίου όπου φαίνονται και οι θέσεις των αισθητήρων και η **Εικόνα 4.2b** δείχνει μια άποψη από την μπροστινή πλευρά του δοκιμίου στην εξεταζόμενη τοιχοποιία. Το δοκίμιο έχει κοπεί εγκάρσια σε τέσσερα επίπεδα στις θέσεις 10mm, 25mm και 50mm του πάχους του αντίστοιχα. Ανάμεσα σε δύο στρώσεις του υλικού, στο μέσο, τοποθετείται ένας μικρός αισθητήρας σχετικής υγρασίας από τη Honeywell. Στη συνέχεια οι στρώσεις πιέζονται μεταξύ τους για καλύτερη επαφή. Η συγκεκριμένη εργασία, δείχνει ότι υπάρχει πιθανή επίπτωση των αισθητήρων στις μετρούμενες σχετικές υγρασίες, αλλά και πιθανή μικρή αλλαγή θέσης εξαιτίας της συμπίεσης των τεσσάρων στρώσεων. Οι τέσσερις παράπλευρες επιφάνειες του δοκιμίου και η πίσω πλευρά είναι μονωμένη με πετροβάμβακα πάχους 4cm για την αποφυγή μεταφοράς θερμότητας του δοκιμίου και τις γύρω περιοχής. Τα μέτρα αυτά λαμβάνονται για την εξασφάλιση της μονοδιάστατης μεταφοράς της υγρασίας στο εσωτερικό του δοκιμίου [69].



Εικόνα 4.2 - Σχηματική απεικόνιση του δοκιμίου calcium silicate με τις θέσεις των αισθητήρων (a) και άποψη του δοκιμίου (b) [69]

Το calcium silicate είναι ένα εξαιρετικά υγροσκοπικό υλικό, το οποίο χρησιμοποιείται σε πειραματικές δοκιμές και το καθιστά κατάλληλο για τη χρήση πειραμάτων πιστοποίησης συνδυασμένων μοντέλων CFD-HAM ή BES-HAM. Οι ιδιότητες του υλικού του calcium silicate έχουν μετρηθεί εκτενώς σε διαφορετικά εργαστήρια [70, 71]. Οι μετρήσεις έδειξαν το πορώδες να κυμαίνεται μεταξύ 84% και 90%. Οι ιδιότητες του υλικού προσδιορισμένες από το KU Leuven laboratory παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.1**. Επίσης καταγράφεται ο παράγοντας της αντίστασης ξηρού ατμού ίσος με 5.42 και ο συντελεστής ξηρής θερμικής αγωγιμότητας ίσος με $k=0.06 \text{ W/mK}$. Η κορεσμένη περιεκτικότητα υγρασίας w_{sat} μετρήθηκε ίση με $w_{sat}=894\text{kg/m}^3$ [69].

Πίνακας 4.1 - Μετρούμενες ιδιότητες του υλικού calcium silicate [69]

Ιδιότητα Υλικού	Μετρούμενη τιμή
Πυκνότητα (kg/m ³)	$P_{mat}=270$
Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	$k=0.06+5.4 \cdot 10^{-4} \cdot w$
Ανοιχτό Πορώδες (-)	$\psi=0.894$
Ισόθερμη προσρόφηση (kg/m ³)	$w=w_{sat}[1+(\alpha_{rlq}R_vT\ln(RH))^n]^{(1-n)/n}$
Περιεκτικότητα υγρασίας σε κορεσμό (kg/m ³)	$w_{sat}=894$
	$\alpha=-2.936 \cdot 10^{-5}$
	$n=1.7266$
Ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kgK)	$C_{mat}=1000$

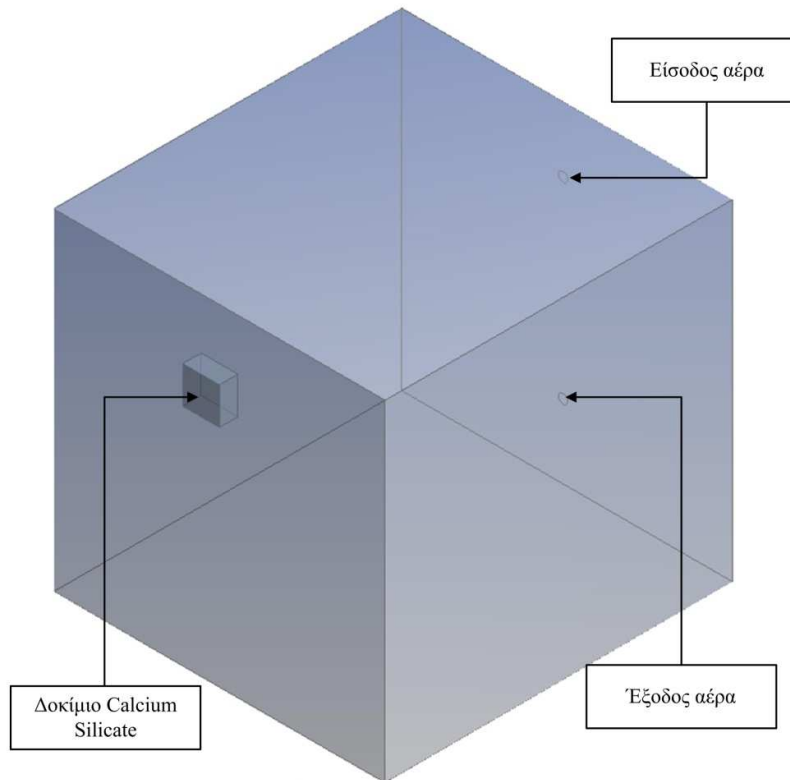
4.2. Υπολογιστικές λεπτομέρειες

Για την πιστοποίηση του μοντέλου μεταφοράς υγρασίας, έγινε προσομοίωση της κυκλοφορίας του υγρού αέρα στον πειραματικό θάλαμο και στο πορώδες υλικό για την παραπάνω πειραματική εγκατάσταση. Η προσομοίωση έγινε σε μοντέλο σε περιβάλλον ANSYS 14.0 CFX.

4.2.1. Γεωμετρία

Η γεωμετρία του προβλήματος αποτελείται από τον πειραματικό θάλαμο και το πορώδες δοκίμιο. Ο πειραματικός θάλαμος είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο διαστάσεων 1.80m×1.80m×1.89m, όπου στη μία πλευρά 1.80m×1.80m δημιουργούνται τα επίπεδα της εισόδου και της εξόδου του αέρα με τους αγωγούς. Τα επίπεδα αυτά είναι κυκλικοί δίσκου διαμέτρου 50mm με κέντρα στο μέσον της πλευράς και 1500mm από το δάπεδο για την είσοδο του αέρα και 500mm από το δάπεδο για την έξοδο του αέρα. Τα κέντρα των δίσκων είναι στην ίδια ευθεία κάθετη με το δάπεδο.

Στην πλευρά, απέναντι από τα επίπεδα εισόδου και εξόδου του αέρα, τοποθετείται το δοκίμιο του πορώδους υλικού calcium silicate διαστάσεων 200mm×200mm×100mm. Το κέντρο του δοκιμίου βρίσκεται ακριβώς απέναντι από το κέντρο του αγωγού εισόδου του αέρα. Ολόκληρη η γεωμετρία της προσομοίωσης παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.3**.

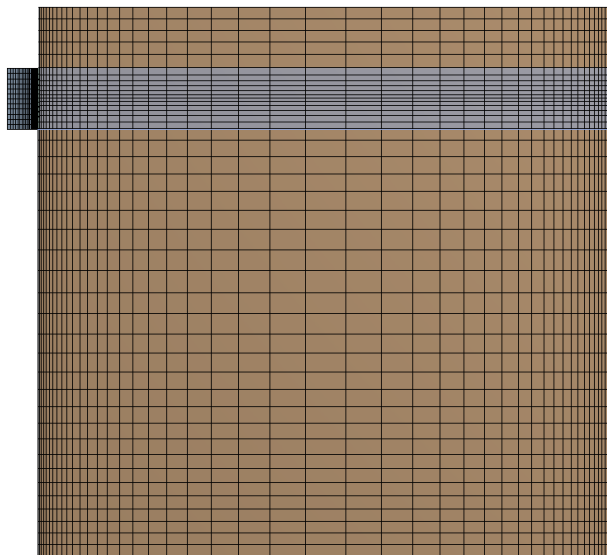


Εικόνα 4.3 - Η γεωμετρία του προβλήματος στο CFX

4.2.2. Υπολογιστικό Πλέγμα

Η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου έγινε στο MESH του ANSYS, προσπαθώντας να κατασκευαστεί όσο το δυνατόν πιο δομημένο πλέγμα. Έγινε τοπική πύκνωση γύρω από τις έξι πλευρές του θαλάμου και στην περιοχή του θαλάμου στο ύψος της εισόδου του αέρα εξαιτίας της αναμενόμενης μεγάλης μεταβολής της ταχύτητας του αέρα. Επίσης, ιδιαίτερη πύκνωση έγινε στις πλευρές του θαλάμου με τα επίπεδα εισόδου/εξόδου και δοκίμιου. Το πλέγμα στο δοκίμιο κατασκευάστηκε με πύκνωση προς την πλευρά του θαλάμου όπου οι μεταβολές της ταχύτητας του αέρα αναμένονται πολύ μεγάλες.

Το πλέγμα της προσομοίωσης το οποίο επιλέχθηκε μετά την παραμετρική μελέτη πλέγματος (επόμενη ενότητα **4.3**) παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.4**.



Εικόνα 4.4 - Το υπολογιστικό πλέγμα προσομοίωσης στο CFX

4.2.3. Μοντελοποίηση - Παραδοχές

Η μοντελοποίηση του φαινομένου μεταφοράς υγρασίας στο δοκίμιο calcium silicate έγινε στο λογισμικό CFX του ANSYS 14.0. Ο υγρός αέρας θεωρήθηκε ως ένα δυσστατικό μίγμα δύο τελείων αερίων, αέρα και υδρατμών. Από την επίλυση των εξισώσεων ροής (ορμής και μάζας, μεταφορά θερμότητας, μοντέλου τύρβης και κλάσματος μάζας) σε όλα τα πεδία της γεωμετρίας, μπορούν να υπολογιστούν τα βασικότερα μεγέθη, όπως η ταχύτητα \vec{u} , η θερμοκρασία T , η πίεση p και η ειδική υγρασία Y σε ολόκληρη τη γεωμετρία. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το μοντέλο συμπύκνωσης του υδρατμού που αναπτύχθηκε αναλυτικά στην ενότητα 3.5 και τις εξισώσεις 3.35 έως 3.45, υπολογίζεται η σχετική υγρασία RH .

Τα τοιχώματα του πειραματικού θαλάμου θεωρήθηκαν αδιαβατικά, όπως επίσης και οι παράπλευρες επιφάνειες του εξεταζόμενου δοκιμίου. Η πίσω επιφάνεια του δοκιμίου θεωρήθηκε ότι έχει σταθερή θερμοκρασία και ίση με 25.4°C, όπως αναφέρεται και στη δημοσίευση [69]. Η είσοδος του αέρα στο θάλαμο επιβλήθηκε με σταθερή οριζόντια ταχύτητα ίση με 10m/s με 5% ένταση τύρβης και ένα λόγο υγρασίας – αέρα η οποία αντιστοιχεί σε γνωστή σχετική υγρασία RH , ενώ ο αέρας στην έξοδο εξέρχεται με σταθερή οριζόντια ταχύτητα ίση με 10m/s.

Η πυκνότητα του αέρα υπολογίζεται από το νόμο ασυμπίεστου τελείου αερίου. Η θερμική αγωγιμότητα θεωρήθηκε σταθερή και ίση με $k=0.06\text{W/mK}$ και ο συντελεστής διάχυσης της υγρασίας, αρχικά, ίσος με $D_{air}=2.64\cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ για το πεδίο του αέρα και $D_{porous}=2\cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ για το πορώδες. Για την τιμή του συντελεστή διάχυσης της υγρασίας του

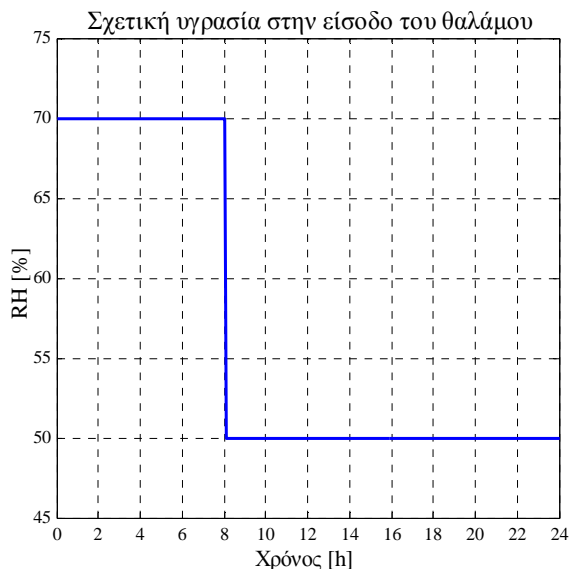
calcium silicate, D_{porous} , έγινε παραμετρική μελέτη και η τάξη μεγέθους της τιμής συμφωνεί με τιμές αντίστοιχων υλικών που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία [45]. Για τις υπόλοιπες ιδιότητες του πορώδους λαμβάνονται υπόψη οι τιμές του **Πίνακας 4.1**, ενώ η τιμή για τη διαπερατότητα της υγρασίας θεωρήθηκε ίση με $K_{perm}=8 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ σύμφωνα με την αναφορά [72]. Η τιμή του συντελεστή αντίστασης λήφθηκε ίσος με $K_{loss}=0.05 \text{ m}^{-1}$, ενώ η διεπιφάνεια πόρων και στερεού ανά m^3 ίση με 45 m^{-1} . Ο συντελεστής διεπιφανειακής μεταφοράς θερμότητας θεωρήθηκε ίσος με $10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Η ροή στο πορώδες επιλέχθηκε να υπολογιστεί με τη μέθοδο της πραγματικής ταχύτητας, καθώς όπως αναφέρεται στην ενότητα **3.4**, η μέθοδος αυτή προτείνεται για πορώδες με περισσότερα από ένα ρευστά και είναι πιο ακριβής.

Στην μοντελοποίηση λήφθηκε υπόψη η επίδραση τις βαρύτητας, τόσο στο θάλαμο όσο και στο πορώδες. Για την επίλυση του προβλήματος της ροής, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τύρβης SST. Από το γεγονός ότι στο λογισμικό CFX, επιλύονται όλες οι εξισώσεις σε όλα τα πεδία, δεν ήταν δυνατός ο αποκλεισμός του μοντέλου τύρβης στο πεδίο του πορώδους, όπου η ροή εξαιτίας των μικρών ταχυτήτων είναι στρωτή. Αυτό έγινε έμμεσα, ορίζοντας διαφορετικό συντελεστή Schmidt σε κάθε πεδίο. Έτσι για το πεδίο του θαλάμου ο αριθμός Schmidt είναι ίσος με 0.7 και για το πορώδες είναι άπειρο. Απειρίζοντας τον αριθμό Sc_i σημαίνει ότι ο όρος της συνεκτικότητας είναι πολύ μεγαλύτερος της διάχυσης και ο όρος τύρβης στην εξίσωση **3.14** μηδενίζεται, μόνο για της περιοχές του πορώδους.

Ένα ανάντη σχήμα δεύτερης τάξης χρησιμοποιήθηκε για τη διακριτοποίηση των όρων συναγωγής στις εξισώσεις μεταφοράς, ώστε να μειωθεί η αριθμητική διάχυση. Οι εξισώσεις επιλύθηκαν με τον αλγόριθμο SIMPLE για τον συνδυασμό πίεσης και ταχύτητας. Για την μείωση των σφαλμάτων στρογγυλοποίησης χρησιμοποιήθηκε δεύτερης τάξεως ακρίβεια. Επιλέχθηκε κριτήριο σύγκλισης $RMS 10^{-5}$. Για την επίλυση του χρονικά μεταβαλλόμενου προβλήματος χρησιμοποιήθηκε χρονικό βήμα ίσο με 10s.

Για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν έγινε αρχικά η προσομοίωση ενός χρονικά μη μεταβαλλόμενου (steady state) προβλήματος με οριακές συνθήκες να εισέρχεται μίγμα αέρα-υγρασίας με παροχή 0.023 kg/s , που αντιστοιχεί για τη συγκεκριμένη διατομή σε ταχύτητα $u=10 \text{ m/s}$ και σχετική υγρασία $RH=50\%$ που αντιστοιχεί σε ειδική υγρασία $Y=0.0092$ και να εξέρχεται αέρας με την ίδια παροχή. Στη συνέχεια οι steady state λύσεις που έχουν συγκλίνει σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές συνθήκες για τα χρονικά μεταβαλλόμενα προβλήματα, όπου χρησιμοποιήθηκαν οι οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων. Δηλαδή, εισαγωγή υγρού αέρα ταχύτητας 10 m/s με σχετική υγρασία $RH=70\%$ για τις πρώτες 8 ώρες και $RH=50\%$ για τις υπόλοιπες 16 ώρες, που αντιστοιχούν σε ειδική υγρασία $Y=0.01373$ και $Y=0.0092$ αντίστοιχα. Η **Εικόνα 4.5** παρουσιάζει την οριακή συνθήκη που επιβάλλεται για τη σχετική υγρασία στο χρονικά

μεταβαλλόμενο πρόβλημα. Τέλος επιβλήθηκε επίσης εξαγωγή αέρα ταχύτητας $u=10\text{m/s}$. Η θερμοκρασία σε κάθε περίπτωση διατηρείται σταθερή και ίση με $T=25^\circ\text{C}$.



Εικόνα 4.5 - Οριακή συνθήκη για τη σχετική υγρασία του αέρα εισαγωγής στο θάλαμο

4.3. Παραμετρική μελέτη: Υπολογιστικό πλέγμα

Για την παραμετρική μελέτη του πλέγματος, εξετάστηκαν συνολικά τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Δύο περιπτώσεις (ένα αραιό και ένα πυκνό) για το δισδιάστατο (2D) μοντέλο και δύο για το τρισδιάστατο (3D).

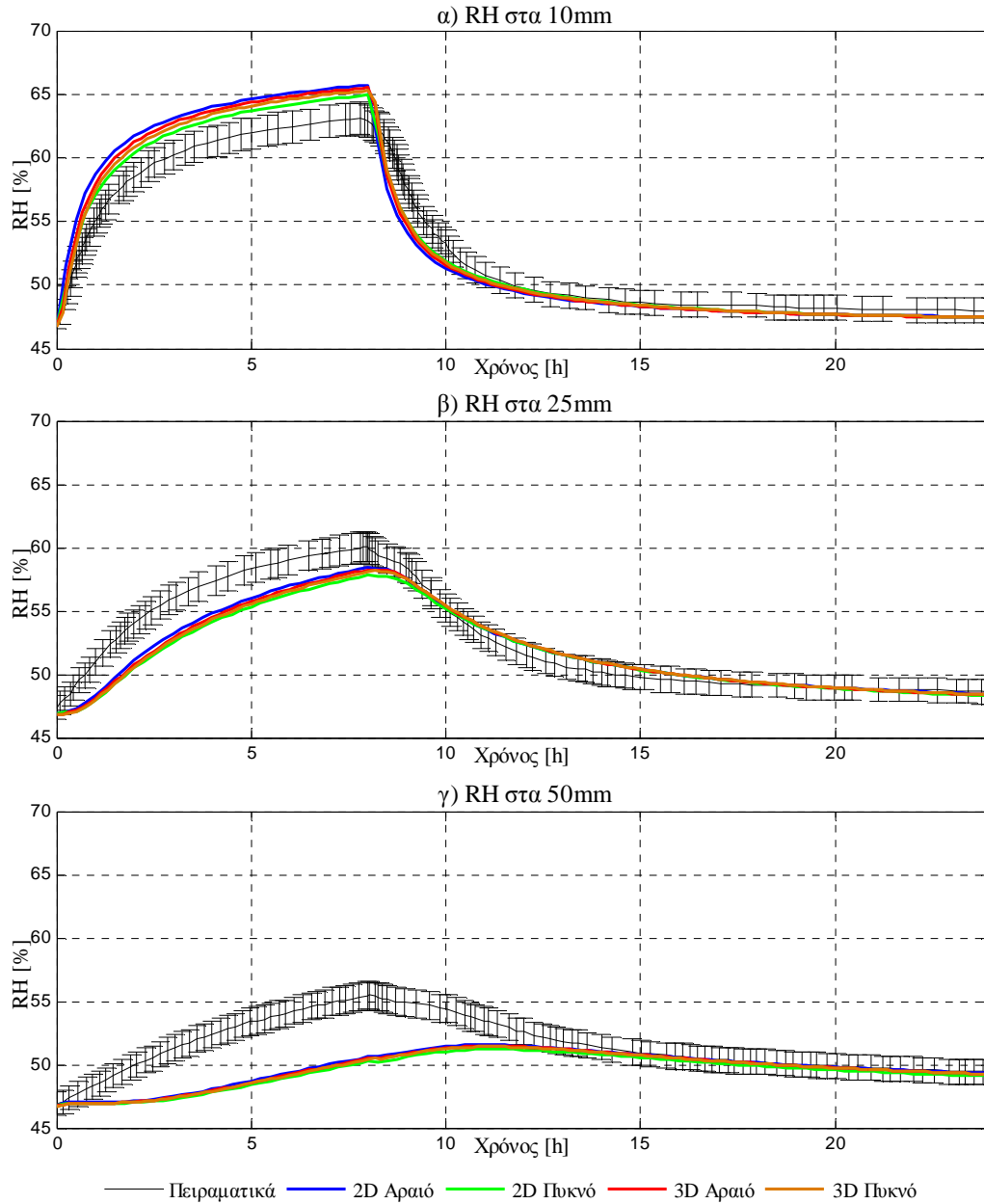
Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πλέγματος για κάθε περίπτωση. Για τα πλέγματα των τριών διαστάσεων (3D), η μέση στοιχειώδης απόσταση δύο γειτονικών κόμβων στον αέρα, $\overline{dx_{air}}$, και στο πορώδες, $\overline{dx_{porous}}$, είναι πάντα μεγαλύτερη και από τις δύο περιπτώσεις των δύο διαστάσεων (2D), εξαιτίας του κόστους του υπολογιστικού χρόνου. Σε κάθε περίπτωση η απόσταση των κόμβων στο πορώδες είναι μικρότερη από τον αέρα στο θάλαμο. Για το 2D μοντέλο, η μέση απόσταση κόμβων στο πεδίο του αέρα, μειώθηκε κατά 90% και κατά 20% στο πεδίο του πορώδους. Στο 3D μοντέλο έγινε η μέση απόσταση κόμβων στον αέρα μειώθηκε κατά 64% και κατά 50% στο πορώδες. Κατά την πύκνωση των αραιών μοντέλων, δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση στο πεδίο του αέρα εξαιτίας των μεγαλύτερων κλίσεων των μεγεθών από κόμβο σε κόμβο, σε σχέση με το πορώδες.

