



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου
Σχεδιασμού

Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων

Διπλωματική Εργασία

«Θερμική απόκριση διατομών τοιχοποιίας με θεώρηση οριακών
συνθηκών εσωτερικής παρειάς, συναφών με καθορισμένη ροή
θερμότητας.»

Ψυλλάκη Περσεφόνη

Αρχιτέκτων Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων καθηγητής: Κάρολος Νικόλαος Κοντολέων

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2022

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

«Θερμική απόκριση διατομών τοιχοποιίας με θεώρηση οριακών
συνθηκών εσωτερικής παρειάς, συναφών με καθορισμένη ροή
θερμότητας.»

Ψυλλάκη Περσεφόνη

Αρχιτέκτον Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κάρολος Νικόλαος Κοντολέων

Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

ΣΕΠ ΕΑΠ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Στέλλα Τσόκα

Επίκουρη Καθηγήτρια

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πανεπιστημίου Πατρών

ΣΕΠ ΕΑΠ

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2022

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή Κο Κάρλο Νικόλαο Κοντολέων, για τη στήριξη, την καθοδήγηση και τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε κατά τη διάρκεια όλης της εργασίας. Ιδιαίτερα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, το σύζυγό μου Σωκράτη και το γιο μου Βαγγέλη για την αμέριστη συμπαράσταση, κατανόηση και υπομονή τους σ' αυτή μου την προσπάθεια.

Περίληψη

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η θερμική απόκριση συμβατικών κατακόρυφων κατασκευαστικών διατάξεων κτιριακού κελύφους, οι οποίες εκτίθενται εξωτερικά σε περιοδικές θερμοκρασιακές φορτίσεις, για δύο θερμοκρασιακά διαφορετικές χειμερινές ημέρες, ενώ εσωτερικά επιβάλλεται καθορισμένη ροή θερμότητας. Η θερμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού *COMSOL Multiphysics*, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων – διαφορών.

Η μελέτη διενεργήθηκε σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση διερευνήθηκε η συμβολή της ροής θερμότητας που επιβλήθηκε εσωτερικά, στην επίτευξη καθορισμένης μέσης θερμοκρασίας ισορροπίας, ξεκινώντας από την αρχική τιμή θερμοκρασίας (initial value). Στη δεύτερη φάση, αναζητείται το εύρος τιμών της ροής θερμότητας που θα πρέπει να επιβληθεί στο σύστημα, ώστε ξεκινώντας από τη μέση θερμοκρασία ισορροπίας της πρώτης φάσης να επιτευχθούν οι επιλεγμένες θερμοκρασίες στόχευσης, που βρίσκονται ,στο εύρος της θερμικής άνεσης, στο χαμηλότερο δυνατό επιτελεστικό χρόνο. Ερευνάται παράλληλα η επιτελεστική θερμοκρασία της εσωτερικής παρειάς της τοιχοποιίας, σε καθορισμένους χρόνους, εντός εικοσιτετραώρου.

Τα εξαγόμενα των προσομοιώσεων αφορούν στις τιμές των θερμοκρασιών της εσωτερικής παρειάς των διατομών που μελετήθηκαν. Ακολούθως προέκυψαν διαγραμματικές απεικονίσεις, μέσω των οποίων αναλύεται και παρουσιάζεται η επιρροή της ροής θερμότητας που επιβάλλεται στο εσωτερικό, συναρτήσει των δυναμικά μεταβαλλόμενων εξωτερικών συνθηκών, της κατασκευαστικής διάταξης και του πάχους θερμομόνωσης.

Τα ανωτέρω αποτελέσματα, οδηγούν σε συμπεράσματα τα οποία στοχεύουν, στη βελτίωση σχεδιασμού του κτιριακού κελύφους με ταυτόχρονη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων, με σκοπό την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης.

Λέξεις – Κλειδιά

Ροή θερμότητας, Επιτελεστικός χρόνος, Αρχική τιμή θερμοκρασίας (initial value), Μεταβολή θερμοκρασίας, Επιτελεστική θερμοκρασία, Πάχος θερμομόνωσης.

«Thermal response of masonry cross-sections considering internal
face boundary conditions, associated with a specified heat flow»

«Persefoni Psyllaki»

Abstract

The present thesis analyzes, the thermal response of conventional vertical construction sections of building shell, which are exposed to external periodic temperature loadings, for two different-temperature winter days, while a defined heat flow is imposed internally. The thermal analysis was performed using the *COMSOL Multiphysics* software, with the finite element-differences method.