Πίνακας 4.2 - Χαρακτηριστικά του πλέγματος για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν

		$\overline{dx_{air}}$ (mm)	$\overline{dx_{porous}}$ (mm)	Αριθμός στοιχείων	Αριθμός κόμβων
2D	Αραιό	18.9	2.0	7038	14556
	Πυκνό	9.9	1.7	18653	38074
3D	Αραιό	40.2	5.0	112452	102446
	Πυκνό	24.5	3.3	237213	227031

Για την παραμετρική μελέτη του πλέγματος, επιλύθηκε το ίδιο πρόβλημα, με ίδιες αρχικές συνθήκες και ιδιότητες που περιγράφηκαν στην ενότητα **4.2.3**. Επίσης ο συντελεστής μοριακής διάχυση της υγρασίας στο εσωτερικό του δοκιμίου θεωρήθηκε σε κάθε περίπτωση ίσος με $D_{porous}=2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, (κάτι που στην παραμετρική μελέτη του συντελεστή μοριακής διάχυσης της ενότητας **4.4** δείχνει να μην είναι ο ορθότερος με βάση τα πειραματικά) ενώ οι υπόλοιπες ιδιότητες σύμφωνα με τον **Πίνακας 4.1**. Ο έλεγχος έγινε στα σημεία του πορώδους που υπάρχουν και πειραματικές μετρήσεις, χωρίς αυτό να αποτελεί κριτήριο για την επιλογή του καταλληλότερου πλέγματος.

Η **Εικόνα 4.6** παρουσιάζει τη μεταβολή της σχετικής υγρασίας, RH , συναρτήσει του χρόνου, για τα σημεία των 10mm, 25mm και 50mm κατά το πάχος του εξεταζόμενου δοκιμίου, για τις τέσσερις περιπτώσεις. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες των τεσσάρων περιπτώσεων για τη σχετική υγρασία είναι πολύ κοντά η μία με την άλλη και για τα τρία σημεία.



Εικόνα 4.6 - Ανεξαρτησία πλέγματος στα σημεία α) 10mm, β) 25mm και γ) 50mm

Το σχετικό σφάλμα των τιμών της σχετικής υγρασίας που προσδιορίστηκαν από το μοντέλο του CFX ως προς τις πειραματικές τιμές, για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση:

$$e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{RH_{exp,i} - RH_{CFX,i}}{RH_{exp,i}} \right| \cdot 100\% \quad 4.1$$

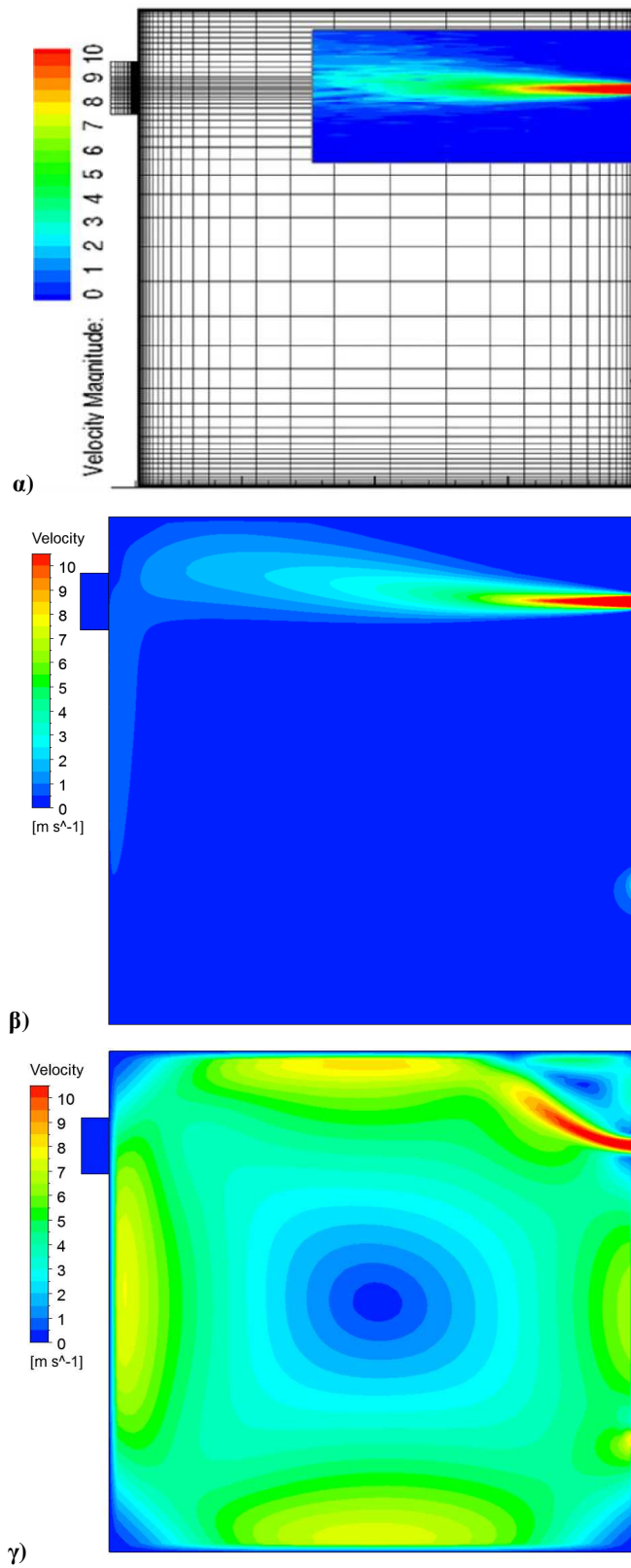
Τα αποτελέσματα του σφάλματος κάθε περίπτωσης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.3**. Παρατηρείται ότι, το μέσο σφάλμα σε όλες τις περιπτώσεις κυμαίνεται από 2.55% έως 2.62%. Επίσης, με την πυκνώση του 2D μοντέλου το μέσο σφάλμα αυξήθηκε κατά 0.03%, ενώ στο 3D μοντέλο η πυκνώση ελάττωσε το μέσο σφάλμα κατά 0.05%. Για το σημείο των 10mm η πυκνώση επιφέρει ελάττωση στο σφάλμα κατά 0.84% για την 2D περίπτωση και κατά 0.31% για την 3D περίπτωση. Για το σημείο των 25mm, η πυκνώση του 2D μοντέλου επιφέρει αύξηση του σφάλματος κατά 0.41% ενώ του 3D 0.10%. Τέλος, για το σημείο των 50mm η πυκνώση του 2D μοντέλου αύξησε το σφάλμα κατά 0.03% και του 3D το ελάττωσε κατά 0.05%. Οι μεταβολές αυτές είναι πολύ μικρές, όμως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η σύγκριση γίνεται με τις πειραματικές τιμές και ο συντελεστής διάχυσης της υγρασίας που επιλέχθηκε, δεν ήταν ο σωστότερος με βάση την παραμετρική μελέτη που ακολούθησε (ενότητα 4.4). Θεωρήθηκε $D_{porous}=2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, ενώ πιο κοντά στα πειραματικά έρχεται το μοντέλο για $D_{porous}=3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, όμως τα γενικότερα συμπεράσματα της παραμετρικής μελέτης πλέγματος δεν αλλάζουν εξαιτίας αυτού.

Πίνακας 4.3 - Παρουσίαση σφαλμάτων παραμετρικής μελέτης πλέγματος

e-Πλέγμα	10mm	25mm	50mm	Μέσος όρος
2D αραιό	2.57%	1.88%	3.33%	2.59%
2D πυκνό	1.73%	2.29%	3.83%	2.62%
3D αραιό	2.25%	2.08%	3.48%	2.60%
3D πυκνό	1.94%	2.18%	3.53%	2.55%

Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη σχετική υγρασία των τριών αυτών σημείων, που είναι και το σημαντικότερο μέγεθος για το πρόβλημα, θα μπορούσε να επιλεγεί ως καταλληλότερο πλέγμα, η περίπτωση με το χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος, κάνοντας αποδεκτή τη μικρή αυτή διαφορά, δηλαδή το αραιό πλέγμα των δύο διαστάσεων. Όμως για την πλήρη εικόνα του μοντέλου η παραμετρική μελέτη του πλέγματος αξιολογήθηκε και με τη χρήση του διάγραμματος των ισοεπιφανειών των ταχυτήτων στο θάλαμο.

Η **Εικόνα 4.7** παρουσιάζει τις ισοεπιφάνειες (contour) των ταχυτήτων του αέρα στο θάλαμο στο επίπεδο που είναι στο μέσο του πλάτους δοκιμίου, θαλάμου και αγωγών εισόδου και εξόδου. Οι διαφορές μεταξύ αραιού και πυκνού πλέγματος τόσο του 2D μοντέλου, όσο και του 3D μοντέλου είναι ελάχιστες, γι αυτό παρουσιάζονται μόνο οι ισοεπιφάνειες των αραιών. Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και για τα αντίστοιχα πυκνά πλέγματα.



Εικόνα 4.7 - Ισοεπιφανειακές των ταχυτήτων στο επίπεδο κάθετο της εισόδου του αέρα στο θάλαμο, α) Πειραματικές τιμές [69], β) μοντέλο 3D και γ) μοντέλο 2D

Οι ταχύτητες στο 2D μοντέλο είναι εντελώς διαφορετικές με αυτό των τριών διαστάσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για το δισδιάστατο μοντέλο, γίνεται η υπόθεση ότι κατά την κάθετη διεύθυνση (πλάτος) η γεωμετρία συνεχίζεται επ' άπειρον, κάτι το οποίο στην πραγματικότητα δεν ισχύει καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τα τοιχώματα του θαλάμου, δηλαδή επιλύει τελείως διαφορετική γεωμετρία. Όπως φαίνεται αυτό δεν είναι σημαντικό για τη μετάδοση της υγρασίας στο εσωτερικό του δοκιμίου (**Εικόνα 4.6**), αλλά είναι αρκετά σημαντικό στην επίλυση της ροής του αέρα στο θάλαμο (**Εικόνα 4.7**). Συγκρίνοντας επίσης της ταχύτητες που υπολογίστηκαν από τα δύο μοντέλα με τις πειραματικές μετρήσεις της δημοσίευσης [69], παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη συμφωνία στα σημεία που υπάρχουν μετρήσεις με της ταχύτητες που προέκυψαν από το 3D μοντέλο.

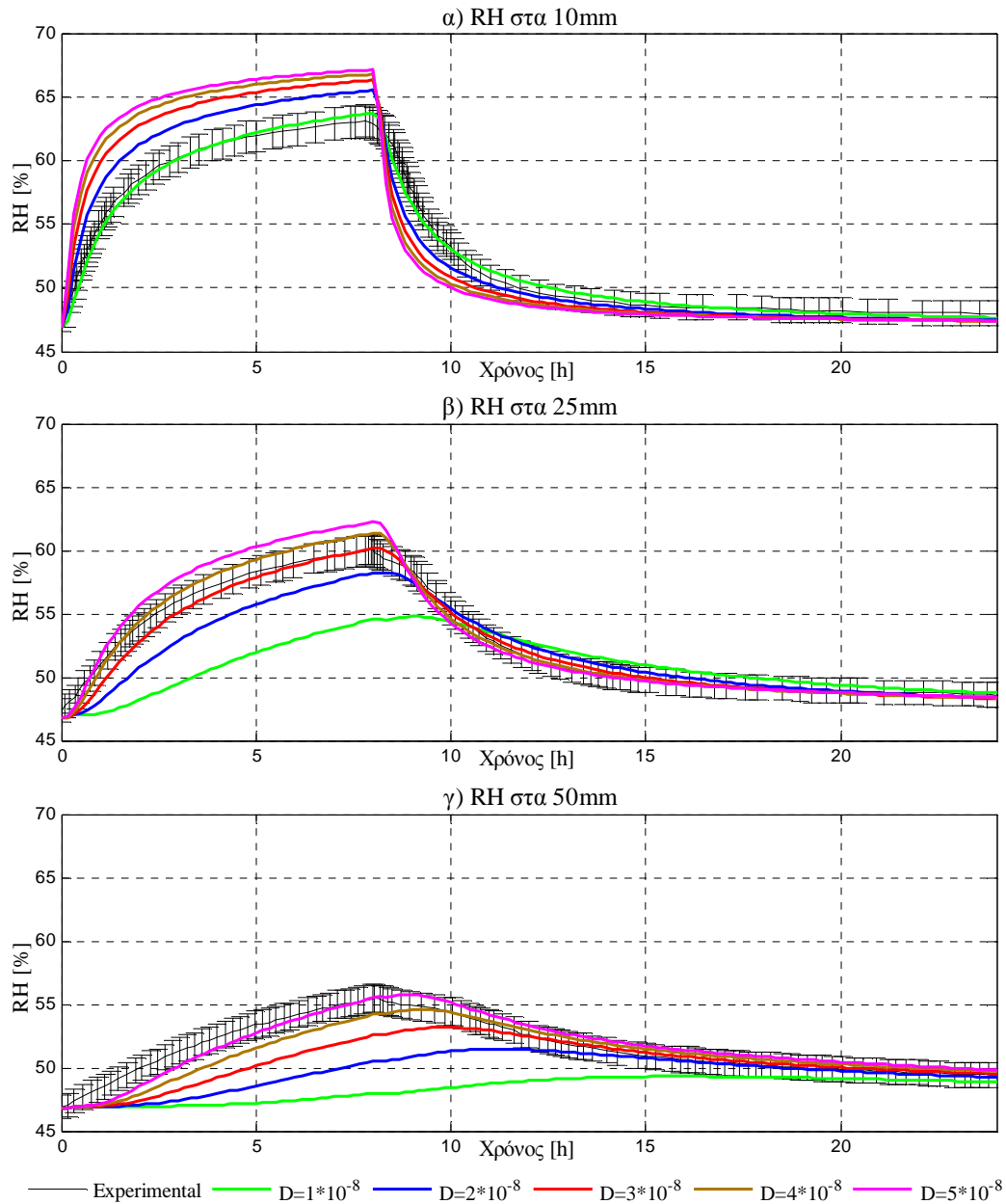
Σύμφωνα με τα παραπάνω, ως το καταλληλότερο για την επίλυση του προβλήματος της ροής του αέρα στο θάλαμο, και της μεταφοράς υγρασίας στο δοκίμιο επιλέγεται το μοντέλο των τριών διαστάσεων και του αραιού πλέγματος. Έτσι στη συνέχεια θα γίνει, η παραμετρική μελέτη, η πιστοποίηση και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων με χρήση του συγκεκριμένου πλέγματος.

4.4. Παραμετρική μελέτη: Συντελεστής διάχυσης υγρασίας

Κατά τη χρήση του μοντέλου παρατηρήθηκε η έντονη εξάρτηση των χρονικά μεταβαλλόμενων αποτελεσμάτων από το συντελεστή διάχυσης της υγρασίας, D (m^2/s), στο εσωτερικό του δοκιμίου. Ο συντελεστής αυτός εισέρχεται στο μοντέλο στην εξίσωση μεταφοράς μάζας, (εξίσωση 3.14) και έχει καθοριστική σημασία στην επίλυση των εξισώσεων.

Η ακριβή τιμή του συντελεστή διάχυσης της υγρασίας για το calcium silicate δεν ήταν γνωστή, για το λόγο αυτό έγινε παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές του. Αρχικά έγινε αναζήτηση στη βιβλιογραφία [45] και διευκρινίστηκε η τάξη μεγέθους του συντελεστή, $\sim 10^{-8}$ (m^2/s). Τα αποτελέσματα στην παραμετρική μελέτη του πλέγματος που προηγήθηκαν έγιναν όλα με συντελεστή διάχυσης $D_{porous}=2 \cdot 10^{-8}$ m^2/s , όπου αρχικά φαινόταν ότι έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στην παραμετρική μελέτη διατηρήθηκαν όλα τα μεγέθη (ιδιότητες υλικού, χαρακτηριστικά μοντέλου, επιλύτη και σύγκλισης) σταθερά και ίσα με τις τιμές που δόθηκαν στις ενότητες 4.1 και 4.2, ενώ διατηρήθηκε το μοντέλο τριών διαστάσεων με το αραιό πλέγμα το οποίο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, όπως εξηγήθηκε στην παραμετρική μελέτη πλέγματος (ενότητα 4.3).

Η παραμετρική μελέτη έγινε για τις τιμές του συντελεστή διάχυσης της υγρασίας στο εσωτερικό του πορώδους, $D_{porous}=1 \cdot 10^{-8}$, $2 \cdot 10^{-8}$, $3 \cdot 10^{-8}$, $4 \cdot 10^{-8}$ και $5 \cdot 10^{-8}$ m²/s. Τα αποτελέσματα σε σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζονται στην **Εικόνα 4.8**.



Εικόνα 4.8 - Διάγραμμα συσχέτισης του συντελεστή μοριακής διάχυσης με τις πειραματικές τιμές

Στον **Πίνακα 4.4** παρουσιάζονται τα σφάλματα που αντιστοιχούν σε κάθε τιμή του συντελεστή διάχυσης της υγρασίας, όπου έγινε η παραμετρική μελέτη. Ο υπολογισμός των σφαλμάτων έγινε σύμφωνα με την εξίσωση:

$$e = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{RH_{exp,i} - RH_{D,i}}{RH_{exp,i}} \right| \cdot 100\% \quad 4.2$$

Όπου $RH_{D,i}$ η τιμή της σχετικής υγρασίας από την εκάστοτε παραμετρική ανάλυση, $RH_{exp,i}$ η αντίστοιχη πειραματική τιμή και N το πλήθος των μετρήσεων.

Πίνακας 4.4 - Παρουσίαση σφαλμάτων παραμετρικής ανάλυσης

$D \times 10^{-8}$ (m ² /s)	10mm	25mm	50mm	Μέσος όρος
1	0.68	4.53	5.94	3.72
2	2.25	2.09	3.49	2.61
3	3.33	0.73	2.22	2.10
4	3.98	0.80	1.58	2.12
5	4.41	1.42	1.35	2.39

Από την **Εικόνα 4.8** παρατηρείται ότι δεν υπάρχει κάποιος συντελεστής διάχυσης D , ο οποίος να ακολουθεί τις πειραματικές μετρήσεις και για τα τρία σημεία. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις για το σημείο 10mm, ακολουθούνται από την καμπύλη για συντελεστή διάχυσης της υγρασίας $D_{porous} = 1 \cdot 10^{-8}$ m²/s, το σημείο στα 25mm από την καμπύλη για $D_{porous} = 3 \cdot 10^{-8}$ m²/s και για το σημείο στα 50mm από το συντελεστή για $D_{porous} = 5 \cdot 10^{-8}$ m²/s. Σε κάθε περίπτωση, οι μεγαλύτεροι συντελεστές από τους βέλτιστους υπερεκτιμούν τη σχετική υγρασία κατά τη φάση της απορρόφησης υγρασίας και οι μικρότεροι την υποεκτιμούν. Αντίθετα, κατά τη φάση της εκρόφησης υγρασίας, όλες οι καμπύλες είναι μέσα στο πειραματικό σφάλμα.

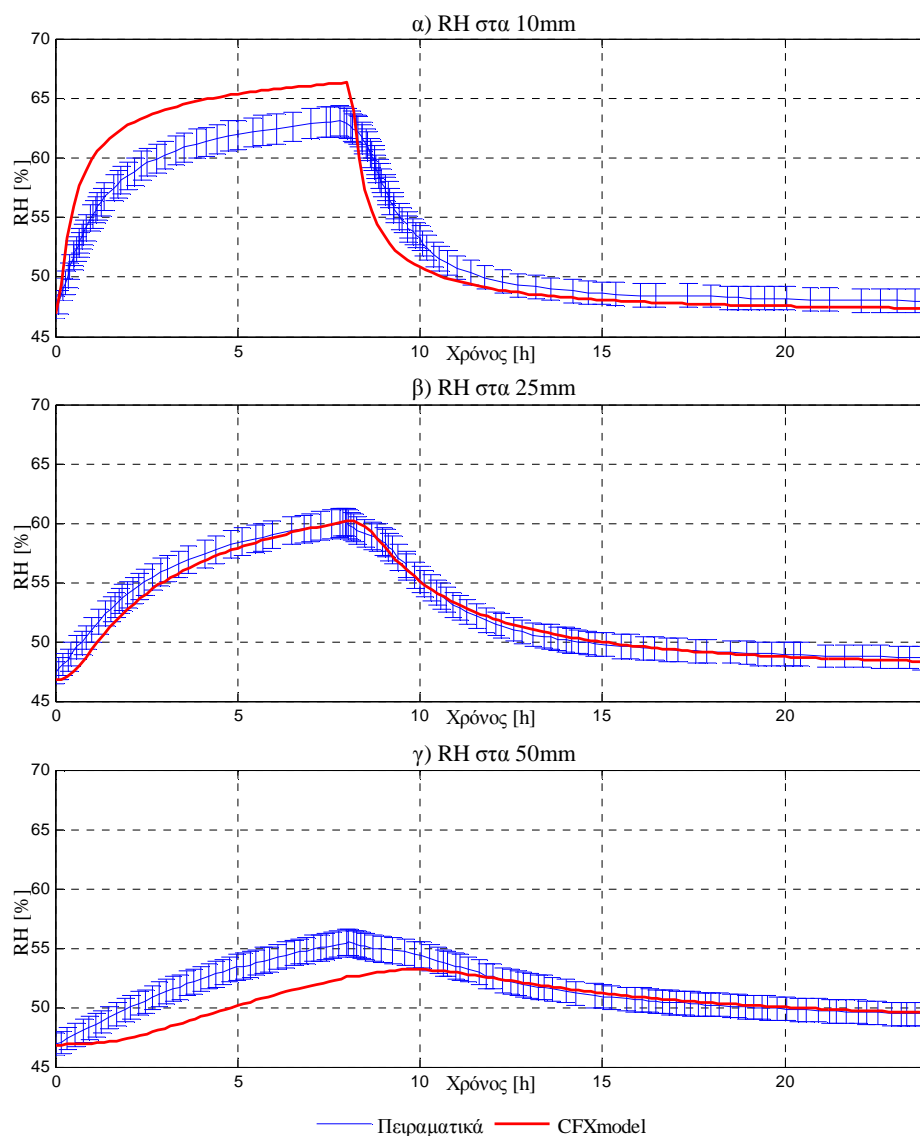
Το κριτήριο για την επιλογή του βέλτιστου συντελεστή διάχυσης είναι το σχετικό σφάλμα, e , που παρουσιάζεται στον **Πίνακα 4.4**. Το σφάλμα για κάθε καμπύλη που αντιστοιχεί σε ένα συντελεστή διάχυσης, D_{porous} , υπολογίζεται για καθένα από τα τρία σημεία από την εξίσωση **4.2** ενώ το μέσο σφάλμα είναι η μέση τιμή των σφαλμάτων των τριών σημείων για κάθε συντελεστή διάχυσης. Παρατηρείται ότι η βέλτιστη τιμή συντελεστή διάχυσης, αντιστοιχεί στην τιμή $D_{porous} = 3 \cdot 10^{-8}$ m²/s, όπου παρουσιάζει το μικρότερο μέσο σφάλμα $e = 2.10\%$.