The study was carried out in two phases. In the first phase, the contribution of the internally imposed heat flow has been investigated, in order to reach a specified average balance temperature, starting from the initial value. In the second phase, the range of the heat flow values that should be imposed on the system is sought, in order to reach the selected target temperatures, in the range of thermal comfort, in the shortest possible effective time, starting from the average balance temperature of the first phase. The effective temperature of the inner side of the masonry is also investigated, at specified times, within a twenty-four period. The simulation outputs, refer to the inner face temperature values of the studied cross-sections. Subsequently, diagrammatic illustrations were produced, through which the influence of the imposed heat flow on the interior is analyzed and presented, as a function of the dynamically changing external conditions, the construction arrangement and the thermal insulation thickness.

The above results lead to conclusions which aim to improve the design of the building envelope with a simultaneous reduction in energy requirements, with the ultimate goal of achieving thermal comfort conditions.

Keywords

Heat flow, Effective time, Initial value, Temperature variations, Effective temperature, Thermal insulation thickness.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xiv
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xv
Highlights	xvi
Συνεισφορά	xvii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο και στόχοι εργασίας	1
1.2 Μεθοδολογία	2
1.3 Δομή της εργασίας.....	2
2. Μετάδοση θερμότητας.....	5
2.1 Η έννοια της θερμότητας και οι μηχανισμοί μετάδοσής της στο χώρο	5
2.2 Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας	6
2.2.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή.....	6
2.2.2 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή.....	9
2.2.3 Μετάδοση θερμότητας με θερμική ακτινοβολία	11
2.3 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.....	14
2.3.1 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στερεών.....	14
2.3.2 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υγρών και αερίων.....	16
2.4 Συντελεστής συναγωγής h_c	16
3. Παράμετροι επιρροής της θερμικής συμπεριφοράς.....	19
3.1 Θερμική απόκριση επιφάνειας	19
3.2 Θερμική αντίσταση R	20
3.3 Θερμική μάζα – Θερμοχωρητικότητα C	23
3.4 Θερμική αδράνεια	26
3.5 Προηγούμενες έρευνες – Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	28
4. Μοντέλο θερμικής ανάλυσης.....	39
4.1 Υλικά δόμησης	39
4.2 Κατασκευαστικές διατομές	40
4.3 Συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος	41
4.4 Συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος	41
4.5 Το λογισμικό COMSOL Multiphysics	42
4.5.1 Το περιβάλλον μοντελοποίησης του COMSOL Multiphysics	44
4.5.2 Καθολικοί ορισμοί (Global Definitions).....	45
4.5.2.1 Παράμετροι (Parameters)	45
4.5.2.2 Συναρτήσεις (Functions)	46
4.5.2.3 Μεταβλητές (Variables)	47
4.5.3 Γεωμετρία (Geometry).....	48
4.5.4 Χρήση πλέγματος (Meshing)	49
4.5.5 Υλικά (Materials)	50

4.5.6	Μετάδοση θερμότητας σε στερεά (Heat transfer with Surface-to-Surface Radiation).....	52
4.5.6.1	Αρχική τιμή θερμοκρασίας (Initial Values)	53
4.5.6.2	Ροή θερμότητας με συναγωγή (Convective Heat Flux)	54
4.5.7	Μελέτες και επιλύσεις (Studies and Solvers)	55
4.5.7.1	Παραμετρική Σάρωση (Parametric Sweep)	55
4.5.7.2	Χρονικά Μεταβαλλόμενες Συνθήκες (Time Dependent).....	56
4.6	Μεθοδολογία διερεύνησης	57
5.	Θερμική ανάλυση.....	59
5.1	Διάρθρωση αποτελεσμάτων	59
5.2	Φάση 1 (1 st Stage).....	60
5.2.1	Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial} = 0^\circ\text{C}$	60
5.2.1.1	Διατομή IM.....	60
5.2.1.2	Διατομή MI.....	64
5.2.1.3	Διατομές IM-MI, $d_f=5\text{cm}$	67
5.2.1.4	Διατομές IM-MI, $d_f=10\text{cm}$	69
5.2.1.5	Επίτευξη επιθυμητής θερμοκρασίας ισορροπίας 15°C	71
5.2.2	Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial} = 10^\circ\text{C}$	73
5.2.2.1	Διατομή IM.....	73
5.2.2.2	Διατομή MI.....	76
5.2.2.3	Διατομές IM-MI, $d_f=5\text{cm}$	79
5.2.2.4	Διατομές IM-MI, $d_f=10\text{cm}$	81
5.2.2.5	Επίτευξη επιθυμητής θερμοκρασίας ισορροπίας 15°C	83
5.3	Φάση 2 (2 nd Stage).....	85
5.3.1	Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$	86
5.3.1.1	Διατομή IM.....	86
5.3.1.2	Διατομή MI.....	90
5.3.1.3	Διατομές IM-MI, $d_f=5\text{cm}$	93
5.3.1.4	Διατομές IM-MI, $d_f=10\text{cm}$	95
5.3.1.5	Επιτελεστική θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους – Διατομή IM	97
5.3.1.6	Επιτελεστική θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους – Διατομή MI	99
5.3.2	Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$	101
5.3.2.1	Διατομή IM.....	101
5.3.2.2	Διατομή MI.....	105
5.3.2.3	Διατομές IM-MI, $d_f=5\text{cm}$	108
5.3.2.4	Διατομές IM-MI, $d_f=10\text{cm}$	110
5.3.2.5	Επιτελεστική θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους – Διατομή IM	112
5.3.2.6	Επιτελεστική θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους – Διατομή MI	114
6.	Συμπεράσματα και δυνατότητες μελλοντικής έρευνας.....	117
6.1	Ανακεφαλαίωση διπλωματικής εργασίας.....	117
6.2	Συμπεράσματα αποτελεσμάτων θερμικής ανάλυσης	117