4.5. Πιστοποίηση αποτελεσμάτων

Η πιστοποίηση του μοντέλου γίνεται με τη σύγκριση των υπολογιστικών τιμών που προκύπτουν από το μοντέλο με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις στα σημεία αυτά. Η πιστοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται για το 3D μοντέλο με το αραιό πλέγμα, όπου στην ενότητα **4.3** αιτιολογήθηκε πλήρως η επιλογή του από την παραμετρική μελέτη πλέγματος. Από την παραμετρική μελέτη, προέκυψε ότι ο βέλτιστος συντελεστής διάχυσης της υγρασίας

στο εξεταζόμενο υλικό, ισούται με $D=3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Συνεπώς η πιστοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε με βάση αυτό τον συντελεστή, και τις υπόλοιπες ιδιότητες του **Πίνακα 4.1** που δίνονται από τη δημοσίευση των πειραματικών μετρήσεων.

Τα μεγέθη τα οποία θα εξεταστούν για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων είναι η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του εξεταζόμενου δοκιμίου, στα σημεία 10mm, 25mm και 50mm από την επιφάνειά του καθώς επίσης και οι ταχύτητες στην είσοδο του θαλάμου, όπου και εκεί υπάρχουν μετρήσεις από τη δημοσίευση. Η **Εικόνα 4.9** παρουσιάζει τη σχετική υγρασία στα σημεία 10mm, 25mm και 50mm, που προκύπτει από την επίλυση του μοντέλου και τις πειραματικές τιμές.



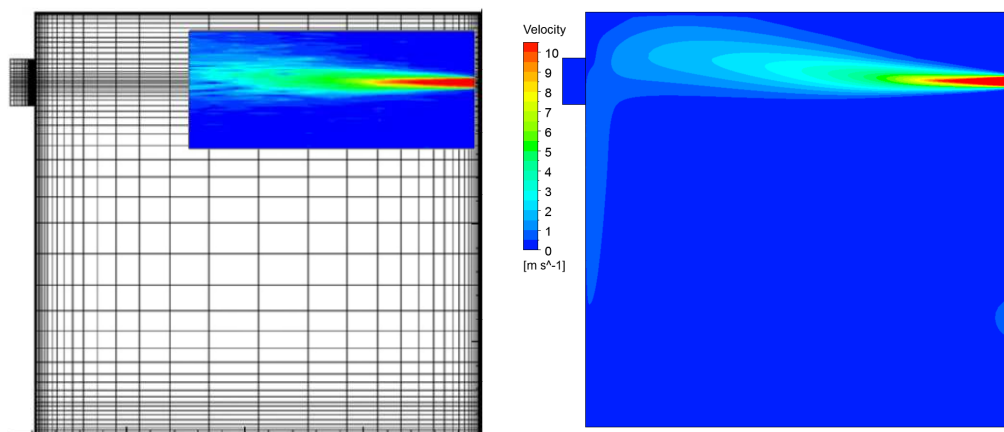
Εικόνα 4.9 - Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών τιμών για τη σχετική υγρασία στα σημεία a) 10mm, b) 25mm και c) 50mm

Από το διάγραμμα της πιστοποίησης της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του δοκιμίου, παρατηρείται ότι κατά τη φάση της αφύγρανσης του δοκιμίου, η σχετική υγρασία είναι στα όρια του πειραματικού σφάλματος για το σημείο των 10mm, ενώ συμπίπτει με τις μετρήσεις για τα σημεία 25mm και 50mm. Κατά την ύγρανση του δοκιμίου, για το σημείο των 10mm γίνεται μία υπερεκτίμηση της σχετικής υγρασίας έως και 9.6%, ενώ για το σημείο των 50mm υποεκτίμηση έως και 6.2%. Αντίθετα για το σημείο των 25mm οι εκτιμήσεις του μοντέλου είναι μέσα στο πειραματικό σφάλμα. Το συνολικό μέσο σφάλμα της εκτίμησης της υγρασίας για το σημείο των 10mm είναι ίσο με 3.3%, για των 25mm είναι 0.7% και για των 50mm είναι 2.2%, όπως είχαν παρουσιαστεί στην ενότητα 4.4 στον Πίνακα 4.4. Επομένως εκτιμάται ότι το μέσο σφάλμα υπολογισμού της σχετικής υγρασίας σε όλο το δοκίμιο είναι ίσο με 2.1%. Συγκριτικά, αναφέρεται ότι, στην ίδια δημοσίευση [69], ο συγγραφέας δημιούργησε ένα υπολογιστικό μοντέλο στο λογισμικό FLUENT, επίσης της ANSYS, αντίστοιχο με το μοντέλο του CFX που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία, στο οποίο τα αντίστοιχα σφάλματα υπολογισμού της για τις θέσεις 10mm, 25mm και 50mm είναι 1.0%, 2.3% και 3.0%. Το μέσο σφάλμα υπολογισμού για όλο το δοκίμιο ίσο με 2.1%, όσο ακριβώς και στο μοντέλο του CFX που δημιουργήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Πίνακας 4.5 - Σφάλματα υπολογισμού σχετικής υγρασίας δυο διαφορετικών λογισμικών

	10mm	25mm	50mm	Μέσος όρος
CFX	3.33	0.73	2.22	2.10
Fluent [69]	1.00	2.26	3.00	2.09

Το δεύτερο μέγεθος που πιστοποιήθηκε στο μοντέλο είναι η ταχύτητα του αέρα στο θάλαμο, όπου υπήρχαν μετρήσεις κοντά στην είσοδο του αέρα. Η Εικόνα 4.10 παρουσιάζει τις ισοεπιφάνειες των ταχυτήτων όπως προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου και τις πειραματικές τιμές.



Εικόνα 4.10 - Σύγκριση πειραματικών [69] και υπολογιστικών ισοεπιφανειών των ταχυτήτων του αέρα στο επίπεδο κάθετο της εισόδου

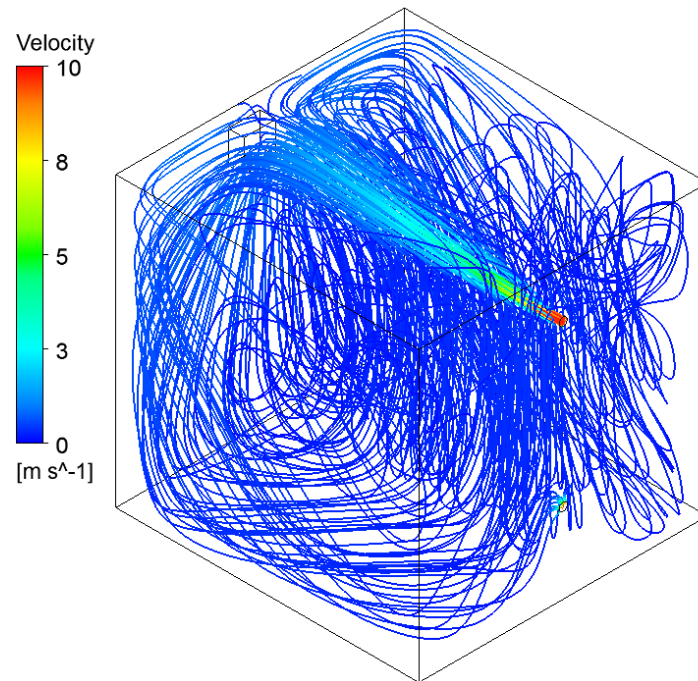
Από την **Εικόνα 4.10** παρατηρείται ότι υπάρχει συμφωνία των αποτελεσμάτων σχετικά με τις τιμές της ταχύτητας στο πεδίο εισόδου. Από την επίλυση του προβλήματος στο FLUENT από τη δημοσίευση [69], το contour των ταχυτήτων που προκύπτει για το συγκεκριμένο επίπεδο είναι πανομοιότυπο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα αποτελέσματα του μοντέλου που κατασκευάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, γενικά, έρχονται σε συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις της δημοσίευσης. Ως εκ τούτου, το μοντέλο αυτό είναι αποδεκτό για τη χρησιμοποίησή του και σε αντίστοιχα προβλήματα. Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου σε αντίστοιχο πρόβλημα μεταφοράς υγρασίας σε πραγματική πολυστρωματική τοιχοποιία.

4.6. Χαρακτηριστικά πεδίου ροής

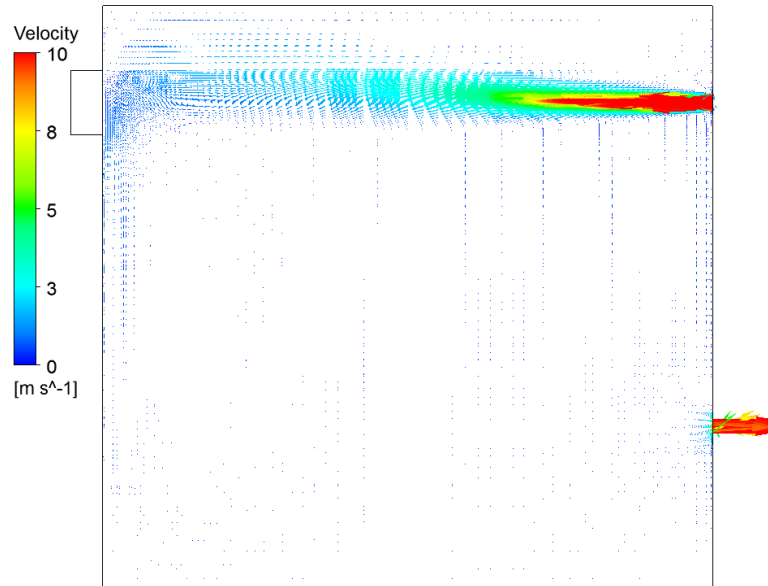
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται διάφορα αποτελέσματα του πεδίου ροής του αέρα στον πειραματικό θάλαμο και της μεταφοράς της υγρασίας στο δοκίμιο.

Στην **Εικόνα 4.11** παρουσιάζονται οι γραμμές ροής του υγρού αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου. Ο αέρας φαίνεται να εισέρχεται από την είσοδο με ταχύτητα 10m/s και προσκρούει στο απέναντι τοίχωμα που βρίσκεται το δοκίμιο με ταχύτητα περίπου 1m/s. Εκεί οι γραμμές ροής διαμοιράζονται συμμετρικά προς την αριστερή και τη δεξιά πλευρά όπου κινούνται με πολύ χαμηλές ταχύτητες (τάξης μεγέθους 0.1 m/s) σε ολόκληρο τον όγκο του θαλάμου. Ο αέρας εξέρχεται από την επιφάνεια (αγωγός) εξόδου με ταχύτητα 10m/s.



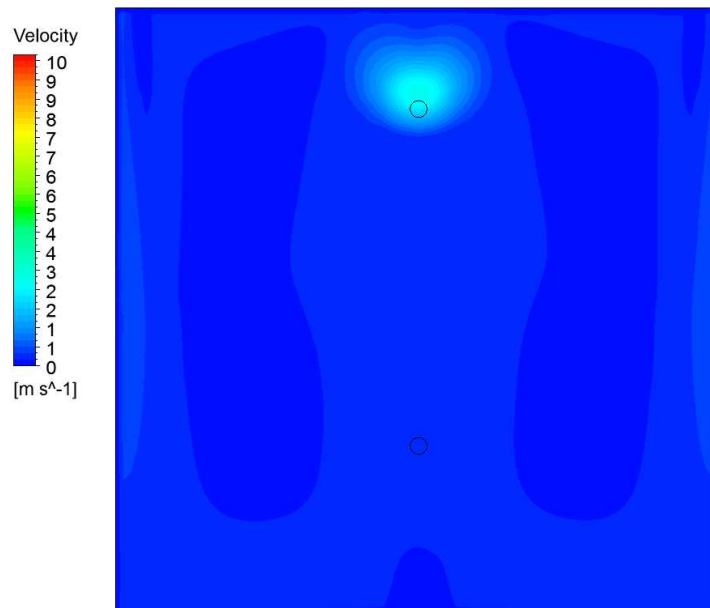
Εικόνα 4.11 - Οι γραμμές ροής στο θάλαμο αέρα

Το πεδίο ροής μπορεί να κατανοηθεί και από την **Εικόνα 4.12** όπου παρουσιάζονται τα διανύσματα των ταχυτήτων στο επίπεδο το οποίο είναι κάθετο στην είσοδο του αέρα. Ο αέρας εισέρχεται με τη μέγιστη ταχύτητα, 10m/s, και σε απόσταση περίπου 70cm η ταχύτητά του έχει μειωθεί στα 5m/s και στο 1m από την είσοδο στα 3m/s με κύρια συνιστώσα την ταχύτητα προς τη διεύθυνση x. Αφού ο αέρας προσκρούσει στο τοίχωμα, όπου βρίσκεται το δοκίμιο, ανακυκλοφορεί και οι ταχύτητες που παρουσιάζονται είναι πολύ μικρές εξαιτίας του μεγάλου όγκου του θαλάμου. Τέλος, ο αέρας εξέρχεται από το επίπεδο του αγωγού εξόδου με ταχύτητα 10m/s.



Εικόνα 4.12 - Τα διανύσματα των ταχυτήτων στο επίπεδο xy

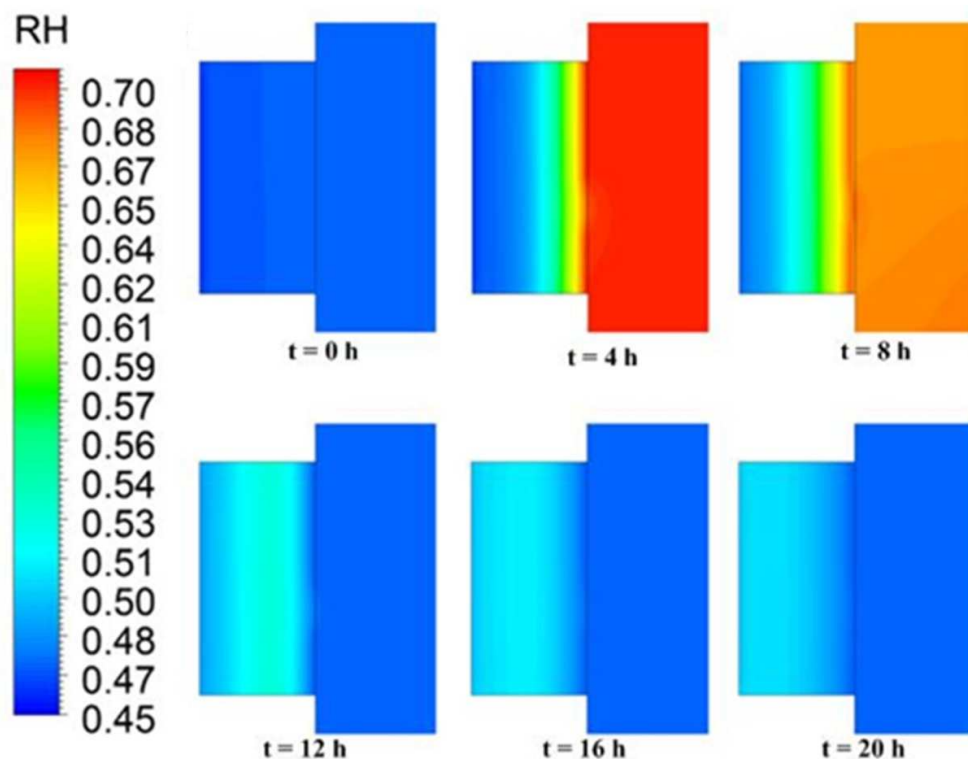
Η Εικόνα 4.13 παρουσιάζει τις ισοεπιφάνειες των ταχυτήτων στο επίπεδο yz στη μέση του μήκους (πλευρά 1.89m) του θαλάμου. Η κατανομή των ταχυτήτων παρουσιάζει μια συμμετρία στο επίπεδο xz το οποίο περνά από το κέντρο των αγωγών εισόδου και εξόδου. Οι μέγιστες ταχύτητες που παρουσιάζονται είναι έως 2.5m/s σε ύψος λίγο πάνω από το επίπεδο εισόδου του αέρα.



Εικόνα 4.13 - Ισοεπιφανειακή κατανομή των ταχυτήτων στο επίπεδο yz

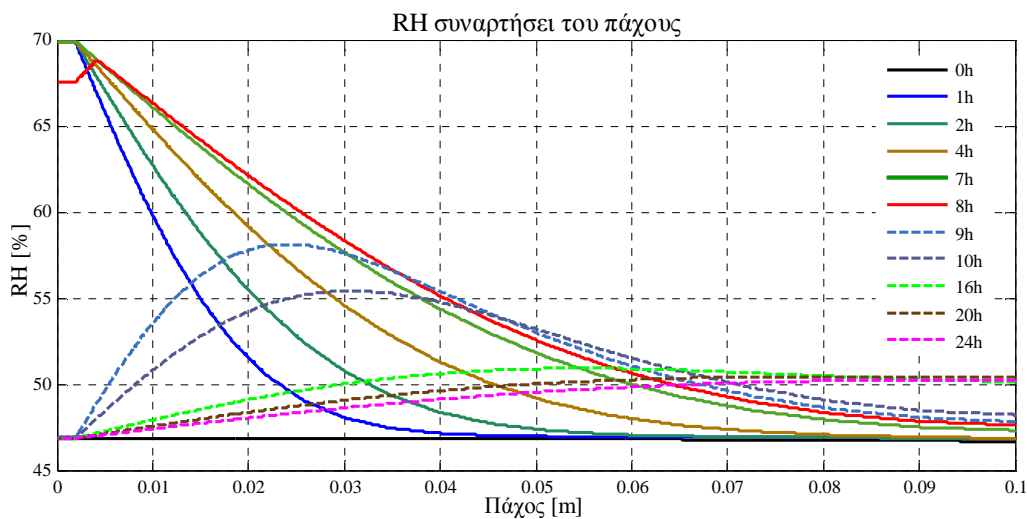
Στην Εικόνα 4.14 παρουσιάζονται οι ισοεπιφάνειες της σχετικής υγρασίας στο επίπεδο yz στη μέση του πλάτους του δοκιμίου σε διάφορες χρονικές στιγμές. Τη χρονική

στιγμή $t=0h$, όπου ξεκινάει η πειραματική διαδικασία, τόσο το δοκίμιο, όσο και ο αέρας του θαλάμου έχουν σχετική υγρασία ίση με 47% σε θερμοκρασία 25°C, εξαιτίας των συνθηκών που επιβλήθηκαν πριν την εκκίνηση του πειράματος. Εκείνη τη χρονική στιγμή η σχετική υγρασία του αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο γίνεται ίση με 70% σε θερμοκρασία πάντα 25°C. Μετά από 4h η σχετική υγρασία του αέρα στο θάλαμο είναι 70%, ενώ στο δοκίμιο σταδιακά αυξάνεται, από 47% που είναι στην πίσω επιφάνεια σε 70% στην επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τον αέρα του θαλάμου. Να σημειωθεί ότι για πάχος μεγαλύτερο του μισού του δοκιμίου η σχετική υγρασία είναι κάτω από 50%. Τη χρονική στιγμή $t=8h$, η σχετική υγρασία του θαλάμου αλλάζει ακαριαία και γίνεται 47% (όπως την $t=0h$) ενώ η υγρασία στο δοκίμιο προχωράει προς την πίσω πλευρά. Τη χρονική στιγμή $t=12h$, η σχετική υγρασία του αέρα στο θάλαμο είναι παντού 47%, ενώ η υγρασία στο δοκίμιο έχει εξαπλωθεί στο εσωτερικό του και είναι περίπου 52%. Τις χρονικές στιγμές $t=16h$ και $t=20h$ η σχετική υγρασία του δοκιμίου έχει προχωρήσει προς την πίσω πλευρά, ενώ κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με τον αέρα του θαλάμου η σχετική υγρασία μειώνεται και παραμένει στο 47%.



Εικόνα 4.14 - Ισοεπιφάνειες της σχετικής υγρασίας του δοκιμίου για διάφορες χρονικές στιγμές στο επίπεδο xy

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και από το διάγραμμα της **Εικόνα 4.15**, στο οποίο παρουσιάζονται οι σχετικές υγρασίες κατά το πάχος του δοκιμίου για διάφορες χρονικές στιγμές. Τη χρονική στιγμή $t=0$ η σχετική υγρασία είναι σταθερή σε όλο το πάχος του δοκιμίου και ίση με 47%, ενώ μία ώρα μετά, όπου η σχετική υγρασία του αέρα του θαλάμου αυξάνεται ακαριαία σε 70% η υγρασία έχει εισχωρήσει μέχρι τα 50mm του δοκιμίου και τα πρώτα 10mm να έχουν υγρασία μεγαλύτερη από 60%. Για το χρονικό διάστημα μέχρι τη στιγμή $t=8h$, όπου η σχετική υγρασία του θαλάμου γίνεται 47%, η υγρασία μετατοπίζεται όλο και περισσότερο. Σε κάθε περίπτωση, ο ρυθμός μείωσης είναι μεγάλος στα πρώτα mm και όσο αυξάνεται το βάθος, τόσο μειώνεται ο ρυθμός. Στην άλλη πλευρά του δοκιμίου η αλλαγή της υγρασίας έχει φτάσει μετά από 5h. Για τις χρονικές στιγμές μετά τη μείωση της σχετικής υγρασίας του θαλάμου, η υγρασία στα πρώτα mm του δοκιμίου μειώνεται (κάτω από 53% για τα πρώτα 10mm μία ώρα μετά τη μεταβολή της σχετικής υγρασίας του θαλάμου), ενώ η υγρασία σε βάθος μεγαλύτερο των 70mm συνεχίζει να αυξάνεται ακόμη και την $t=24h$.