6.2.1	Επιρροή αύξησης πάχους μόνωσης	117
6.2.2	Επιρροή κατασκευαστικής διάταξης.....	119
6.2.3	Επιρροή θερμοκρασίας περιβάλλοντος.....	121
6.3	Ερμηνεία αποτελεσμάτων θερμικής ανάλυσης	123
6.4	Δυνατότητες μελλοντικής έρευνας.....	124
Βιβλιογραφία		125
Διαδικτυακές πηγές.....		128

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Σχήμα 2- 1: Μηχανισμοί διάδοσης θερμότητας (Incropera <i>et al.</i> , 2007).....	6
Σχήμα 2- 2: Μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή (διάχυση ενέργειας) (Incropera <i>et al.</i> , 2007).....	8
Σχήμα 2- 3: Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία (Incropera <i>et al.</i> , 2007).....	11
Σχήμα 3- 1: Θερμική απόκριση επιφάνειας εξωτερικού κελύφους κατά τη διαδικασία διάδοσης περιοδικού θερμικού κύματος (Κοντολέων, 2006)	20
Σχήμα 3- 2: Ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα για σύνθετο τοίχο.(Incropera <i>et al.</i> , 2007)	22
Σχήμα 3- 3: Ο ρόλος της θερμικής προστασίας του κτιριακού περιβλήματος κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο. (Κοντολέων, 2006)	24
Σχήμα 3-4: Διάδοση ενός περιοδικού κύματος θερμότητας από την εξωτερική στην εσωτερική επιφάνεια ενός τοίχου, (Kontoleon <i>et al.</i> , 2008)	26
Σχήμα 3- 5: Σχηματική αναπαράσταση της χρονικής υστέρησης φ και του συντελεστή μείωσης f , (Asan, 2000).	27
Σχήμα 3- 6: Σχηματική παρουσίαση μονάδας της προσομοίωσης ενός τοίχου, (Ulgen, 2002)	33
Σχήμα 3- 7: Μοντέλο ομαδοποιημένου θερμικού δικτύου της μεταβατικής ανάλυσης για τοίχο πολλαπλών στρώσεων, (Kontoleon, Eumorphoulou 2008)	35
Σχήμα 3- 8: Η ζώνη του εξεταζόμενου δωματίου και η σύνθετη δομή του τοίχου (Ozel 2012)	36
Σχήμα 4- 1: Χαρακτηριστικές διατάξεις εξωτερικής τοιχοποιίας μελέτης. Υλικά: 1. Συνθετικό κόνιαμα, 2. Πετροβάμβακας, 3. Οπλισμένο Σκυρόδεμα	40
Εικόνα 4- 2: Εκκίνηση προγράμματος COMSOL Multiphysics, επιλογή: (α) Γεωμετρία 2 διαστάσεων, (β) Μετάδοση θερμότητας σε στερεά, (γ) Μελέτη εξαρτώμενη από το χρόνο	44
Εικόνα 4- 3: Εισαγωγή παραμέτρων	45
Εικόνα 4- 4: Εισαγωγή συναρτήσεων για τον προσδιορισμό του λ , σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες	46
Εικόνα 4- 5: Εισαγωγή παραμέτρων	47
Εικόνα 4- 6: Μοντελοποίηση διατομής τοιχοποιίας σε 2D	48
Εικόνα 4- 7: Ψηφιοποίηση (meshing) του μοντέλου με πυκνότητα “extra fine”	49
Εικόνα 4- 8: Εισαγωγή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών στο μοντέλο	51
Εικόνα 4- 9: Μαθηματικό μοντέλο μετάδοσης θερμότητας του COMSOL, στο οποίο υπακούν τα στερεά στοιχεία διατομής	52
Εικόνα 4- 10: Ορισμός της τιμής $T_{out_mean} + 273.15$ ως αρχικής θερμοκρασίας.....	53
Εικόνα 4- 11: Ορισμός των τιμών (h) και (T_{ext}) για τη μοντελοποίηση της ροής θερμότητας με συναγωγή του εξωτερικού περιβάλλοντος	54
Εικόνα 4- 12: Ορισμός της τιμής σταθερής ροής θερμότητας q_{heat} του εσωτερικού περιβάλλοντος.....	55
Εικόνα 4- 13: Ορισμός παραμέτρου q_{heat} του εσωτερικού περιβάλλοντος.....	56
Εικόνα 4- 14: Ορισμός χρόνου έναρξης, χρονικού βήματος, χρόνου λήξης και σχετικής ανοχής στο μοντέλο.	57
Σχήμα 5-1: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του χρόνου, για διάφορες τιμές q_{heat} για: α) $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat}	63

Σχήμα 5-2: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , διατομής MI, συναρτήσει του χρόνου, για διάφορες τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} .	66
Σχήμα 5-3: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου, για διάφορες τιμές q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$ για IM & MI, δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$ για IM & MI	68
Σχήμα 5-4: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου, για διάφορες τιμές q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$ για IM & MI, δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$ για IM & MI	70
Σχήμα 5-5: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου, για τις συγκεκριμένες q_{heat} , προς επίτευξη θερμικής ισορροπίας σε μέση θερμοκρασία 15°C α) διατομής IM, για $d_i=5\text{cm}$, β) διατομής IM, για $d_i=10\text{cm}$, γ) διατομής MI, για $d_i=5\text{cm}$, δ) διατομής MI, για $d_i=10\text{cm}$.	72
Σχήμα 5-6: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} .	75
Σχήμα 5-7: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , διατομής MI, συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} .	78
Σχήμα 5-8: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$ για IM & MI, δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$ για IM & MI	80
Σχήμα 5-9: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$ για IM & MI, δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$ για IM & MI	82
Σχήμα 5-10: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου για τις συγκεκριμένες q_{heat} , προς επίτευξη θερμικής ισορροπίας σε μέση θερμοκρασία 15°C α) διατομής IM, για $d_i=5\text{cm}$, β) διατομής IM, για $d_i=10\text{cm}$, γ) διατομής MI, για $d_i=5\text{cm}$, δ) διατομής MI, για $d_i=10\text{cm}$.	84
Σχήμα 5-11: $T_{out}=0 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του χρόνου για τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} για $d_i=5\text{cm}$ & $d_i=10\text{cm}$.	89
Σχήμα 5-12: $T_{out}=0 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , διατομής MI, συναρτήσει του χρόνου για τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} για $d_i=5\text{cm}$ & $d_i=10\text{cm}$.	92
Σχήμα 5-13: $T_{out}=0 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου για τιμές q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$ για IM & MI	94
Σχήμα 5-14: $T_{out}=0 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου, για τιμές q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Μέγιστη	

θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$ για IM & MI	96
Σχήμα 5-15: $T_{out}=0\pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$.Θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του q_{heat} , σε καθορισμένους χρόνους, για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$, γ) συγκριτικά και για τα δύο πάχη μόνωσης.	98
Σχήμα 5-16: $T_{out}=0\pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$.Θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} , διατομής MI, συναρτήσει του q_{heat} , σε καθορισμένους χρόνους, για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$, γ) συγκριτικά και για τα δύο πάχη μόνωσης.	100
Σχήμα 5-17: $T_{out}=10\pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του χρόνου για τιμές του q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} για $d_i=5\text{cm}$ & $d_i=10\text{cm}$	104
Σχήμα 5-18: $T_{out}=10\pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , διατομής MI, συναρτήσει του χρόνου, για τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} για $d_i=5\text{cm}$ & $d_i=10\text{cm}$	107
Σχήμα 5-19: $T_{out}=10\pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου, για τιμές q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$ για IM & MI	109
Σχήμα 5-20: $T_{out}=10\pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου για τιμές q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών θερμικής άνεσης, συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$ για IM & MI	111
Σχήμα 5-21: $T_{out}=10\pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$.Θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του q_{heat} , σε καθορισμένους χρόνους, για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$, γ) συγκριτικά και για τα δύο πάχη μόνωσης.	113
Σχήμα 5-22: $T_{out}=10\pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$.Θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} , διατομής MI, συναρτήσει του q_{heat} , σε καθορισμένους χρόνους, για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$, γ) συγκριτικά και για τα δύο πάχη μόνωσης.	115

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4-1: Υλικά και θερμοφυσικές τους ιδιότητες.....	39
Πίνακας 4- 2: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υλικών πλήρωσης και θερμομόνωσης	40
Πίνακας 5- 1: Εύρος των τιμών θερμικής ροής που θα επιβληθεί σε κάθε τύπο εξεταζόμενης διατομής (q_{heat_2days}) , σε σχέση με τις τιμές ροής θερμότητας που οδήγησαν στο initial value των 15°C ($q_{heat_15^{\circ}\text{C}}$).....	85