Εικόνα 4.15 - Η σχετική υγρασία κατά το πάχος του δοκιμίου σε διάφορες χρονικές στιγμές

5. Προσομοίωση φαινομένου μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε πειραματικό οικίσκο

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η εφαρμογή του μοντέλου που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 και πιστοποιήθηκε στο κεφάλαιο 4, σε πραγματική πολυστρωματική τοιχοποιία.

5.1. Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η εφαρμογή του μοντέλου γίνεται σε έναν πειραματικό οικίσκο (mock up) που ανήκει στο εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ο οικίσκος που μελετάται είναι ένα δώροφο κτίριο με κέλυφος ξηράς δόμησης βασισμένο σε ένα σύστημα τοιχοποιιών με διάκενο με ενσωματωμένο σύστημα εξωτερικής θερμικής μόνωσης. Η μεθοδολογία κατασκευής ακολουθεί τους κανονισμούς του Eurocode 3 [73], που ισχύουν σε κτίρια χαλύβδινου σκελετού. Ο σχηματισμός, το πάχος των επί μέρους στρώσεων του κελύφους, καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα ίδια με αυτά των κτιρίων πλήρους κλίμακας. Οι εξωτερικές διαστάσεις του πειραματικού οικίσκου είναι $3.65\text{m} \times 3.65\text{m} \times 7.53\text{m}$.



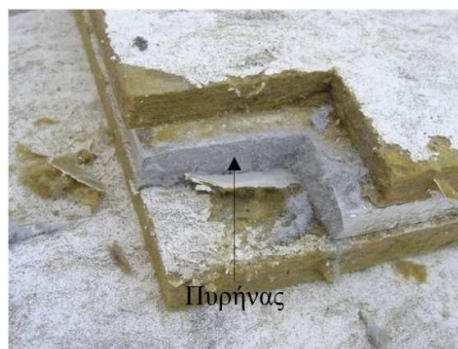
Εικόνα 5.1 - Άποψη του πειραματικού οικίσκου (mock up) και ο μεταλλικός σκελετός του

Η κατασκευή του οικίσκου είναι βασισμένη σε ένα σύστημα ελαφριού σκελετού από χάλυβα (τμήματα ψυχρής διαμόρφωσης) συμπληρωμένη με συστήματα ξηρής δόμησης και κεκλιμένη οροφή με επένδυση OSB. Ο χαλύβδινος σκελετός είναι στερεωμένος σε τσιμεντένια βάση και αποτελείται κυρίως από δοκούς σχήματος Η. Μεταλλικοί δρομείς και ορθοστάτες είναι στερεωμένοι στο σκελετό για τη σύνδεση των γυψοσανίδων και των τσιμεντοσανίδων επικαλύπτοντας τον σκελετό, εσωτερικά και εξωτερικά αντίστοιχα, και δημιουργώντας την τοιχοποιία. Ο άξονας συμμετρίας του οικίσκου είναι ευθυγραμμισμένος με τα σημεία του ορίζοντα, με την είσοδο να έχει δυτικό προσανατολισμό.

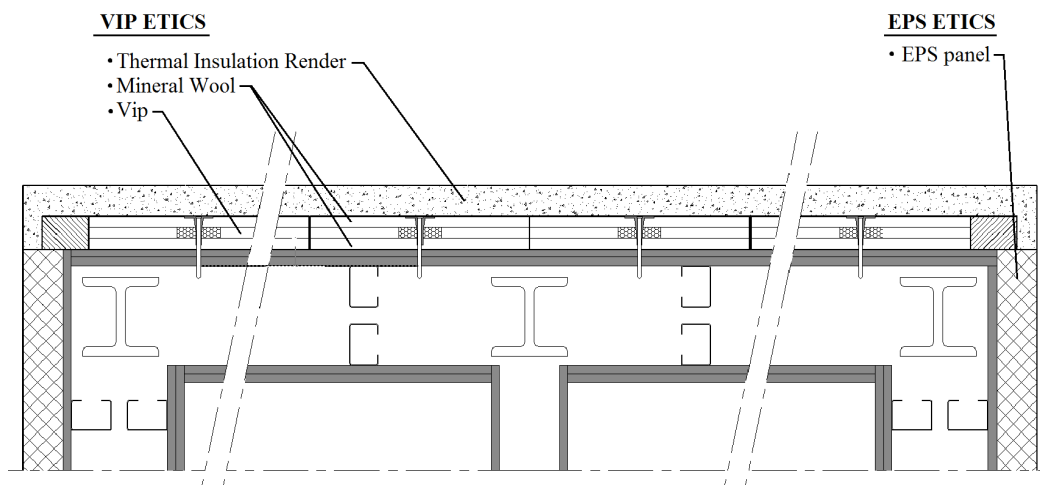
Στο κέλυφος του οικίσκου είναι εγκατεστημένα δύο ειδών συστήματα εξωτερικής θερμικής μόνωσης: ένα συμβατικό θερμομονωτικό σύστημα που χρησιμοποιεί πολυστερίνη (EPS) ως μονωτικό υλικό (**Εικόνα 5.2**) και ένα σύστημα βασισμένο στα υπέρ-μονωτικά (superinsulator) VIPs, ενσωματωμένα σε ένα σύνθετο μονωτικό στρώμα αποτελούμενο από δύο στρώσεις πετροβάμβακα (mineral wool) και ενδιάμεσά τους η στρώση των VIPs (**Εικόνα 5.3**). Οι δύο στρώσεις πετροβάμβακα μαζί με τη στρώση του VIP συγκροτούν το σύνθετο μονωτικό στρώμα των VIP sandwich. Το σύστημα των VIPs μονώνει τη βόρεια τοιχοποιία του οικίσκου, ενώ οι υπόλοιπες τοιχοποιίες, όπως επίσης και η στέγη, μονώνονται με τη συμβατική μόνωση. Η **Εικόνα 5.4** - Τομή των τοιχοποιιών του πειραματικού οικίσκου [10] παρουσιάζει σε τομή τις τοιχοποιίες του πειραματικού οικίσκου.



Εικόνα 5.2 - EPS πάνελ



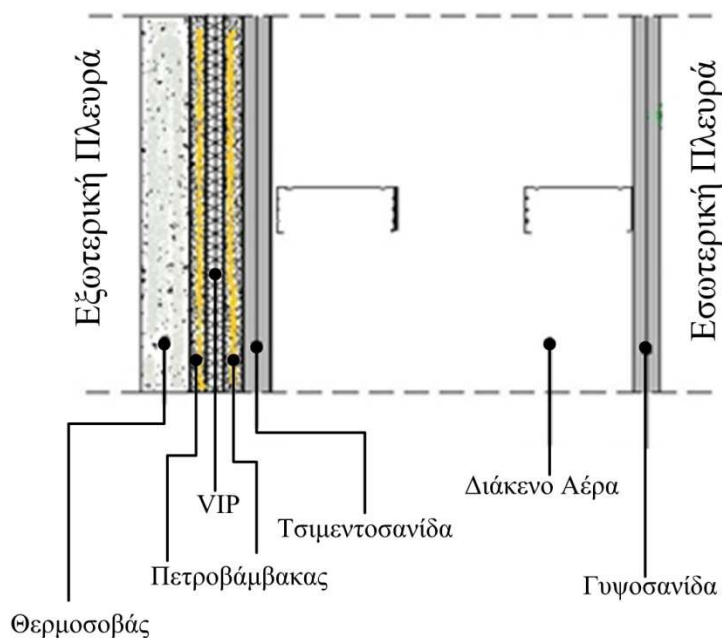
Εικόνα 5.3 - Τομή των VIP sandwich



Εικόνα 5.4 - Τομή των τοιχοποιιών του πειραματικού οικίσκου [10]

5.2. Περιγραφή τοιχοποιίας

Η παρούσα εργασία, επικεντρώνεται στη μεταφορά θερμότητας και μάζας διαμέσου της βόρειας τοιχοποιίας του πειραματικού οικίσκου που είναι βασισμένη στο σύστημα των VIPs. Η τοιχοποιία, συνολικού πάχους 365.5mm, είναι μια πολυστρωματική τοιχοποιία που περιλαμβάνει το εξωτερικό τμήμα, το εσωτερική τμήμα και ένα ενδιάμεσο διάκενο αέρα πάχους 190mm. Το εξωτερικό τμήμα αποτελείται από το σύστημα εξωτερικής θερμικής μόνωσης προσκολλημένο με ειδική κόλλα (bonding mortar) πάνω στη στρώση τσιμεντοσανίδων πάχους 25mm. Το σύστημα εξωτερικής θερμικής μόνωσης αποτελείται από 50mm ειδικού θερμοσοβά και το σύνθετο μονωτικό στρώμα (sandwich) των VIPs πάχους 20mm μεταξύ δύο στρώσεων από πετροβάμβακα των 20mm. Για τη συγκράτηση του θερμοσοβά στην τοιχοποιία, χρησιμοποιήθηκε ειδική κόλλα (πάχους περίπου 5mm) πάνω στο μονωτικό στρώμα πετροβάμβακα – VIP – πετροβάμβακα (sandwich). Τέλος, εξωτερικό αντιαλκαλικό πλέγμα ενίσχυσης, μία στρώση συμπολυμερές, αστάρι εξωτερικής χρήσης και διακοσμητικό επίχρισμα συνολικού πάχους περίπου 5.5mm χρησιμοποιήθηκαν για στην εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας. Η Εικόνα 5.5 παρουσιάζει τη βόρεια τοιχοποιία σε τομή, με τα διάφορα στρώματα των δομικών υλικών.



Εικόνα 5.5 - Τοιχοποιία VIP σε τομή

Η εσωτερική πλευρά της τοιχοποιίας αποτελείται από δύο στρώσεις απλής γυψοσανίδας, πάχους 12.5mm η κάθε μία, αρμολογημένες με συνδετικό κονίαμα και επιπλέον χρήση χαρτοταινίας αρμού. Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει το πάχος και τις ιδιότητες κάθε στρώσης που υπάρχει στην τοιχοποιία. Η εσωτερική και η εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας εδράζεται πάνω σε κατακόρυφους ορθοστάτες διαστάσεων 75×50×0.6 cm σε απόσταση 400mm μεταξύ τους και σε οριζόντιους στρωτήρες διαστάσεων 75×40×0.6 cm.

Πίνακας 5.1 - Ιδιότητες υλικών της τοιχοποιίας VIP

	Πάχος (mm)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Ειδική Θερμοχωρητικότητα (J/kgK)	Ανοιχτό πορώδες (-)
Επίχρισμα	5.5	0.415	1176	1000	0.22
Θερμοσοβάς	50	0.065	1600	1000	0.7
Συνδετικό κονίαμα	5	0.610	1600	1000	0.327
Πετροβάμβακας	20	0.035	120	1000	0.966
VIP	20	0.016 [10]	180	850	-
Τσιμεντοσανίδα	25	0.360	1150	1000	0.327
Γυψοσανίδα	25	0.183	810	1000	0.7

Τα VIPs εδράζονται πάνω στην τοιχοποιία με τη χρήση ειδικών κοχλιών που διαπερνούν τα panels. Για το σκοπό αυτό, τα VIPs είναι ειδικά κατασκευασμένα με δύο κυκλικές οπές διαμέτρου 75mm γεμισμένες με πολυστερίνη (EPS) επιτρέποντας στον κοχλία να διαπεράσει το VIP χωρίς να επηρεάσει τη μεμβράνη σφραγίσεως. Η συγκράτησή τους

γίνεται με δύο κοχλίες (διαμέτρου 4.2mm και μήκους 80mm) σε PVC περίβλημα για κάθε panel. Τα VIPs που χρησιμοποιούνται στο σύστημα εξωτερικής μόνωσης περιλαμβάνουν πυρήνα πυρογενούς πυριτίου τυλιγμένο σε τρεις στρώσεις μεταλλικής μεμβράνης. Από μία στρώση πετροβάμβακα, τοποθετείται εκατέρωθεν των VIPs, συγκροτώντας έτσι τα VIP sandwich. Οι δύο στρώσεις του πετροβάμβακα προσδίδουν μια επιπλέον προστασία στο VIP από μηχανικές καταστροφές της μεμβράνης. Οι διαστάσεις των panel είναι 60cm μήκους, 40cm ύψους και 60mm πάχους (20mm για κάθε στρώση). Η **Εικόνα 5.3** παρουσιάζει την τομή των VIPs sandwich και η **Εικόνα 5.6** μια άποψη από την τοποθέτησή τους στην βόρεια τοιχοποιία του οικίσκου.



Εικόνα 5.6 - Άποψη από την τοποθέτηση των VIPs στην τοιχοποιία

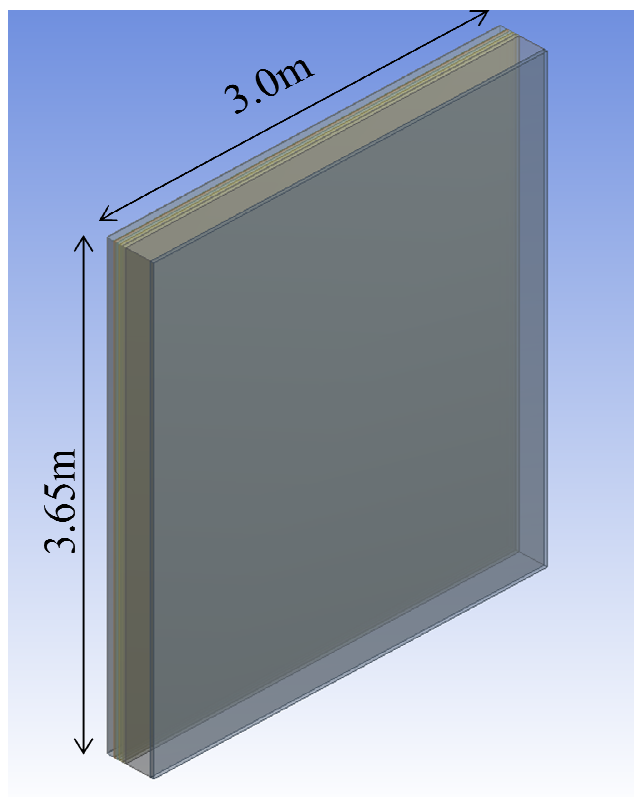
5.3. Υπολογιστικές λεπτομέρειες

Το μοντέλο μεταφοράς θερμότητας και μάζας που αναπτύχθηκε και πιστοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της βόρειας τοιχοποιίας του ισόγειου του πειραματικού οικίσκου. Στην παρούσα ενότητα δίνονται λεπτομέρειες για την γεωμετρία που επιλύεται, το υπολογιστικό πλέγμα και τη μοντελοποίηση με τις παραδοχές και τις οριακές συνθήκες που λήφθηκαν υπόψη, για την επίλυση του προβλήματος

5.3.1. Γεωμετρία

Η γεωμετρία που μοντελοποιείται είναι ολόκληρη η βόρεια τοιχοποιία του ισόγειου του πειραματικού οικίσκου και επιλύονται τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας μόνο στο εσωτερικό της. Χρησιμοποιείται μοντέλο τριών διαστάσεων $0.3655\text{m} \times 3\text{m} \times 3.65\text{m}$ ($x \times y \times z$), όπου προσομοιώνονται όλες οι στρώσεις της τοιχοποιίας, εσωτερικού και εξωτερικού τμήματος συμπεριλαμβανομένου και του διακένου αέρα. Οι στρώσεις όλες

θεωρήθηκαν ομοιόμορφες και δεν προσομοιώθηκαν ο μεταλλικός σκελετός, οι ορθοστάτες και οι αρμοί που τυχόν υπάρχουν στις ενώσεις των panel κάθε στρώσης. Η **Εικόνα 5.7** παρουσιάζει τη γεωμετρία που κατασκευάστηκε σε περιβάλλον του λογισμικού ANSYS Geometry.

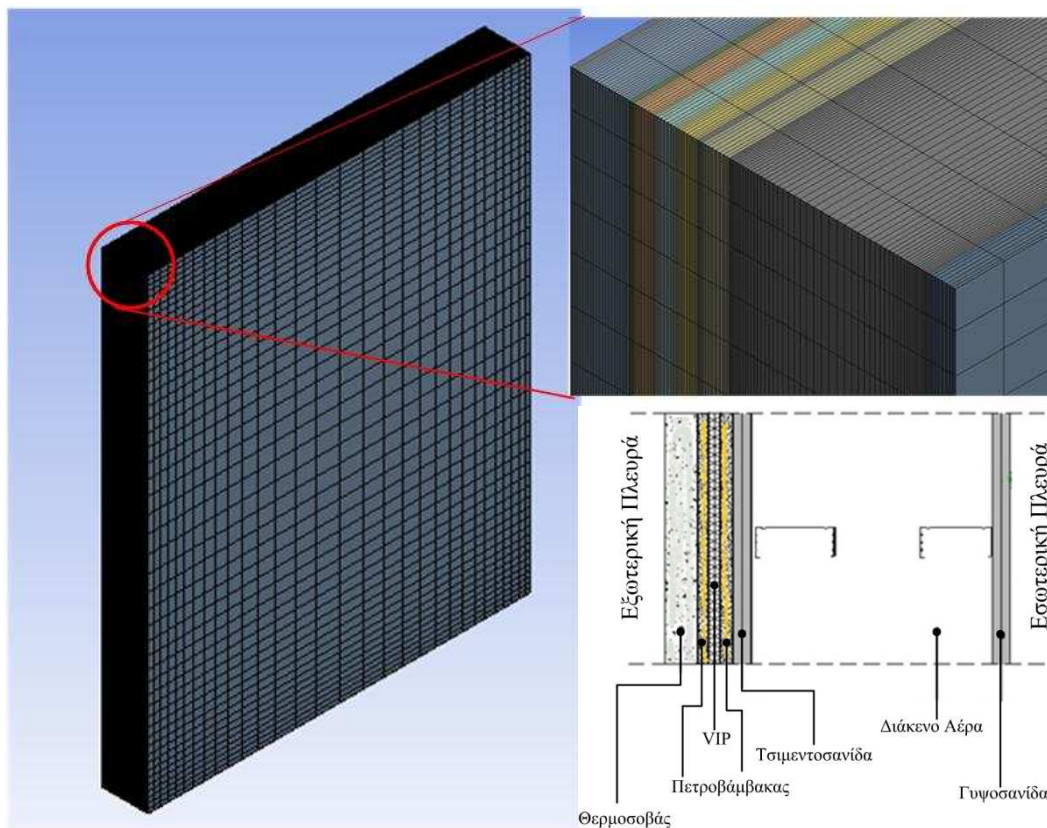


Εικόνα 5.7 - Η γεωμετρία της τοιχοποιίας του πειραματικού οικίσκου

5.3.2. Υπολογιστικό Πλέγμα

Το υπολογιστικό πλέγμα της γεωμετρίας κατασκευάστηκε στο MESH του ANSYS. Το πλέγμα της τοιχοποιίας που δημιουργήθηκε είναι ένα δομημένο πλέγμα 189100 κόμβων και 177870 στοιχείων ($x \times y \times z$: $121 \times 49 \times 30$). Έγινε τοπική πύκνωση στις πλευρές του διακένου που συνορεύουν με τα στρώματα της τοιχοποιίας, εξαιτίας της αναμενόμενης μεγάλης κλίσης της ταχύτητας του αέρα και της δημιουργίας οριακού στρώματος. Επίσης, πύκνωση έγινε και στις πλευρές όλων των στρώσεων της τοιχοποιίας όπου εισάγεται η αδιαβατική οριακή συνθήκη. Κατά το πάχος κάθε στρώσης της τοιχοποιίας δημιουργήθηκαν το λιγότερο πέντε κόμβοι, ενώ η μέση απόσταση δύο κόμβων κατά το πάχος μιας πορώδους στρώσης είναι 3mm και η ελάχιστη 1.2mm, και για το διάκενο η ελάχιστη απόσταση δύο

κόμβων κατά το πάχος είναι 1.5mm και η μέγιστη 7mm. Οι τιμές αυτές είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές του πλέγματος που επιλέχθηκε στην παραμετρική μελέτη της ενότητας 4.3, εξαιτίας του μικρού πάχους των στρώσεων της τοιχοποιίας σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις των πορωδών υλικών. Το υπολογιστικό πλέγμα της προσομοίωσης της τοιχοποιίας παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5.8**.



Εικόνα 5.8 - Το υπολογιστικό πλέγμα της τοιχοποιίας του VIP

5.3.3. Μοντελοποίηση – Παραδοχές

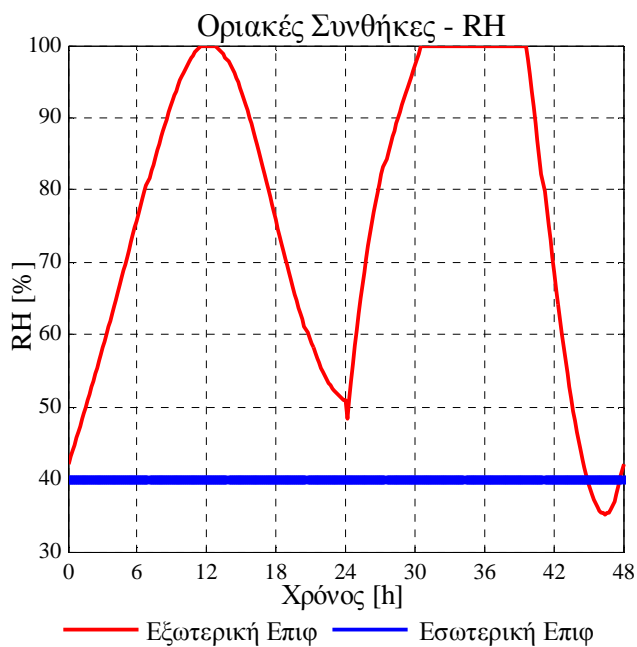
Η προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας στη βόρεια τοιχοποιία του ισόγειου του πειραματικού οικίσκου έγινε με χρήση του μοντέλου του λογισμικού CFX του ANSYS 14.0, που αναπτύχθηκε και πιστοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Εξετάζεται η συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα δυο ημερών και σταθερών συνθηκών θερμικής άνεσης στο εσωτερικό της.