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

T_{in}	εσωτερική θερμοκρασία	[°C]
T_{out}	εξωτερική θερμοκρασία	[°C]
$T_{initial}$	αρχική τιμή θερμοκρασίας	[°C]
T_{min}	minimum τιμή θερμοκρασίας	[°C]
T_{max}	maximum τιμή θερμοκρασίας	[°C]
T_{sa}	θερμοκρασία ήλιου-αέρα	[°C]
d_i	πάχος θερμομονωτικής στρώσης	[cm]
q_{heat}	ισχύς ροής θερμότητας που επιβάλλεται εσωτερικά	[W/m ²]
IM	διατομή εξωτερικής θερμομόνωσης	
MI	διατομή εσωτερικής θερμομόνωσης	
TEE	Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας	
TOTEE	Τεχνικές Οδηγίες Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας	

Highlights

- Διερεύνηση των μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας και των παραμέτρων επιρροής της θερμικής συμπεριφοράς
- Διαμόρφωση του μοντέλου θερμικής ανάλυσης και της μεθοδολογίας διερεύνησης
- Αποτίμηση και διάρθρωση αποτελεσμάτων της θερμικής ανάλυσης
- Εκτίμηση της επιρροής των παραμέτρων που διαμορφώνουν τη θερμική συμπεριφορά των εξεταζόμενων διατομών
- Αξιοποίηση συμπερασμάτων και μελλοντική επέκταση της έρευνας

Συνεισφορά

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας συνίσταται στην κατανόηση της επιρροής, των χαρακτηριστικών του κτιριακού κελύφους, των περιβαλλοντικών συνθηκών καθώς και των εσωτερικών συνθηκών, στη θερμική συμπεριφορά της κατασκευής.

Παράλληλα, από τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης μπορούν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα, που θα αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για τη βελτίωση του σχεδιασμού, με άμεση συνέπεια την επίτευξη θερμικής άνεσης και τη βελτίωση της διαβίωσης μέσα στο κτίριο.

Επιπροσθέτως, η έρευνα φιλοδοξεί να συμβάλλει στην προώθηση στρατηγικών για μείωση των απαιτήσεων σε ενεργειακό φορτίο, καθώς και να αποτελέσει έναυσμα για μελλοντική περεταίρω μελέτη.

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και στόχοι εργασίας

Η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται συνεχώς ως αποτέλεσμα της αύξησης του πληθυσμού και της ανόδου του βιοτικού επιπέδου. Οι περισσότερες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν ακόμη ορυκτά καύσιμα τα οποία εξαντλούνται με πολύ μεγάλους ρυθμούς με αποτέλεσμα άνοδο των τιμών και σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Έτσι, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι το πιο αποτελεσματικό μέσο για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων εκτός από τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. (Al-Sanea *et al.*, 2013)

Μεγάλο μέρος της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται για την ψύξη και θέρμανση των χώρων κυρίως σε κτίρια κατοικιών. Το γεγονός οφείλεται στη μετάδοση θερμότητας μέσω του κελύφους του κτιρίου, λόγω των ακραίων εξωτερικών συνθηκών που επικρατούν. Ο σωστός σχεδιασμός του κελύφους ενός κτιρίου και των στοιχείων του είναι ένα μέσο για την αποτελεσματική μείωση των απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης-ψύξης. Η θερμομόνωση είναι ένας από τους πιο σημαντικούς τρόπους για την επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας των κτιρίων. Στα παθητικά συστήματα, οι θερμικές μάζες στους τοίχους και τις στέγες κτιρίων, λειτουργούν ως στοιχεία θερμικής αποθήκευσης που συμβάλλουν στη μείωση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια (Al-Sanea *et al.*, 2011, Ozel, 2014).

Ο λεπτομερής καθορισμός της θερμικής αδράνειας ενός κελύφους κτιρίου μπορεί να οδηγήσει σε έναν ολιστικό βιοκλιματικό σχεδιασμό, για το λόγο ότι ο υπολογισμός των παραμέτρων της, παρέχει έναν έμμεσο δείκτη των συνθηκών θερμικής άνεσης εσωτερικού χώρου. Παράλληλα προσφέρει τη δυνατότητα σύλληψης στρατηγικών για τη μείωση των απαιτήσεων σε ενεργειακό φορτίο και κατά συνέπεια στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Επιπλέον, είναι ευρέως γνωστό ότι το πάχος της θερμομόνωσης, η επιλογή δομικών υλικών και το πρότυπο κατασκευής επηρεάζουν την ικανότητα ενός κτιρίου να διατηρεί τη θερμότητα, προς μείωση της συμβατικής κατανάλωσης ενέργειας το χειμώνα και αποφυγή υπερθέρμανσης το καλοκαίρι. Για τους λόγους αυτούς πολλοί ερευνητές επικέντρωσαν τη μελέτη τους στην ανάλυση των επιπτώσεων διαφορετικών θέσεων θερμικής μάζας και μονωτικών στρωμάτων στα δομικά στοιχεία, προκειμένου να αντιμετωπίσουν τη βελτιστοποίηση του πάχους της μόνωσης. Επιπλέον, πολλές μέθοδοι