Όλα τα στρώματα της τοιχοποιίας, εκτός από το VIP, θεωρήθηκαν πορώδη υλικά με ιδιότητες που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.1**. Τα VIPs θεωρήθηκαν στερεά και

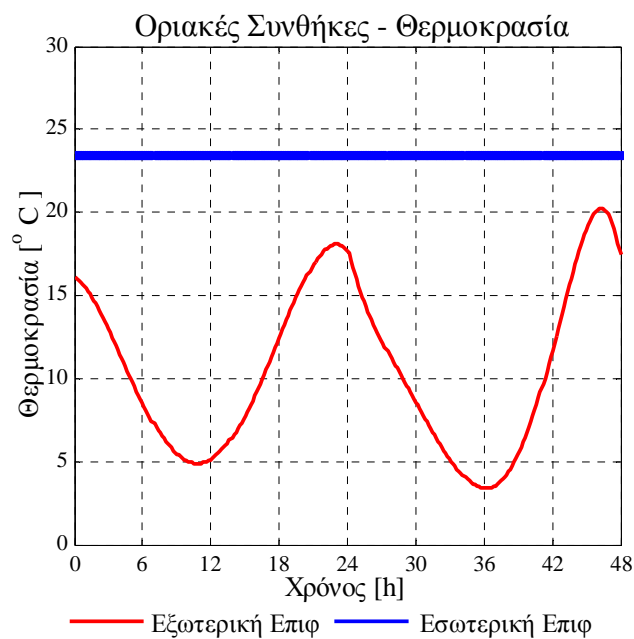
αδιαπέραστα εξαιτίας του αδιαπέραστου μεταλλικού περιβλήματος των πανέλων. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λήφθηκε τέτοιος, ώστε να λαμβάνει υπόψη και όλες τις θερμογέφυρες που εμφανίζονται στα VIPs [10]. Η διαπερατότητα των πορωδών υλικών στην υγρασία θεωρήθηκε ίση με $K_{perm}=2 \cdot 10^{-20} m^2$ [72], ο συντελεστής αντίστασης λήφθηκε ίσος με $K_{loss}=10 m^{-1}$, η διεπιφάνεια πόρων και στερεού ανά m^3 ίση με $23 m^{-1}$ και ο συντελεστής διεπιφανειακής μεταφοράς θερμότητας θεωρήθηκε ίσος με $h=10 W/m^2 K$. Η μοριακή διάχυση των υλικών θεωρήθηκε ίση με $D=3 \cdot 10^{-8} m^2/s$, τιμή η οποία άνηκε στο εύρος που προτείνεται από τη βιβλιογραφία [45] και ήταν το αποτέλεσμα της παραμετρικής μελέτης της ενότητας 4.4 για το υλικό calcium silicate. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τύρβης SST κυρίως για τις ανωστικές ροές στο διάκενο της τοιχοποιίας, ενώ απειρίζοντας τον αριθμό Sc_t στις περιοχές των πορωδών υλικών, το μοντέλο δε λαμβάνει υπόψη του την τύρβη στις περιοχές αυτές.

Οι παράπλευρες επιφάνειες, όπως επίσης και τα άνω και κάτω όρια των στρώσεων της τοιχοποιίας θεωρήθηκαν ως αδιαβατικά τοιχώματα. Στην εσωτερική επιφάνεια της στρώσης της γυψοσανίδας, καθώς επίσης και στην εξωτερική επιφάνεια του τελικού επιχρίσματος, επιβλήθηκαν ανοιχτές οριακές συνθήκες (opening) σχετικής πίεσης $p=0 Pa$ και συγκεκριμένες θερμοκρασιακές κατανομές και ειδικής υγρασίας. Οι οριακές συνθήκες επιβλήθηκαν στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας, δηλαδή στην μια (την εσωτερική) επιφάνεια της γυψοσανίδας και στη μία (την εξωτερική) επιφάνεια του εξωτερικού επιχρίσματος, θεωρώντας πως οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας που επικρατούν στον αέρα, επικρατούν και στις δύο αυτές επιφάνειες. Για τις εσωτερικές συνθήκες θεωρήθηκε σταθερή θερμοκρασία ίση με $T=23.5 \text{ }^\circ C$ και σχετική υγρασία ίση με $RH=40\%$, συνθήκες θερμικής άνεσης σύμφωνα με την ASHRAE [74]. Οι συνθήκες της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας που επιβλήθηκαν παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5.9** και την **Εικόνα 5.10** με τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία αντίστοιχα.

Για την μείωση των σφαλμάτων στρογγυλοποίησης χρησιμοποιήθηκε δεύτερης τάξεως ακρίβεια. Επιλέχθηκε κριτήριο σύγκλισης $RMS 10^{-5}$. Για την επίλυση του χρονικά μεταβαλλόμενου προβλήματος χρησιμοποιήθηκε χρονικό βήμα ίσο με 10s.



Εικόνα 5.9 - Εξωτερικές και εσωτερικές οριακές συνθήκες σχετικής υγρασίας



Εικόνα 5.10 - Εξωτερικές και εσωτερικές οριακές συνθήκες θερμοκρασίας

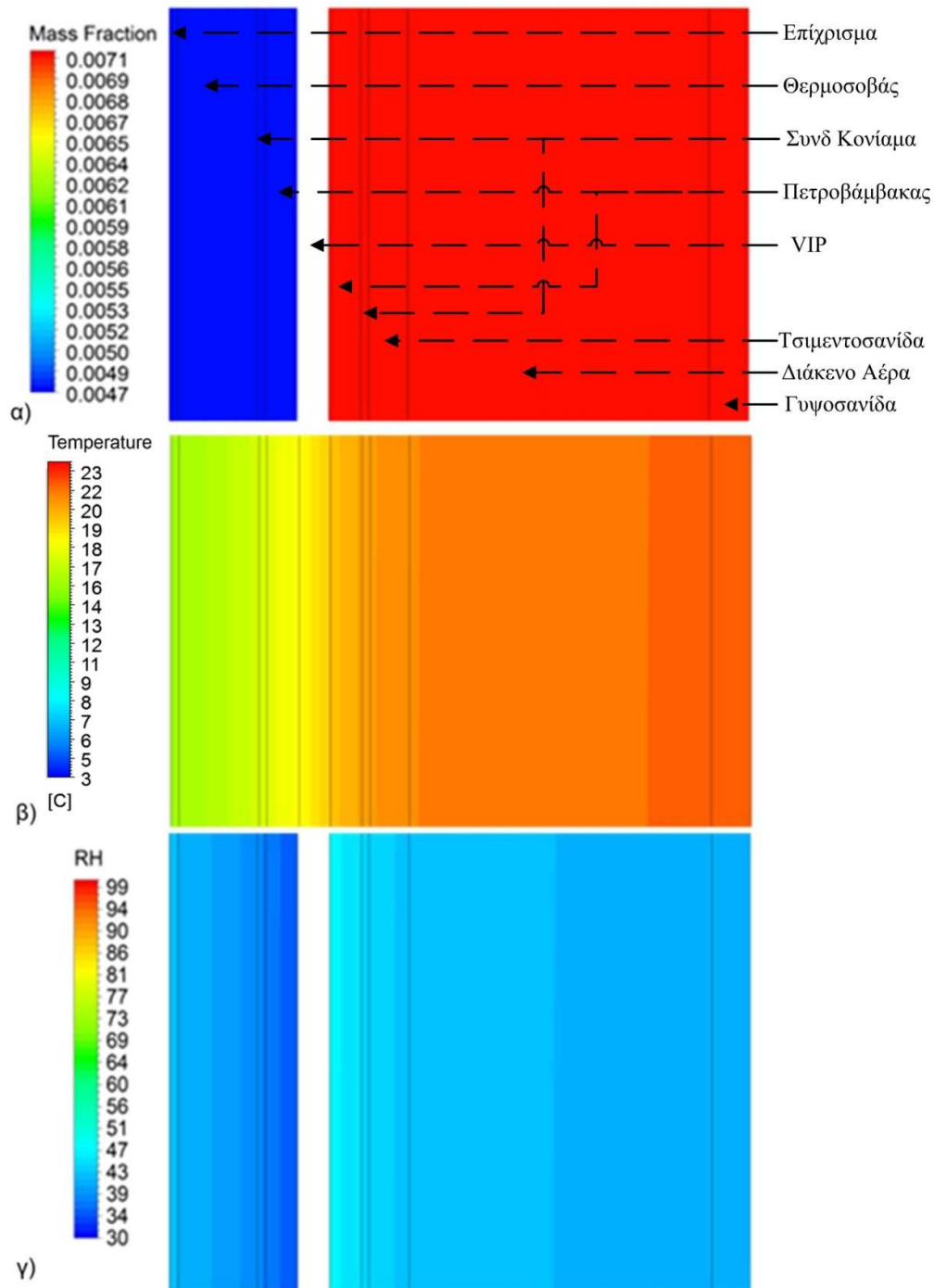
5.4. Χαρακτηριστικά πεδίου ροής

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας στην πολυστρωματική τοιχοποιία του

πειραματικού οικίσκου. Η τοιχοποιία προσομοιώθηκε για 48 ώρες επιβάλλοντας εξωτερικές πραγματικές συνθήκες και εσωτερικές συνθήκες άνεσης. Στο πρώτο 24ωρο επιλέχθηκε μια ημέρα με υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας, ενώ στο δεύτερο επιλέχθηκε μια αρκετά βροχερή ημέρα με σκοπό την ενεργοποίηση του μοντέλου συμπύκνωσης.

Πριν την εκκίνηση του χρονικά μεταβαλλόμενου προβλήματος, επιλύθηκε ένα steady state πρόβλημα με σταθερές εσωτερικές ($T=24^{\circ}\text{C}$ και $RH=38\%$) και εξωτερικές συνθήκες ($T=15^{\circ}\text{C}$ και $RH=40\%$), ώστε να χρησιμοποιηθεί ως αρχική συνθήκη για το χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα.

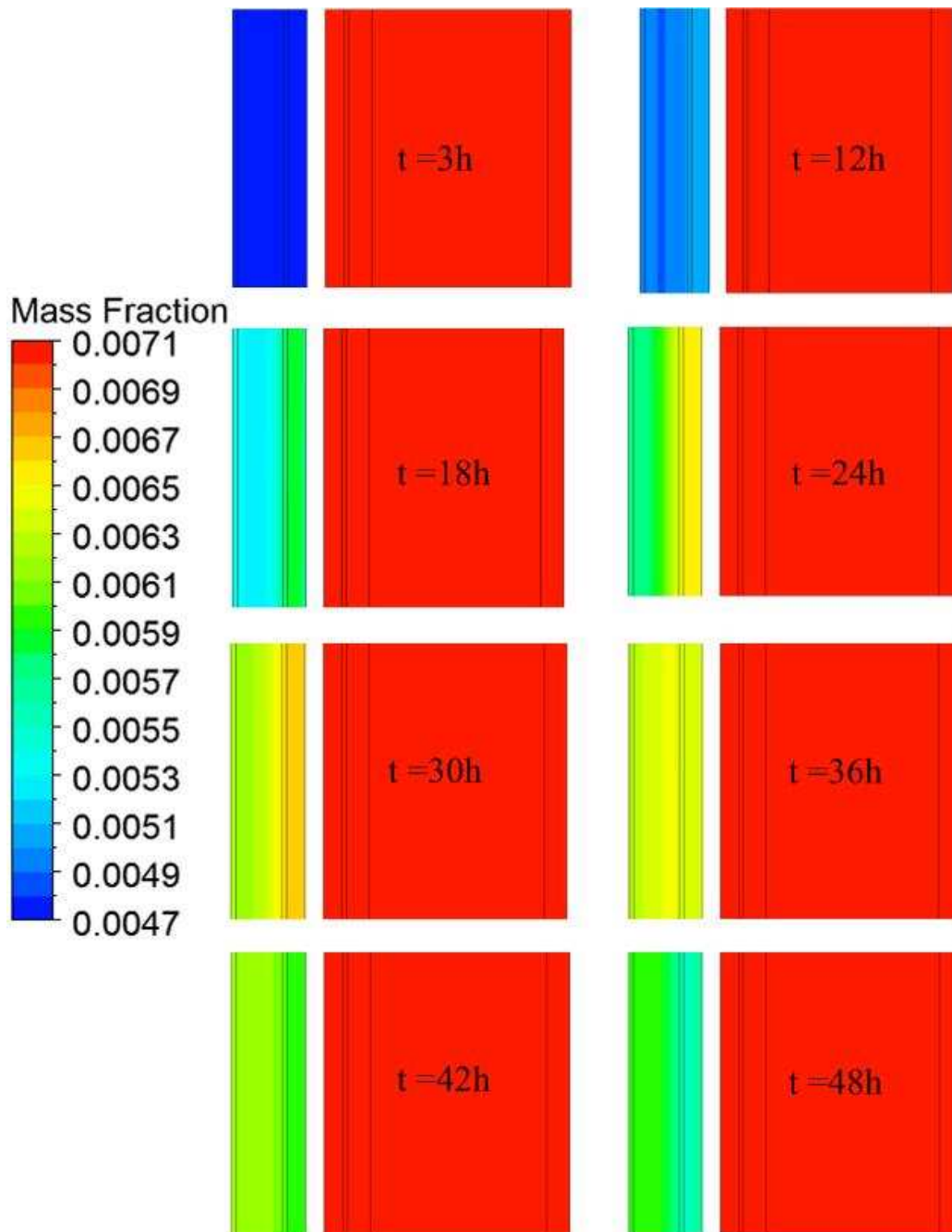
Η **Εικόνα 5.11** παρουσιάζει τα αποτελέσματα των steady state συνθηκών. Εξαιτίας του αδιαπέραστου VIP οι εξωτερικές στρώσεις πριν από αυτό και οι εσωτερικές στρώσεις μετά απ αυτό, έχουν σταθερή ομοιόμορφη κατανομή του κλάσματος μάζας υγρασίας και ίσο με $Y=0.0047$ και $Y=0.0071$ αντίστοιχα. Επίσης η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά με τη μεγαλύτερη μείωση να παρατηρείται στη στρώση του VIP, παρουσιάζοντας το μονωτικό χαρακτήρα του super insulator material. Η σχετική υγρασία κυμαίνεται μεταξύ 35 - 50% στο εσωτερικό της τοιχοποιίας. Για τις εξωτερικές στρώσεις μετά το VIP όπου το κλάσμα μάζας υγρασίας είναι σταθερό και ίσο με $Y=0.0047$, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, δηλαδή στις στρώσεις κοντά στο VIP, τόσο μειώνεται η σχετική υγρασία, με μικρότερη τιμή περίπου 33%, στην εξωτερική επιφάνεια του VIP. Αντίθετα, στις εσωτερικές στρώσεις μετά το VIP με σταθερό κλάσμα μάζας υγρασίας $Y=0.0071$, όσο μειώνεται η θερμοκρασία, δηλαδή στις στρώσεις κοντά στην εσωτερική πλευρά του VIP, τόσο αυξάνεται η σχετική υγρασία, με μέγιστη τιμή περίπου $RH=50\%$, στην εσωτερική επιφάνεια του VIP.



Εικόνα 5.11 - Αποτελέσματα steady state συνθηκών α) κλάσμα μάζας υγρασίας, β) θερμοκρασίας και γ) σχετικής υγρασίας

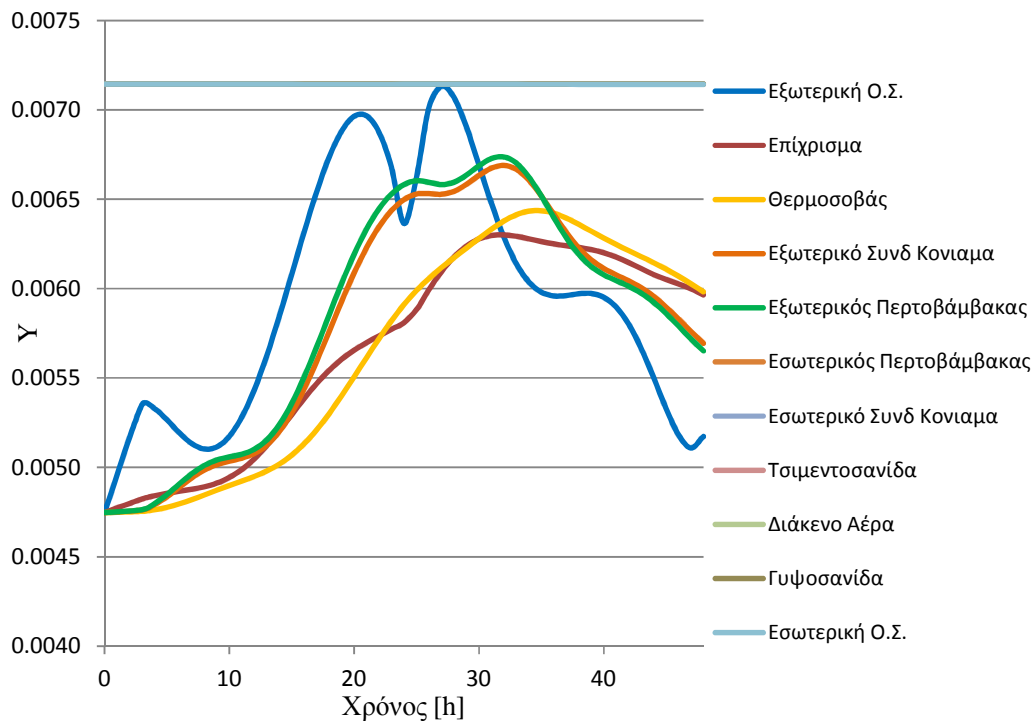
Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του steady state προβλήματος ως αρχικές συνθήκες, επιλύθηκε το χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα έχοντας ως οριακές συνθήκες τις κατανομές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας που παρουσιάζονται στις Εικόνα 5.9 και Εικόνα 5.10. Η Εικόνα 5.12 παρουσιάζει τη μεταβολή του κλάσματος μάζας υγρασίας, Y ,

στο εσωτερικό της τοιχοποιίας για διάφορες χρονικές στιγμές. Παρατηρείται ότι το κλάσμα μάζας υγρασίας στις εσωτερικές πλευρές της τοιχοποιίας μετά το VIP είναι σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια των 48 ωρών. Κάτι το οποίο αναμένονταν καθώς η μοναδική εκτεθειμένη πλευρά της περιοχής έχει οριακή συνθήκη σταθερού κλάσματος μάζας υγρασίας, ενώ η άλλη έρχεται σε επαφή με την αδιαπέραστη στρώση του VIP, συνεπώς οι μεταβολές του κλάσματος μάζας υγρασίας από τις εξωτερικές συνθήκες δεν επιρρεάζουν τις στρώσεις αυτές. Το ενδιαφέρον παρουσιάζεται στις εξωτερικές στρώσεις μετά το VIP, όπου ο λόγος υγρασίας μεταβάλλεται. Απ την **Εικόνα 5.12** παρατηρείται ότι 3 ώρες μετά την έναρξη του χρονικά μεταβαλλόμενου προβλήματος ($t=3h$), η ειδική υγρασία κατά το πάχος των στρώσεων δεν μεταβλήθηκε, εξαιτίας της μικρής μεταβολής της στην οριακή συνθήκη σε αυτό το διάστημα. Στη συνέχεια, τη χρονική στιγμή $t=12h$ το κλάσμα μάζας υγρασίας σε όλες τις στρώσεις αυξήθηκε με μεγαλύτερες τιμές κοντά στην επιφάνεια του VIP, καθώς η μάζα υγρασίας που έχει εισέλθει ως τώρα, δεν διαπερνά το VIP και συγκεντρώνεται σε αυτή την περιοχή. Τις επομενες χρονικές στιγμές ($t=18h$ και $t=24h$) το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο με τους υδρατμούς πλέον να συγκεντρώνονται στον εξωτερικό πετροβάμβακα και σταδιακά να απλώνονται και στον θερμοσοβά. Τις επόμενες χρονικές στιγμές ($t=30h$ και $t=36h$), όπου η οριακή συνθήκη επιβάλει μειωμένο κλάσμα μάζας υγρασίας, οι υδρατμοί έχουν απλωθεί σε όλες τις στρώσεις σχεδόν ομοιόμορφα ($Y \approx 0.0064$). Τέλος τις τελευταίες χρονικές στιγμές ($t=42h$ και $t=48h$) η μάζα υγρασίας στις εξωτερικές στρώσεις (επίχρισμα και θερμοσοβάς) είναι μεγαλύτερη από τις εσωτερικές στρώσεις (πετροβάμβακας) και η υγρασία που είχε συσσωρευθεί στην εξωτερική επιφάνεια του VIP μεταφέρεται προς τα έξω.