έχουν αναπτυχθεί επίσης για την εκτίμηση του πάχους της θερμομόνωσης που απαιτείται για να επιτευχθεί μια επιθυμητή ροή θερμότητας. (Mavromatidis *et al.*, 2012)

Στην παρούσα μελέτη θα εξεταστεί η θερμική απόκριση διατομών εξωτερικής τοιχοποιίας οι οποίες εκτίθενται εξωτερικά σε περιοδικές θερμοκρασιακές φορτίσεις, ενώ εσωτερικά επιβάλλεται καθορισμένη ροή θερμότητας. Η μελέτη θα εστιάσει στη συμβολή της ροής θερμότητας που θα επιβληθεί στο εσωτερικό, για την επίτευξη θερμοκρασιών που ανήκουν στο εύρος της θερμικής άνεσης, σε σύντομο χρονικό διάστημα στον υπό μελέτη χώρο, λαμβάνοντας υπόψιν τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν και τα χαρακτηριστικά των διατομών.

Θα εξεταστούν διατομές από οπλισμένο σκυρόδεμα που εκτίθενται σε δύο διαφορετικές εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες χειμερινής περιόδου και θα μελετηθούν τα ανωτέρω για διαφορετικά πάχη και θέσεις θερμομόνωσης.

Τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν θα αφορούν στις τιμές των θερμοκρασιών της εσωτερικής παρειάς των διατομών που μελετήθηκαν.

1.2 Μεθοδολογία

Η θερμική προσομοίωση και ανάλυση θα διεξαχθεί με τη μέθοδο δυναμικής κατάστασης θερμικής ισορροπίας, εκείνης των πεπερασμένων στοιχείων-διαφορών. Μέσω του λογισμικού COMSOL Multiphysics θα εκτελεστούν προσομοιώσεις ροής θερμότητας για έναν αριθμό διατομών κατακόρυφων τοιχοποιιών. Στις παρούσες διατομές θα καταγράφεται η διακύμανση της θερμοκρασίας στην εσωτερική παρειά των στοιχείων, ανά ισχύ εσωτερικής ροής και η ανάλυση θα εστιαστεί στο χρονικό διάστημα επίτευξης θερμικής άνεσης.

1.3 Δομή της εργασίας

Η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια, ως εξής:

Το **πρώτο κεφάλαιο** αποτελεί την εισαγωγή της μελέτης, στην οποία παρουσιάζεται το γενικότερο περιβάλλον στο οποίο θα κινηθεί η μελέτη. Αναλύονται επίσης, το αντικείμενο και οι στόχοι της, η μεθοδολογία καθώς και η δομή της.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο**, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της μετάδοσης θερμότητας και οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας. Στην πρώτη ενότητα, γίνεται ανάλυση των βασικών εννοιών της θερμότητας. Στη δεύτερη ενότητα αναλύονται οι τρεις μηχανισμοί θερμότητας,

Στην τρίτη ενότητα αναλύεται συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, ενώ στην τέταρτη ο συντελεστής συναγωγής.

Στο **τρίτο κεφάλαιο**, αναφέρονται οι παράμετροι που επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά του κτιριακού κελύφους. Αποτελείται από πέντε ενότητες. Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει την περιγραφή των παραγόντων που επιδρούν στην θερμική απόκριση των κατασκευών, τη θερμική αδράνεια και τη θερμική μάζα. Στη δεύτερη ενότητα αναλύεται η έννοια της θερμικής αντίστασης, στην τρίτη ενότητα η έννοια της θερμικής μάζας. Στην έννοια και τα φυσικά μεγέθη που σχετίζονται με τη θερμική αδράνεια εστιάζει η τέταρτη ενότητα, ενώ στην πέμπτη ενότητα γίνεται παρουσίαση προηγούμενων ερευνών και μία βιβλιογραφική επισκόπηση.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται το μοντέλο της θερμικής ανάλυσης. Αποτελείται από έξι ενότητες. Στην πρώτη ενότητα, αφορά στα υλικά δόμησης του μοντέλου που θα προσομοιωθεί, ενώ στη δεύτερη ενότητα περιγράφεται η δομή του μοντέλου. Στη τρίτη και τέταρτη ενότητα οριοθετούνται οι συνθήκες εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος της μελέτης αντίστοιχα. Στην πέμπτη ενότητα γίνεται περιγραφή του περιβάλλοντος μοντελοποίησης του λογισμικού COMSOL Multiphysics και αναλύονται τα δεδομένα που εισάγονται. Στη έκτη ενότητα αναλύεται η μεθοδολογία διερεύνησης που θα ακολουθηθεί. Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρατίθενται τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης, τα οποία ομαδοποιούνται σε τρεις ενότητες. Στην πρώτη ενότητα περιγράφεται η διάρθρωση των αποτελεσμάτων. Η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης της θερμικής ανάλυσης, ενώ η τρίτη ενότητα περιέχει τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης θερμικής ανάλυσης.

Τέλος στο **έκτο κεφάλαιο**, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Διαρθρώνεται σε τέσσερις ενότητες. Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει μία σύντομη ανακεφαλαίωση της διπλωματικής εργασίας. Στη δεύτερη ενότητα συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη θερμική ανάλυση. Στην τρίτη ενότητα, ερμηνεύονται αναλυτικά τα συμπεράσματα της ανάλυσης και τέλος στην τέταρτη ενότητα παρουσιάζονται προοπτικές για μελλοντικές έρευνες σχετικά με το θέμα.

2. Μετάδοση θερμότητας

2.1 Η έννοια της θερμότητας και οι μηχανισμοί μετάδοσής της στο χώρο

Η διαφορά θερμοκρασίας μέσα σε ένα σώμα ή μεταξύ διαφορετικών σωμάτων που βρίσκονται σε αλληλεπίδραση έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά ενέργειας (θερμότητας στην περίπτωση μας). Η μεταφορά θερμότητας οδηγεί στην αλλαγή θερμοκρασιών και την απώλεια θερμότητας μέχρι το σύστημα να ισορροπήσει. Η μεταφορά θερμότητας είναι ο κύριος μηχανισμός εκδήλωσης των περιβαλλοντικών μεταβολών στο εσωτερικό των κτηρίων. Θερμότητα είναι η ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σύστημα σε άλλο ως αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής διαφοράς. Η μεταφορά ενέργειας ως θερμότητα γίνεται πάντα από το μέσο υψηλότερης θερμοκρασίας στο χαμηλότερο και η θερμοκρασιακή μεταφορά σταματά όταν και τα δύο μέσα φτάσουν στην ίδια θερμοκρασία. (Cengel, 2002, TEE, 2011, Δ. Κατσαπρακάκης *et al.*, 2015)

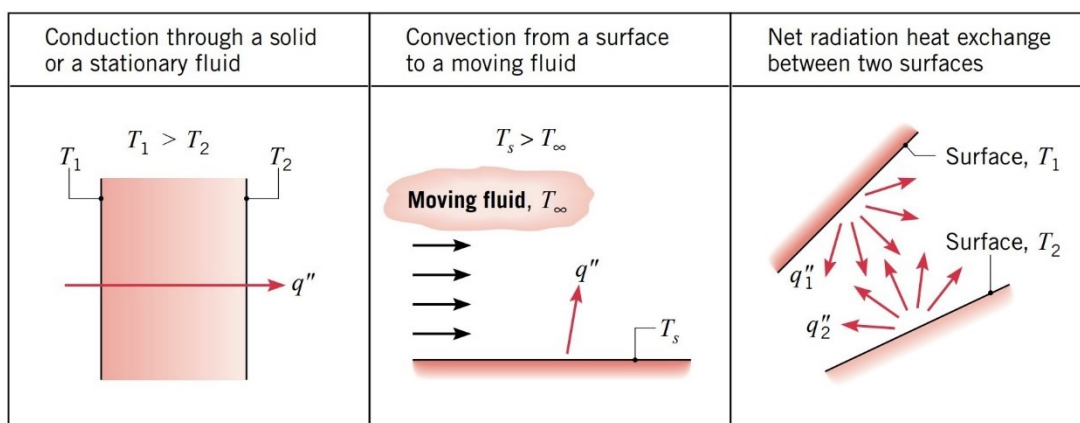
Η θερμοδυναμική ανάλυση ασχολείται με το ποσό της μεταφοράς θερμότητας καθώς ένα σύστημα υφίσταται μια διαδικασία από τη μία κατάσταση ισορροπίας στην άλλη προκειμένου να ικανοποιηθεί η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Στην πράξη, μας απασχολεί περισσότερο ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα χρόνου) παρά η ποσότητα της. Η επιστήμη που ασχολείται με τον προσδιορισμό του ρυθμού ροής τέτοιων μεταφορών ενέργειας μέσω των υλικών, είναι η μετάδοση θερμότητας. Η Θερμοδυναμική ασχολείται με τις καταστάσεις ισορροπίας και τις αλλαγές από τη μια κατάσταση ισορροπίας στην άλλη. Η μεταφορά θερμότητας, από την άλλη πλευρά, ασχολείται με συστήματα που στερούνται θερμικής ισορροπίας. Επομένως, η μελέτη της μεταφοράς θερμότητας δεν μπορεί να βασίζεται μόνο στις αρχές της θερμοδυναμικής. Ωστόσο, οι νόμοι της θερμοδυναμικής θέτουν το πλαίσιο για την επιστήμη της μεταφοράς θερμότητας. (Cengel, 2002)