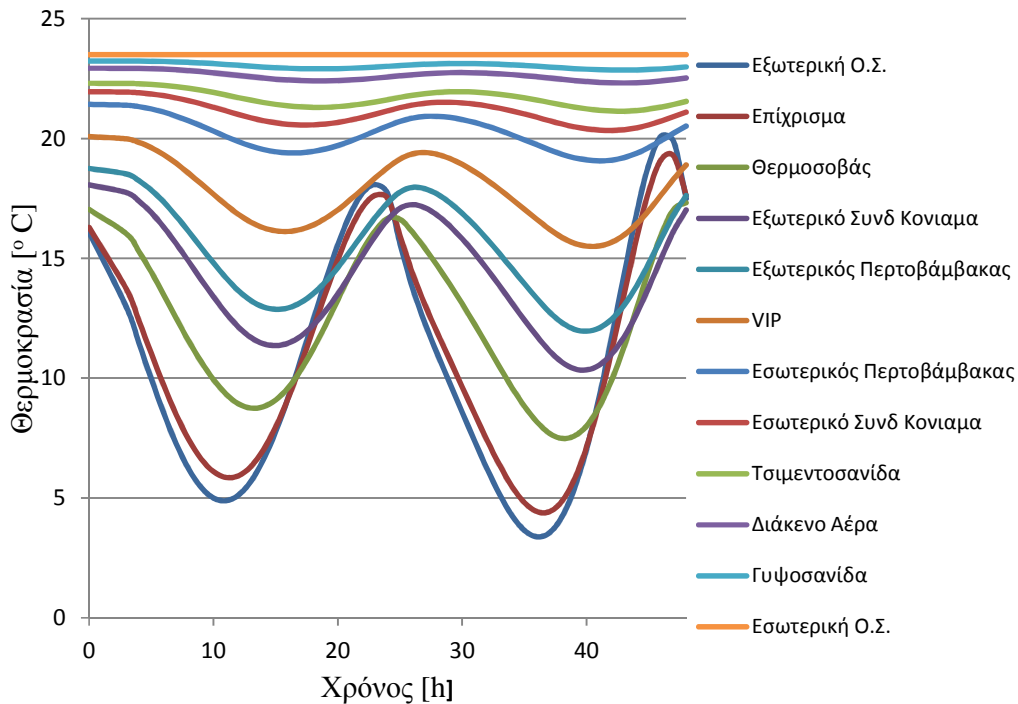
Εικόνα 5.12 - Μεταβολή του λόγου υγρασίας σε διάφορες χρονικές στιγμές

Το διάγραμμα της **Εικόνα 5.13**, που παρουσιάζει το κλάσμα μάζας υγρασίας συναρτήσει του χρόνου, κάνει εμφανή τη συγκέντρωση της υγρασίας στα στρώματα κοντά στο VIP στο χρονικό διάστημα $t=10h$ με $t=30h$ και στην συνέχεια την μεταφορά των υδρατμών στα εξωτερικά στρώματα. Επίσης όλες οι στρώσεις μετά το VIP προς την εσωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας παρουσιάζουν σταθερό λόγο υγρασίας.



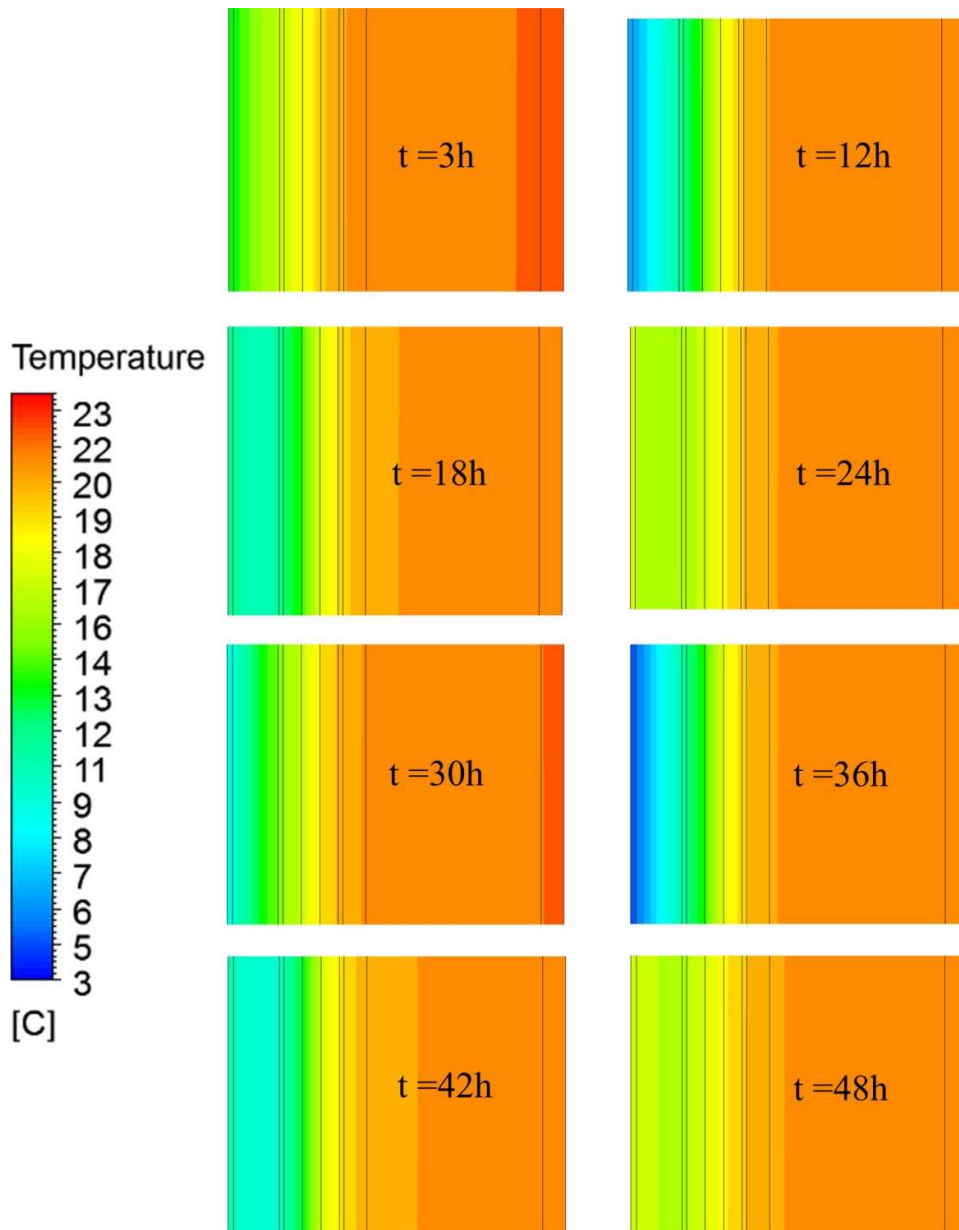
Εικόνα 5.13 - Μεταβολή λόγου υγρασίας στο χρόνο

Το διάγραμμα της **Εικόνα 5.14** παρουσιάζει τη θερμοκρασιακή κατανομή των επιμέρους στρωμάτων της τοιχοποιίας συναρτήσει του χρόνου. Παρατηρούνται οι μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις των εξωτερικών στρώσεων της τοιχοποιίας, οι οποίες σταδιακά μειώνονται μέχρι και τη στρώση του υπερ-μονωτή VIP. Για παράδειγμα η θερμοκρασία του εξωτερικού πετροβάμβακα έχει διακύμανση 7°C, ενώ του εσωτερικού 2.3°C. Επίσης είναι εμφανές η θερμοκρασιακή υστέρηση που παρουσιάζουν τα διάφορα υλικά της τοιχοποιίας, όπως ο εξωτερικός πετροβάμβακας 3.5 ώρες, το VIP 4 ώρες και ο εσωτερικός πετροβάμβακας 4.5 ώρες.

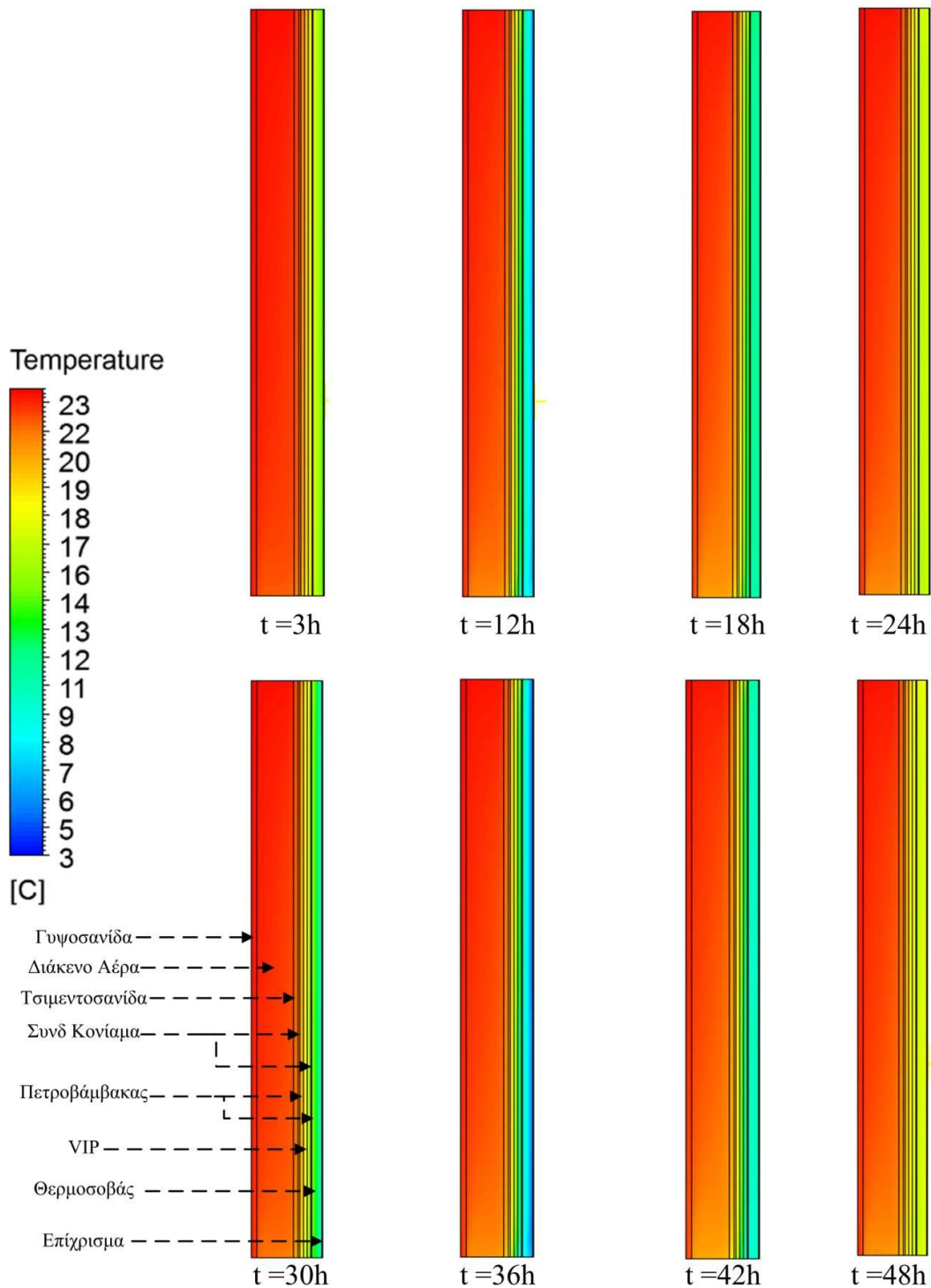


Εικόνα 5.14 - Μεταβολή της θερμοκρασίας στο χρόνο

Η **Εικόνα 5.15** παρουσιάζει τις ισοεπιφάνειες των θερμοκρασιών στο επίπεδο xz για διάφορες χρονικές στιγμές. Παρατηρείται ότι σε κάθε χρονική στιγμή, η θερμοκρασία σταδιακά μεταβάλλεται από έξω προς τα μέσα. Η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή κλίση παρουσιάζεται στη στρώση του VIP, κάτι που γίνεται εμφανές κατά τις χρονικές στιγμές $t=12h$ και $t=36h$, όπου υπάρχει η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των επιφανειών της τοιχοποιίας. Έτσι φαίνεται ξεκάθαρα ο ρόλος του μονωτικού στην τοιχοποιία. Στην **Εικόνα 5.16** παρουσιάζονται οι ισοεπιφάνειες των θερμοκρασιών στο επίπεδο xy για διάφορες χρονικές στιγμές. Σε αυτά τα διαγράμματα γίνεται εμφανές η μεταβολή της θερμοκρασίας καθ' ύψος της τοιχοποιίας. Το ενδιαφέρον παρουσιάζεται στο διάκενο, όπου οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρουσιάζονται στην κορυφή ενώ χαμηλότερες στο κάτω μέρος του διακένου. Αυτό οφείλεται στη διαφορά πυκνότητας του αέρα του διακένου και ως εκ τούτου τη δημιουργία ανακυκλοφορίας στο διάκενο. Η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά συνεχίζεται στις πιο κοντινές στρώσεις (γυψοσανίδα και τσιμεντοσανίδα) αλλά στη συνέχεια οι διαφορές αυτές ομαλοποιούνται.



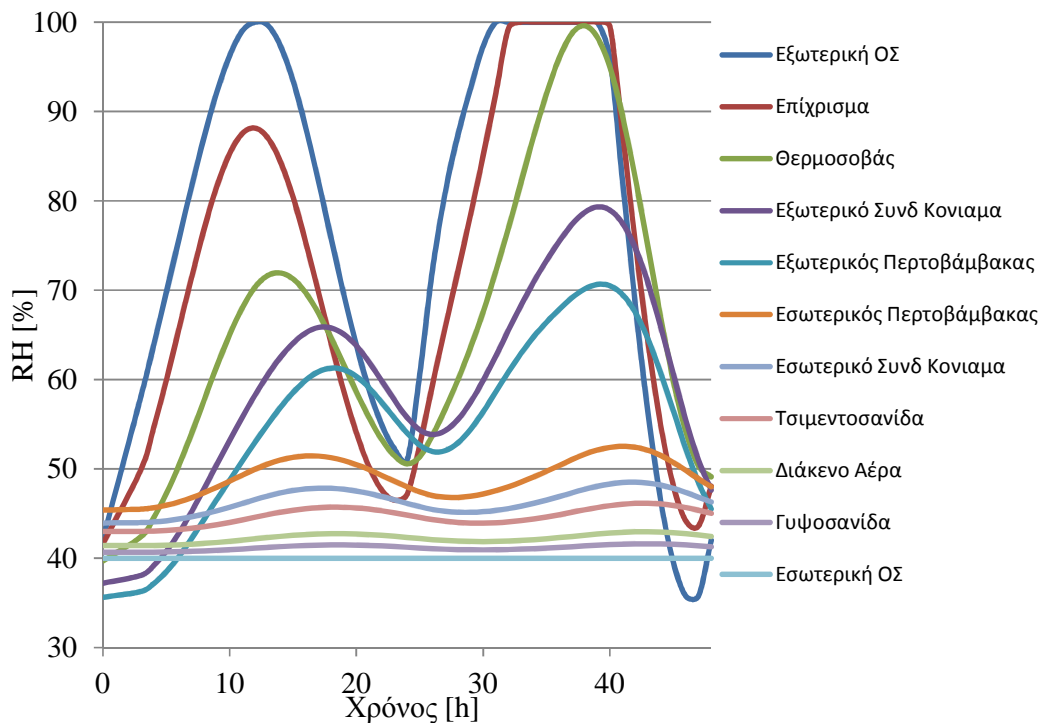
Εικόνα 5.15 - Μεταβολή της θερμοκρασίας σε διάφορες χρονικές στιγμές



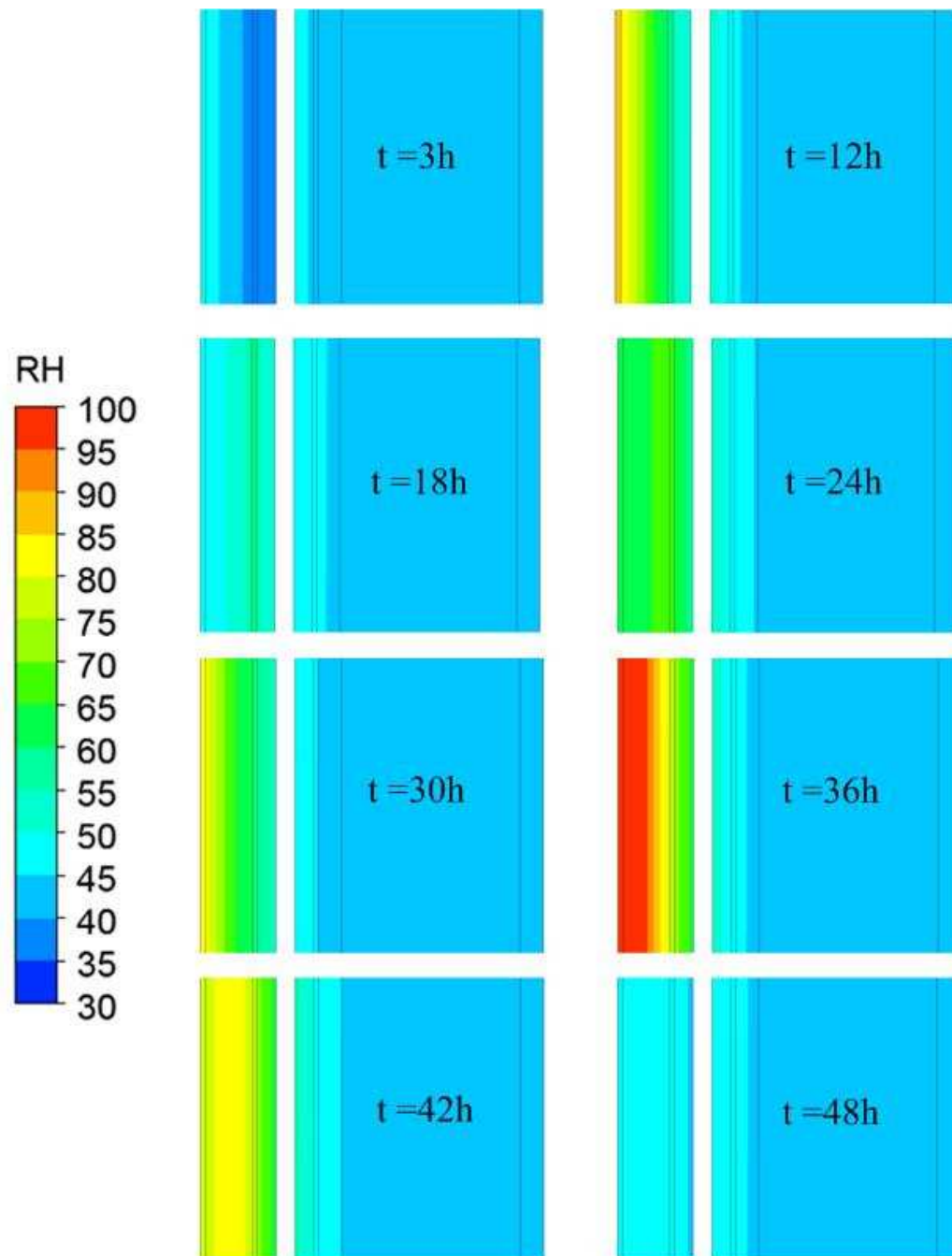
Εικόνα 5.16 - Μεταβολή της θερμοκρασίας στο επίπεδο xy σε διάφορες χρονικές στιγμές

Ο συνδυασμός του λόγου υγρασίας, Y αέρα και της θερμοκρασίας, T αποδίδεται από τη σχετική υγρασία RH . Η Εικόνα 5.17 παρουσιάζει τη μεταβολή της σχετικής υγρασίας στις στρώσεις της τοιχοποιίας συναρτήσει του χρόνου. Παρατηρείται ότι η μεταβολή των εξωτερικών συνθηκών επηρεάζει κυρίως, τη σχετική υγρασία των εξωτερικών στρώσεων της

τοιχοποιίας μέχρι και τον εξωτερικό πετροβάμβακα. Αυτό οφείλεται στο αδιαπέραστο VIP αλλά και στις σταθερές συνθήκες στην εσωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας. Η διακύμανση της σχετικής υγρασίας στις εσωτερικές στρώσεις είναι πολύ μικρή. Η μεταβολή της σχετικής υγρασίας σε διάφορες χρονικές στιγμές παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5.18**. Το ενδιαφέρον παρουσιάζεται στις εξωτερικές στρώσεις μετά το VIP. Από την αρχή μέχρι την χρονική στιγμή $t=12h$ οι εξωτερικές στρώσεις της τοιχοποιίας (επίχρισμα, θερμοσοβάς) παρουσιάζουν μεγαλύτερη σχετική υγρασία σε σχέση με τον εξωτερικό πετροβάμβακα. Την χρονική στιγμή $t=18h$ οι στρώσεις φαίνονται να έχουν ίδια σχετική υγρασία με εξαίρεση την κόλλα η οποία παρουσιάζει αυξημένη τιμή σχετικής υγρασίας, ενώ την $t=24h$ φαίνεται ο πετροβάμβακας να έχει μεγαλύτερη σχετική υγρασία από τις εξωτερικές στρώσεις. Την $t=30h$ η σχετική υγρασία των εξωτερικών στρώσεων αυξάνεται και την $t=36h$ έχουν παρουσιαστεί συμπυκνώματα τόσο στο επίχρισμα, όσο και στα πρώτα χιλιοστά του θερμοσοβά, ενώ σχετική υγρασία του πετροβάμβακα φτάνει τα 70%. Τις χρονικές αυτές στιγμές ($t=15h$ έως $t=35h$) η **Εικόνα 5.12** παρουσίαζε υψηλότερες τιμές ειδικής υγρασίας για τον εξωτερικό πετροβάμβακα, όμως εξαιτίας της θερμοκρασίας η σχετική υγρασία είναι πάντα χαμηλότερη. Έτσι φαίνεται πως ο παράγοντας της θερμοκρασίας επηρεάζει την δημιουργία ή όχι συμπυκνωμάτων. Την $t=42h$ η υγρασία στο επίχρισμα και το θερμοσοβά μειώνεται και την $t=48h$ η σχετική υγρασία έχει μειωθεί και έχει φτάσει περίπου το 48% σε όλες τις εξωτερικές στρώσεις.



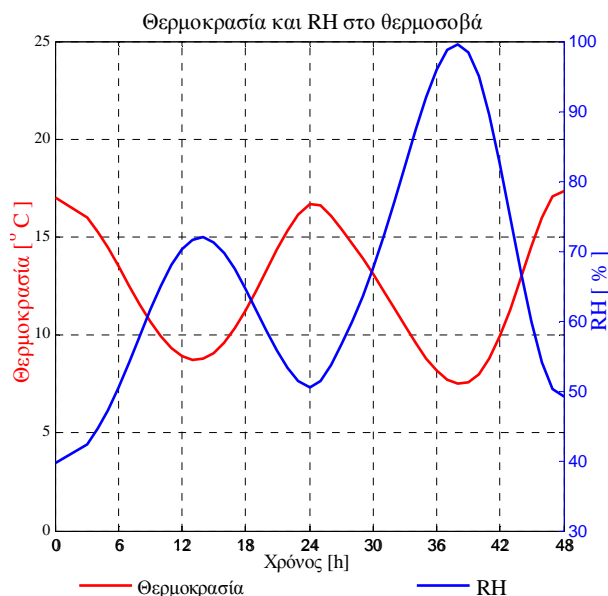
Εικόνα 5.17 - Μεταβολή της σχετικής υγρασίας στο χρόνο



Εικόνα 5.18 - Μεταβολή της σχετικής υγρασίας σε διάφορες χρονικές στιγμές

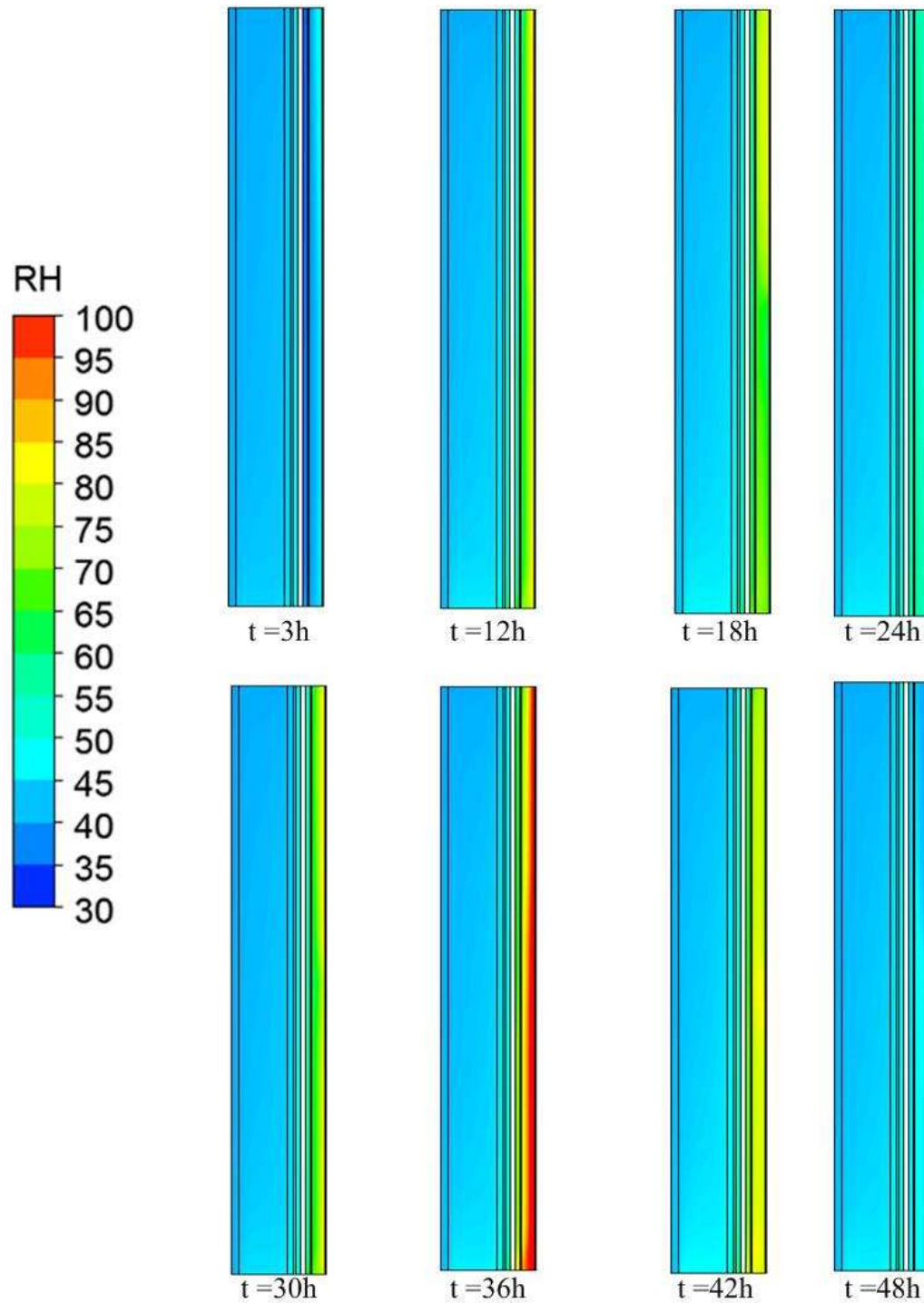
Κατά το δεύτερο 24ωρο, όπου υπάρχει βροχόπτωση και η εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας παρουσιάζει συμπυκνώματα για περίπου 8 ώρες ($t=32h$ έως $t=39h$), παρατηρείται να εμφανίζονται συμπυκνώματα στην στρώση του θερμοσοβά περίπου 5 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης (χρονική στιγμή $t=38h$). Το διάγραμμα της **Εικόνα 5.19**

παρουσιάζει τη θερμοκρασία και την σχετική υγρασία του θερμοσοβά συναρτήσει του χρόνου. Παρατηρείται ότι τη χρονική στιγμή όπου παρουσιάζεται το συμπύκνωμα στο θερμοσοβά, ταυτόχρονα παρουσιάζεται και η ελάχιστη θερμοκρασία. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία αυξάνεται και ως συνέπεια, η σχετική υγρασία μειώνεται, οπότε και τα συμπυκνώματα εξαφανίζονται. Αυτό σημαίνει, πως αν η θερμοκρασία συνέχιζε να μειώνεται για κάποιες ώρες τα συμπυκνώματα θα παραμένανε στο θερμοσοβά και πιθανόν να προχωράγανε και στις επόμενες στρώσεις.



Εικόνα 5.19 - Θερμοκρασία και σχετική υγρασία θερμοσοβά

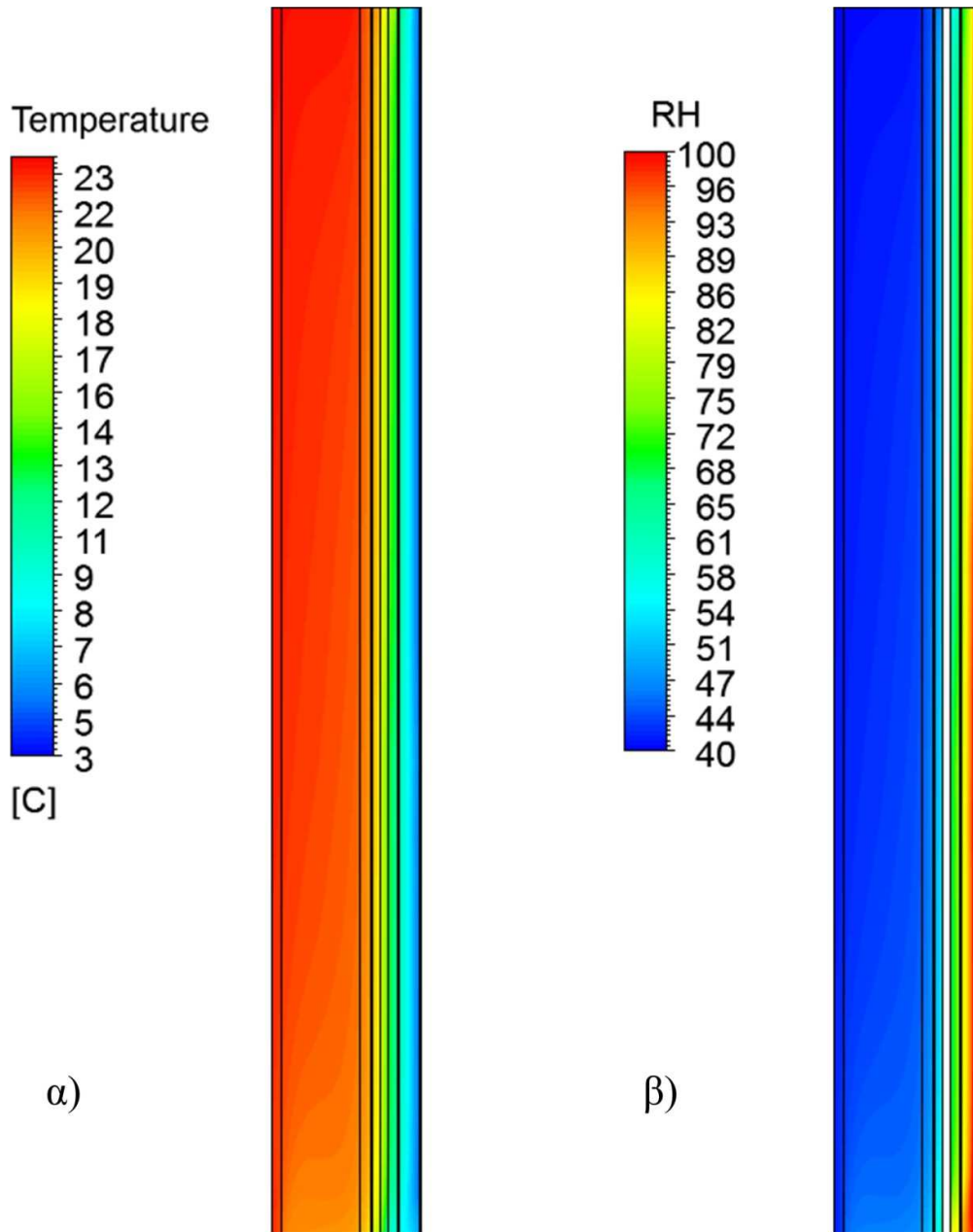
Η Εικόνα 5.20 παρουσιάζει τις ισοεπιφάνειες της σχετικής υγρασίας στο επίπεδο xy όπου φαίνονται οι κατανομές της υγρασίας καθ ύψος της τοιχοποιίας για διάφορες χρονικές στιγμές. Από τη στρώση του διακένου και του θερμοσοβά παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές της σχετικής υγρασίας παρατηρούνται σε χαμηλό ύψος της τοιχοποιίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ανακυκλοφορία του αέρα του διακένου, θερμαίνοντας τα υψηλότερα στρώματα και ψύχοντας τα χαμηλότερα και δευτερευόντως στις βαρυτικές δυνάμεις της υγρασίας.



Εικόνα 5.20 - Μεταβολή της σχετικής υγρασίας στο επίπεδο xy σε διάφορες χρονικές στιγμές

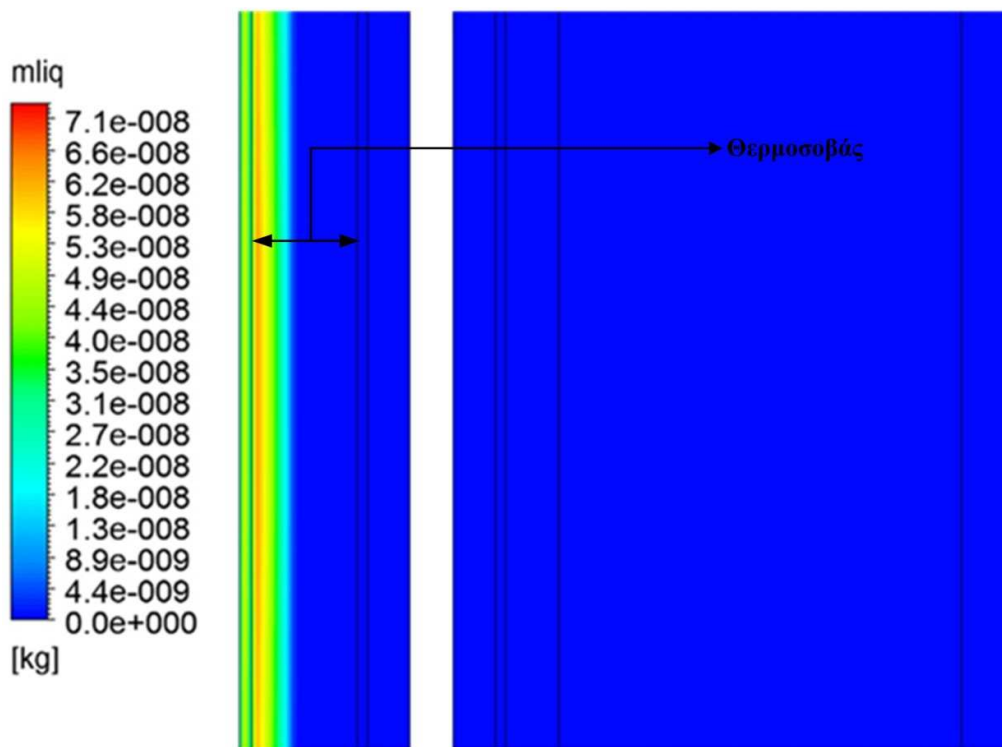
Η Εικόνα 5.21 παρουσιάζει τις ισοεπιφάνειες των θερμοκρασιών και της σχετικής υγρασίας καθ ύψος της τοιχοποιίας και τη χρονική στιγμή $t=36h$, όπου παρουσιάζονται τα συμπυκνώματα στις εξωτερικές στρώσεις. Παρατηρούνται οι θερμοκρασιακές διαστρωματώσεις στο διάκενο του αέρα με τα ψυχρότερα στρώματα να βρίσκονται στο κάτω

μέρος και τα θερμότερα στο πάνω μέρος του διακένου. Η θερμοκρασιακή αυτή διαστρωμάτωση είναι αισθητή κυρίως στο διάκενο αέρα, ενώ οι στρώσεις μακριά από αυτό παρουσιάζουν ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας καθ ύψος. Η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση του διακένου, έχει ως αποτέλεσμα την διαστρωμάτωση και της σχετικής υγρασίας καθ ύψος της τοιχοποιίας. Στο διάκενο παρατηρούνται χαμηλές τιμές RH στο πάνω μέρος και υψηλές στο κάτω. Ο εξωτερικός πετροβάμβακας παρουσιάζει μεταβολή της σχετικής υγρασίας καθ ύψος της τοιχοποιίας που οφείλεται στη μεταβολή της θερμοκρασίας.



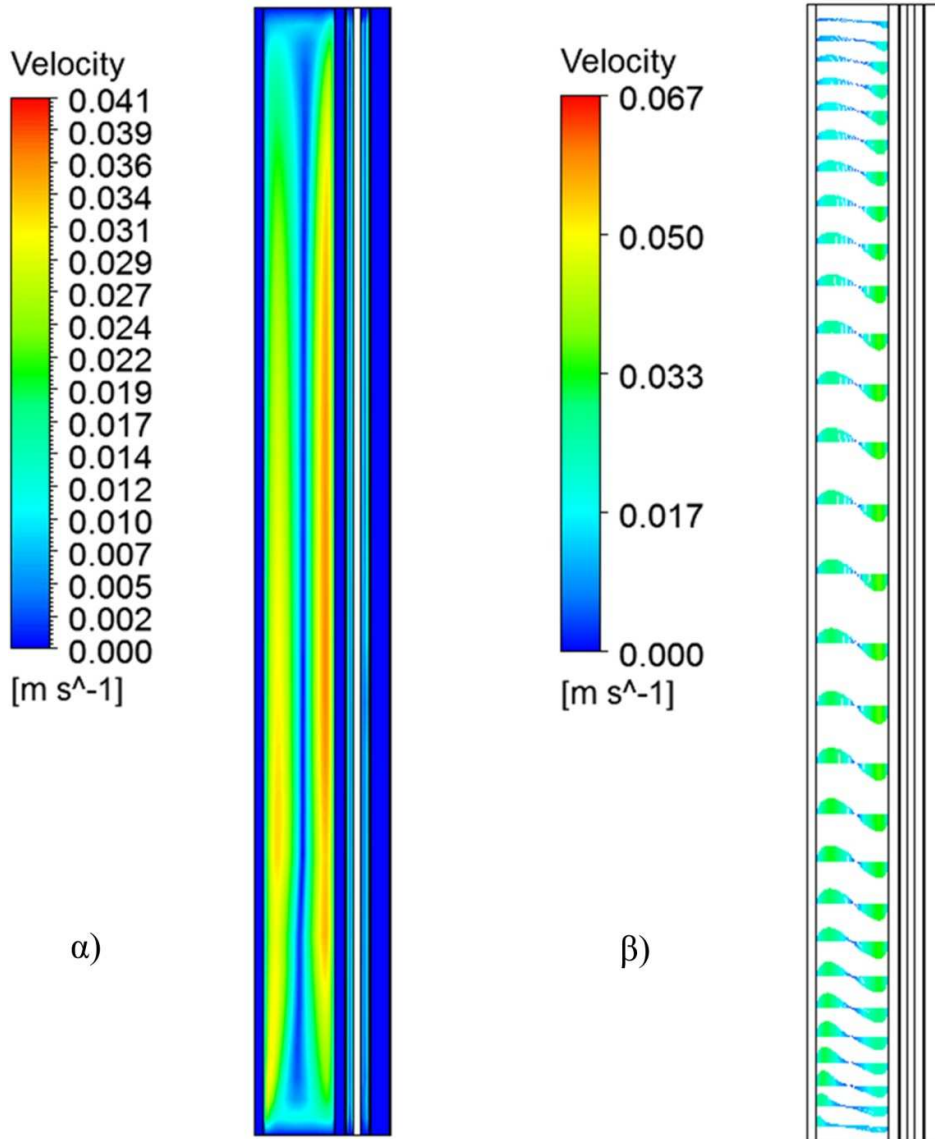
Εικόνα 5.21 - Ισοεπιφάνειες α) θερμοκρασιών και β) σχετικής υγρασίας για τη χρονική στιγμή $t=36h$

Η **Εικόνα 5.22** παρουσιάζει την κατανομή της μάζας των συμπυκνωμάτων, τη χρονική στιγμή $t=36h$, όπου παρουσιάζονται τα συμπυκνώματα στη στρώση του θερμοσοβά. Παρατηρείται ότι τα συμπυκνώματα έχουν δημιουργηθεί μέχρι τα πρώτα 20mm του θερμοσοβά και φτάνουν έως και $m_{liq}=6 \cdot 10^{-8}$ kg. Όλες οι υπόλοιπες στρώσεις δεν παρουσιάζουν συμπυκνώματα, συνεπώς η μάζα παραμένει 0.



Εικόνα 5.22 - Μάζα συμπυκνωμάτων τη χρονική στιγμή $t=36h$

Η **Εικόνα 5.23α** παρουσιάζει τις ισοεπιφάνειες των ταχυτήτων στο επίπεδο xy της τοιχοποιίας τη χρονική στιγμή $t=36h$. Στο διάκενο, όπου δημιουργείται η ανακυκλοφορία του αέρα, παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ταχύτητες στα τοιχώματά του που φτάνουν έως και $3.5 \cdot 10^{-2} m/s$. Να σημειωθεί ότι σε σχέση με τα υπόλοιπα πορώδη στρώματα όπου η ταχύτητα είναι σχεδόν μηδενική, τα στρώματα του πετροβάμβακα παρουσιάζουν ταχύτητες της τάξης του $5 \cdot 10^{-3} m/s$ παρουσιάζοντας κι εκεί ανακυκλοφορία και μέγιστες τιμές κοντά στα τοιχώματα με τα γειτονικά δομικά υλικά. Η ταχύτητα στο πορώδες δημιουργείται εξαιτίας του πλήρους πορώδους μοντέλου. Η **Εικόνα 5.23β** παρουσιάζει τα διανύσματα των ταχυτήτων του αέρα του διακένου σε επίπεδο xy . Παρατηρείται η δημιουργία οριακού στρώματος στα τοιχώματα του διακένου με την γυψοσανίδα και την τσιμεντοσανίδα, όπως επίσης και η συστροφή του αέρα στις αδιαβατικές επιφάνειες και τη δημιουργία της ανακυκλοφορίας.



Εικόνα 5.23 - Παρουσίαση α) ισοπιφανειών και β) διανυσμάτων ταχυτήτων αέρα στο εσωτερικό της τοιχοποιίας

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται τη δημιουργία ενός μοντέλου συνδυαζόμενης μεταφοράς θερμότητας και απλοποιημένης μεταφοράς υγρασίας στο εσωτερικό των δομικών υλικών. Ο αέρας θεωρήθηκε ως μίγμα ξηρού αέρα και υδρατμών, ενώ τα δομικά υλικά στα οποία είναι δυνατόν να εισχωρήσει η υγρασία θεωρήθηκαν ως πορώδη υλικά. Επίσης, το μοντέλο προσομοιώνει τη δημιουργία συμπυκνωμάτων νερού βασιζόμενο στις εξισώσεις της ASHRAE [14] και σχετικής βιβλιογραφίας [66]. Το μοντέλο δημιουργήθηκε σε περιβάλλον ANSYS CFX, και χρειάστηκε η εισαγωγή των βασικών μεγεθών για τον προσδιορισμό της υγρασίας μέσω αλγεβρικών εξισώσεων.

Από τη σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση της παρούσας εργασίας, διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν λίγα μοντέλα τα οποία επιλύουν τη μεταφορά υγρασίας σε 3D γεωμετρίες. Δε βρέθηκε καμία αναφορά με μεταφορά υγρασίας σε δομικά υλικά όπου το μοντέλο δημιουργήθηκε σε περιβάλλον CFX. Η εργασία [69] επιλύει τη μεταφορά υγρασίας στα δομικά υλικά σε περιβάλλον FLUENT, εισάγοντας και τροποποιώντας τις εξισώσεις που επιλύονται. Το μοντέλο της παρούσας εργασίας είναι αρκετά πιο απλοποιημένο και προσδιορίζει την υγρασία στα δομικά υλικά χρησιμοποιώντας τα μεγέθη που υπολογίζονται από τις βασικές εξισώσεις μεταφοράς που επιλύονται στο ANSYS. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτού, συγκρίθηκαν με τα πειραματικά της εργασίας [69] σε δοκίμιο calcium silicate και έγιναν αποδεκτά. Το σφάλμα του απλοποιημένου μοντέλου της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας με τα πειραματικά ανέρχεται στο 2.10%, ενώ το αντίστοιχο σφάλμα του υπολογιστικού μοντέλου της αναφοράς [69] είναι 2.09%. Στη συνέχεια έγινε μια παραμετρική μελέτη του συντελεστή μοριακής διάχυσης της υγρασίας του calcium silicate και μελετήθηκε η συμπεριφορά του συντελεστή στη μεταφορά υγρασίας. Διαπιστώθηκε ότι οι σημαντικότερες διαφορές παρατηρούνται κατά την ύγρανση του δοκιμίου, όπου όσο πιο υψηλή είναι η τιμή του συντελεστή διάχυσης, τόσο πιο γρήγορα αυξάνεται η σχετική υγρασία. Κατά την αφύγρανση, οι υπολογιστικές τιμές της σχετικής υγρασίας του μοντέλου ταυτίζονταν με τις αντίστοιχες πειραματικές, ενώ η συμπεριφορά των συντελεστών διάχυσης της υγρασίας είναι παρόμοια και υπάρχουν μικρές διαφορές.

Στη συνέχεια, έγινε η εφαρμογή του μοντέλου αυτού σε πραγματική πολυστρωματική τοιχοποιία με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς της σε ένα 48ωρό. Η τοιχοποιία περιλαμβάνει μία στρώση από Vacuum Insulation Panel, ένα μονωτικό υλικό που περιλαμβάνεται στην κατηγορία των Super Insulation Materials. Επιλέχθηκαν ως εξωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα 48ωρών τα οποία περιλαμβάνουν κάποιες ώρες έντονης βροχόπτωσης με σκοπό την ενεργοποίηση του

μοντέλου συμπύκνωσης των υδρατμών. Για εσωτερικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν σταθερές συνθήκες άνεσης, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

Μελετήθηκε η συμπεριφορά του μονωτικού των VIP στη μεταφορά θερμότητας σε συνθήκες steady state και transient. Παρατηρήθηκαν ότι οι μεγάλες θερμοκρασιακές κλίσεις παρουσιάστηκαν, κυρίως στη μόνιμη περίπτωση. Όμως μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάστηκε στη συμπεριφορά των VIPs κατά τη μεταφορά υγρασίας στην τοιχοποιία. Τα VIPs μοντελοποιήθηκαν ως αδιαπέραστα στερεά και αυτό είχε ως συνέπεια τη δημιουργία δύο ανεξάρτητων περιοχών για τη μεταφορά υγρασίας, την εσωτερική (από την εσωτερική πλευρά της τοιχοποιίας έως την εσωτερική πλευρά του VIP) και την εξωτερική (από την εξωτερική πλευρά του VIP έως την εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας). Παρατηρήθηκε η εμφάνιση συμπυκνωμάτων στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, σε απόσταση 20mm από την εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας, 5 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης του δεύτερου 24ώρου. Για την απουσία των συμπυκνωμάτων και την εξάτμιση τους, καθοριστικό ρόλο έπαιξε η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης. Τόσο η παρουσία του θερμοσοβά, όσο και του πάχους του, είναι καθοριστικής σημασίας για την εισχώρηση της υγρασίας στα υπόλοιπα στρώματα. Πιο συγκεκριμένα, το μεγάλο πάχος του θερμοσοβά προστάτευε τον πετροβάμβακα από τη δημιουργία συμπυκνωμάτων, κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα την επίδραση στη θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Τέλος, μελετήθηκε και η συμπεριφορά του διακένου αέρα με τη δημιουργία ανακυκλοφοριών και θερμοκρασιακών διακυμάνσεων καθ' ύψος της τοιχοποιίας. Ο θερμός αέρας βρίσκεται στα πάνω στρώματα και ο ψυχρός τα κάτω, αυτό έχει επίδραση και στη σχετική υγρασία με μεγαλύτερες τιμές στα κάτω στρώματα και μικρότερες στα πάνω.

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι το υπολογιστικό κόστος κατά την εκτέλεση των περιπτώσεων ήταν πολύ μεγάλο. Αξίζει να σημειωθεί ότι το χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα της τοιχοποιίας του VIP για τις 48 ώρες διήρκεσε 19 ημέρες (σε ηλεκτρονικό υπολογιστή 8 πυρήνων και 12GB μνήμης RAM). Αυτό σημαίνει ότι απαιτούνταν μεγάλο υπολογιστικό κόστος για τη εκτέλεση περισσότερων περιπτώσεων και σεναρίων όσο αφορά τις καιρικές συνθήκες, τις εσωτερικές συνθήκες κλπ.

7. Μελλοντικές προοπτικές

Η παρούσα διπλωματική εργασία δίνει αφορμές για μελέτη σε θέματα που αφορούν τη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας σε δομικά υλικά. Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνονται μερικές μελλοντικές εργασίες που θα μπορούσαν να γίνουν.

Κρίνεται σωστό, για μια ολοκληρωμένη μελέτη, να γίνει πιστοποίηση του μοντέλου με πειραματικά δεδομένα της τοιχοποιίας του VIP. Έτσι, το μοντέλο θα μπορεί να θεωρηθεί ακριβές και γενικό για να μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες τοιχοποιίες. Με τον τρόπο αυτό, θα καθορίζονται πλήρως οι ιδιότητες των υλικών, κυρίως αυτές που αφορούν τη μεταφορά υγρασίας οι οποίες είναι περισσότερες και πολυπλοκότερες, αλλά και η συμπεριφορά της τοιχοποιίας και σε πραγματικές εσωτερικές συνθήκες. Η πιστοποίηση θα πρέπει να γίνει τόσο με παρουσία συμπυκνωμάτων, όσο και χωρίς, ώστε να διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης συμπυκνωμάτων νερού. Επίσης θα μπορούσε να μελετηθεί και η διαφορετική διαστρωμάτωση της τοιχοποιίας και τι θα γινόταν αν τα στρώματα ήταν διαφορετικά ή διαφορετικού πάχους (π.χ. μικρότερου πάχους θερμοσοβά ή και καθόλου).

Επιπλέον, θα ήταν ενδιαφέρον να δημιουργηθεί ένα πλήρες μοντέλο μεταφοράς θερμότητας και μάζας που θα λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμέτρους μεταφοράς της υγρασίας (διαφορά πίεσης, διάχυση, διαφορές θερμοκρασίας, βαρύτητα κλπ). Ένα τέτοιο μοντέλο θα μπορούσε να είναι πιο εξειδικευμένο στη μεταφορά υγρασίας σε δομικά υλικά. Επίσης το υπολογιστικό κόστος των τρεξιμάτων του μοντέλου στο ANSYS CFX ήταν πολύ μεγάλο, συνεπώς η δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου σε διαφορετικό λογισμικό ίσως να μείωνε και το υπολογιστικό κόστος.

Ακόμη, κατά τη κατασκευή της γεωμετρίας της τοιχοποιίας των VIP έγινε η παραδοχή ότι όλα τα στρώματα είναι ομοιόμορφα, κάτι που είναι αποδεκτό για τη μεταφορά θερμότητας και μάζας για τα περισσότερα στρώματα, όχι όμως για τα VIP. Τα VIP τοποθετούνται στην τοιχοποιία σε panels διαστάσεων 60cm×40cm×20mm με αποτέλεσμα τη δημιουργία αρμών μεταξύ των panels. Αυτό όμως έχει μεγάλη σημασία κατά τη μεταφορά της υγρασίας διάμεσου των αρμών. Για τη μεταφορά θερμότητας αυτό λήφθηκε υπόψη βάζοντας μια ισοδύναμη τιμή στο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για τα VIP. Έτσι η προσομοίωση και των αρμών των VIP θα είχε ενδιαφέρον για να διαπιστωθεί πόση υγρασία μεταφέρεται από εκεί.

Επίσης το μοντέλο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί έχοντας σωστές και ακριβείς ιδιότητες των υλικών. Στην εργασία διαπιστώθηκε η συμπεριφορά του συντελεστή διάχυσης της υγρασίας στο calcium silicate, θα μπορούσε όμως να διαπιστωθεί και η συμπεριφορά του

Υπολογιστική Προσομοίωση Φαινομένων Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζας σε Δομικά Υλικά

ανοικτού πορώδους στο ίδιο υλικό, που επίσης είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα. Στην παρούσα εργασία αυτό δεν έγινε λόγω υπολογιστικού κόστους.

8. Βιβλιογραφία

1. Carneiro JO, Vasconcelos G, Azevedo S, Jesus C, Palha C, Gomes N, Teixeira V: The evaluation of the thermal behaviour of a mortar based brick masonry wall coated with TiO₂ nanoparticles: An experimental assessment towards energy efficient buildings. *Energy and Buildings* 81:1-8, 2014.
2. Leahy M, Barden JL, Murphy BT, Slater-Thompson N, Peterson D: *International Energy Outlook 2013*, U.S. Energy Information Administration (EIA) OoEA, U.S. Department of Energy (ed), Vol. Washington, DC, 2013.
3. Parameshwaran R, Kalaiselvam S: Energy efficient hybrid nanocomposite-based cool thermal storage air conditioning system for sustainable buildings. *Energy* 59:194-214, 2013.
4. Mohsen S.M., Akash B.A.: Some prospect of energy savings in buildings. *Energy Conversion Management* 42:1307–1315, 2001.
5. Sage-Lauck JS, Sailor DJ: Evaluation of phase change materials for improving thermal comfort in a super-insulated residential building. *Energy and Buildings* 79:32-40, 2014.
6. Strachan P: *Dynamic thermal modelling and simulation: energy flows and uncertainty*, Strathclyde Uo (ed), Vol. Glasgow, Scotland, Energy Systems Research Unit Department of Mechanical and Aerospace Engineering, 2014.
7. What are the sources of home heat loss?, *Shrink That Footprint*. (<http://shrinkthatfootprint.com/home-heat-loss#Tvw77xVell78roYY.99>)
8. Το πρόβλημα της ηλικίας των κτιρίων στις πόλεις, *Τεχνικά Χρονικά*, TEE.
9. Cho K, Hong Y, Seo J: Assessment of the economic performance of vacuum insulation panels for housing projects. *Energy and Buildings* 70:45-51, 2014.
10. Mandilaras I, Atsonios I, Zannis G, Founti M.: Thermal performance of a building envelope incorporating ETICS with vacuum insulation panels and EPS. *Energy and Buildings*.
11. Malliotakis E. MI, Kontogeorgos D., Katsourinis D., Founti M.: The Ageing Effects of Vacuum Insulation Panels (VIPs) on the Long Term Thermal Performance of a Building Envelope with the use of Dynamic Simulation Tools, *IVIS 2013 - 11 th International Vacuum Insulation Symposium Vol. Empa, Switzerland*, 2013.
12. Fang L, Clausen G, Fanger PO: Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality. *Indoor Air* 8:80-90, 1998.
13. Simonson CJ, Salonvaara M, Ojanen T: The effect of structures on indoor humidity – possibility to improve comfort and perceived air quality. *Indoor Air* 12:243-251, 2002.
14. *PSYCHROMETRICS. ASHRAE Handbook - Fundamentals*, 2009.

15. Pavlogeorgatos G: Environmental parameters in museums. *Building and Environment* 38:1457-1462, 2003.
16. Steeman HJ, Van Belleghem M, Janssens A, De Paepe, M.: Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage. *Building and Environment* 44:2176-2184, 2009.
17. Steeman M, De Paepe M, Janssens A: Impact of whole-building hygrothermal modelling on the assessment of indoor climate in a library building. *Building and Environment* 45:1641-1652, 2010.
18. Xiaoshu L: Modelling of heat and moisture transfer in buildings: I. Model program. *Energy and Buildings* 34:1033-1043, 2002.
19. Litavcova E, Korjenic A, Korjenic S, Pavlus M, Sarhadov I, Seman J, Bednar T: Diffusion of moisture into building materials: A model for moisture transport. *Energy and Buildings* 68, Part A:558-561, 2014.
20. Antonyová A, Korjenic A, Antony P, Korjenic S, Pavlušová E, Pavlus M, Bednar T: Hygrothermal properties of building envelopes: Reliability of the effectiveness of energy saving. *Energy and Buildings* 57:187-192, 2013.
21. Κλουσάκου Γ: Αξιολόγηση Υπολογιστικών Εργαλείων Προσομοίωσης Θερμικής Απόκρισης Κτιρίων / Δομικών Στοιχείων με Υλικά Αλλαγής Φάσης - Εφαρμογή στο TRNSYS, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.
22. Matthew J. Duffy MH, David E. Bradley, Werner Keilholz, Jeff W. Thornton: TRNSYS – Features and Functionality for Building Simulation 2009 Conference, Eleventh International IBPSA Conference, Vol. Glasgow, Scotland, 2009, pp 1950-1954.
23. TRNSYS. (<http://apps1.eere.energy.gov>).
24. Αλ Φάντελ Μ: Αξιολόγηση Συστημάτων Παραγωγής Θερμικής Ενέργειας στην Ενεργειακή Συμπεριφορά Κτιρίου με Βάση τον Κ.Εν.Α.Κ. Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
25. Kontogeorgos D, Founti M: Numerical investigation of simultaneous heat and mass transfer mechanisms occurring in a gypsum board exposed to fire conditions. *Applied Thermal Engineering* 30:1461-1469, 2010.
26. Pedersen CR: Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, 1990.
27. Zarr RR: Heat and moisture transfer in wood-based wall construction [microform] : measured versus predicted / R.R. Zarr, D.M. Burch, and A.H. Fanney. Gaithersburg, MD : Washington, DC, U.S. Dept. of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology ; For sale by the Supt. of Docs., U.S. G.P.O., 1995.
28. Sipes JM, Hosni M.H.: Computer Analysis and Comparison of Experimental Data for Moisture Accumulation in Concrete Masonry Walls. *Transactions- american society of heating refrigerating and air conditioning engineers* 106:347-356, 2000.

29. Burch DM, Saunders C. A. : A Computer Analysis of Wall Constructions in the Moisture Control Handbook. NISTIR 5627, 1995.
30. Tsongas G, Burch D., Roos C., and Cunningha M.J.: A parameteric study of wall moisture contents using a revised variable indoor relative humidity version of the "MOIST" transient heat and moisture transfer model. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Building 6, 1995.
31. Burch D.M. GAT, and G.N. Walton: Mathematical Analysis of Practices to Control Moisture in the Roof Cavities of Manufactured Houses. NISTIR 5880:60, 1996.
32. Tsongas G. A., Thornton B. A., Burch D. M., Walton G. N.: A Computer Analysis of the Moisture Performance of Roof Constructions in the U.S. DOE Moisture Control Handbook. NISTIR 5919:56, 1996.
33. Maref W, Lacasse MA, Booth D: Large-scale laboratory measurements and benchmarking of an advanced hygrothermal model, Proceedings, Building for the Future: The 16th CIB World Building Congress 2004, Rotterdam (Netherlands), 2004 (available from in-house publishing)
34. Kumaran M.K. MP, Cornick S.M., Lacasse M.A., Maref W., Rousseau M.Z., Nofal M., Quirt J.D., Dalgliesh W.A.: A Methodology to develop moisture management strategies for wood-frame walls in North America: application to stucco-clad walls, Proceedings, 6th Nordic Building Physics Symp., Trondheim, Norway, June 17-19, 2002 (available from NRCC-45694)
35. Kumaran M. K. MP, Cornick S. M., Lacasse M. A., Rousseau M. Z., Maref W., Nofal M., Quirt J. D., Dalgliesh W. A.: An Integrated methodology to develop moisture management strategies for exterior wall systems, Proceedings, 9th Canadian Conference on Building Science and Technology, Vancouver, Feb. 27-28,, 2003 (available from NRC Publications Archive)
36. Maref W, Lacasse, M., Kumaran, M. K. and Swinton, M. C.: Benchmarking of the advanced hygrothermal model hygIRC with mid scale experiments, Proceedings, Canadian conference on building energy simulation, Montreal, Canada, September 11th - 13th, 2003 (available from NRCC-43970)
37. Maref W, Cornick SM, Abdulghani K, Van Reenen D.: An Advanced hygrothermal design tool "1-D hygIRC", Proceedings, eSim 2004, Vancouver, June 10-11, 2004 (available from NRCC-46902)
38. Mukhopadhyaya P, Kumaran K, van Reenen D: Vapour barrier and moisture response of wood-frame stucco wall – results from hygrothermal simulation, Proceedings, CIB World Building Congress 2004, Toronto, Ontario, 2004 (available from NRCC-46864)
39. Bomberg M.T.,Rousseau M.Z.,Desmarais G.,Nicholls M.,Lacasse M.A.: Report from Task 2 of MEWS Project - Description of 17 Large Scale Wall Specimens Built for Water Entry Investigation in IRC Dynamic Wall Testing Facility, in MEWS Project report, Vol, 2002, p 141.

40. Kumaran K., Lackey J., Normandin N., van Reenen D., Tariku F.: Summary Report from Task 3 of MEWS Project at the Institute for Research in Construction – Hygrothermal Properties of Several Building Materials, Ottawa, Canada, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, 2002.
41. Cornick S, Dalglish A, Said N, Reda D, Fitsum T, Kumaran M. K.: Report from Task 4 of MEWS Project Task 4- Environmental Conditions Final Report, Ottawa, Canada, 2002.
42. Lacasse M. A., O'connor T., Nunes S., Beaulieu P.: Report from task 6 of MEWS project -- experimental assessment of water penetration and entry into wood-frame wall specimens, - final report, Canada NRC (ed), Vol, 2003.
43. Mukhopadhyaya P., Kumaran K., Tariku F., Reenen D.V.: Final report from task 7 of MEWS long-term performance: predict the moisture management performance of wall systems as a function of climate, material properties, etc. through mathematical modelling, in, Vol Institute for Research in Construction, 2003.
44. Beaulieu P., Bomberg M. T., Cornick S. M., Dalglish W. A., Desmarais, G., Djebbar R., Kumaran M. K., Lacasse M. A.: Report from Task 8 of MEWS Project - MEWS Methodology for Developing Moisture Management Strategies - Application to Stucco Clad Wood-Frame Walls in North America, in, Vol. Ottawa, Canada, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, 2002.
45. Kumaran MK: IEA Anmex 24 - Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Task 3: Material Properties, Vol 3 Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, 1996.
46. Kalagasidis AS: The Whole Model Validation for HAM-Tools—Case Study: Hygrothermal Conditions in a Cold Attic under Different Ventilation Regimes and Different Insulating Materials, 03-6 RR (ed): Department of Building Technology, Chalmers University of Technology, Vol. Gothenburg, Sweden, 2003.
47. Künzel H.M.: Simultaneous heat and moisture transport in building components—One- and two-dimensional calculation using simple parameters., in, Vol IRB Verlag Stuttgart ISBN 3-8167-4103-7, 1995.
48. Künzel HM, Kiebl K: Drying of Brick Walls after Impregnation. Bauinstandsetzen Ed 2:87-100, 1996.
49. Karagiozis A, Kuenzel H, Holm A: A North American Hygrothermal Model, Proceedings, ASHRAE Proceedings for the Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII, Clearwater Beach, Florida, December 2-7, 2001 (available from
50. Zhong Z, James E. Braun: Combined heat and moisture transport modeling for residential buildings in Davies P, W R (eds), Vol U.S. National Institute of Standards and Technology, 2008.
51. Nathan Mendes IR, Roberto Lamberts, Paulo C. Philippi, Karlos Budag: UMIDUS: a PC program for the prediction of heat and moisture transfer

- in porous building elements, in Building Simulation Conference – IBPSA 99, Vol. Brazil, pp 277-283.
52. Manual of COMSOL Multiphysics. (<http://www.comsol.com/>).
 53. Zhang JS: Combined Heat, Air, Moisture, and Pollutants Transport in Building Environmental Systems. JSME International Journal Series B 48:182-190, 2005.
 54. ANSYS: ANSYS CFX - Pre User's Guide, 2010.
 55. Ατσόνιος Ι: Πειραματικές Μέθοδοι για Μελέτη Θερμικής Συμπεριφοράς Κελύφους Κτιρίων, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 2012.
 56. Cengel YA: Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer, 2008.
 57. Harrison LP: Fundamental concepts and definitions relating to humidity. New York, A. Wexler and W.A. Wildhack, 1965.
 58. Hyland RW, Wexler A: Formulations for the thermodynamic properties of dry air from 173.15 K to 473.15 K, and of saturated moist air from 173.15 K to 372.15 K, at pressures to 5 MPa. ASHRAE Transactions 89:520-535, 1983.
 59. Gatley DP, Herrmann S, Kretschmar HJ: A twenty-first century molar mass for dry air. HVAC&R Research 14, 2008.
 60. Keeling CD, Whorf TP: Atmospheric carbon dioxide record from Mauna Loa. Scripps Institution of Oceanography, in CO₂ Research Group, Vol, 2005.
 61. Keeling CD, Whorf TP: Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. Trends: A compendium of data on global change., Center CDIA (ed), Vol Oak Ridge National Laboratory, 2005.
 62. Hyland RW, Wexler A: Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K. ASHRAE Transactions 89:500-519, 1983.
 63. Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam. . Canada, IAPWS 2007, 2007.
 64. Revised release on the pressure along the melting and sublimation curves of ordinary water substance, International Association for the Properties of Water and Steam, Vol. Canada, IAPWS 2008, 2008.
 65. Mason EA, Monchick L: Survey of the equation of state and transport properties of moist gases. New York, A. Wexler and W.A. Wildhack, 1965.
 66. Teodosiu R: Integrated moisture (including condensation) – Energy–airflow model within enclosures. Experimental validation. Building and Environment 61:197-209, 2013.
 67. ISOCAB. (<http://www.isocab.be>).
 68. Huang BJ, Liao YC, Kuo TC: Study of a new environmental chamber design. Applied Thermal Engineering 27:1967-1977, 2007.
 69. Van Belleghem M, Steeman M, Willockx A, Janssens A, De Paep: Benchmark experiments for moisture transfer modelling in air and porous materials. Building and Environment 46:884-898, 2011.

70. Adam O, Brocken H, Carmeliet J, Hens H, Roels S, Hagentoft CE: Determination of Liquid Water Transfer Properties of Porous Building Materials and Development of Numerical Assessment Methods: Introduction to the EC HAMSTAD Project. *Thermal Envelope and Building Science* 27:253-260, 2004.
71. Roels S, Carmeliet J., Hens H.: HAMSTAD WP1: Final report e Moisture transfer properties and materials characterization, in, Vol. KU Leuven, Laboratory of Building Physics, 2003.
72. Plagge R., Funk M., Scheffler G., Grunewald J.: Hysteresis of Moisture Storage and Moisture Permeability at Transient Conditions. *Water Retention and Moisture Conductivity*.
73. EN: Eurocode 3: Design of steel structures in General rules and rules for buildings, Vol The European Union Per Regulation 2005.
74. ASHRAE: Fundamentals (SI), 2005.