Ο ρυθμός που μεταφέρεται η θερμότητα προς μια ορισμένη κατεύθυνση συναρτάται από το μέγεθος της διαβάθμισης θερμοκρασίας (η διαφορά θερμοκρασίας ανά μονάδα μήκους ή ο ρυθμός μεταβολής του θερμοκρασία) προς αυτή την κατεύθυνση. Μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαβάθμιση οδηγεί σε μεγαλύτερο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. (Cengel, 2002)

Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται με τρεις μηχανισμούς (Σχήμα 2-1):

- Αγωγή (conduction), που αναφέρεται στη μεταφορά μέσω επαφής ενός μέσου (στερεού, υγρού ή αερίου σε ηρεμία) (Δ. Κατσαπρακάκης *et al.*, 2015)
- Συναγωγή (convection), που αναφέρεται στη μεταφορά θερμότητας μεταξύ στερεής επιφάνειας και του παρακείμενου ρευστού (υγρού ή αερίου) που κινείται (Cengel, 2002)
- Ακτινοβολία (radiation), που αναφέρεται στην ενέργεια που ακτινοβολείται από τα σώματα που βρίσκονται σε υψηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα από αυτά μηδενός και δεν απαιτεί την παρουσία ενδιάμεσου μέσου (Cengel, 2002, Κοντολέων, 2006).

Όλοι οι τρόποι απαιτούν την ύπαρξη θερμοκρασιακής διαφοράς και όλοι οι τρόποι λειτουργίας διεξάγονται από το μέσο υψηλής θερμοκρασίας σε ένα χαμηλότερης θερμοκρασίας. (Cengel 2002)



Σχήμα 2- 1: Μηχανισμοί διάδοσης θερμότητας (Incropera *et al.*, 2007)

2.2 Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας

2.2.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή

Αγωγή (conduction), είναι η ενεργειακή διάδοση από τα πιο δραστήρια σωματίδια ενός μέσου στα όμορα, λιγότερο δραστήρια, ως απόρροια των διάδραση μεταξύ των σωματιδίων. Η αγωγή εμφανίζεται σε μακροσκοπικώς ακίνητα σώματα (στερεά ή ρευστά σε ακινησία) και συνδέεται με τη συναλλαγή ενέργειας σε μοριακό επίπεδο. Στα ρευστά (υγρά και αέρια), η αγωγιμότητα προκαλείται από τις μοριακές συγκρούσεις και τη διάχυση των μορίων κατά την τυχαία κίνησή τους. Στα στερεά, προκαλείται από τις μοριακές ταλαντώσεις σε μία

πλεγματική δομή και από τη μεταφορά ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων. (Cengel 2002) . (Νικολός, 2007)

Ο φυσικός μηχανισμός αγωγιμότητας εξηγείται πιο εύκολα θεωρώντας ένα αέριο στο οποίο υπάρχει θερμοκρασιακή κλίση και να υποθέσουμε ότι δεν υπάρχει μαζική ή μακροσκοπική κίνηση. Το αέριο καταλαμβάνει το χώρο μεταξύ δύο επιφανειών που διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Αν συσχετίσουμε τη θερμοκρασία σε οποιοδήποτε σημείο, με την ενέργεια των μορίων αερίου που βρίσκονται κοντά στο σημείο, βλέπουμε ότι αυτή σχετίζεται με την τυχαία κίνηση, καθώς και με τις εσωτερικές περιστροφικές και κινήσεις ταλάντωσης των μορίων.

Οι υψηλότερες θερμοκρασίες συνδέονται με υψηλότερη μοριακή ενέργεια και όταν τα γειτονικά μόρια συγκρούονται προκαλείται μεταφορά ενέργειας από τα πιο ενεργητικά μόρια στα λιγότερο ενεργητικά. Στην περίπτωση παρουσίας θερμοκρασιακής κλίσης η μετάδοση ενέργειας λόγω αγωγιμότητας έχει κατεύθυνση από την υψηλότερη θερμοκρασιακή περιοχή προς τη χαμηλότερη, μέσω των μοριακών αλληλεπιδράσεων. Έτσι ονομάζουμε την καθαρή μεταφορά ενέργειας με τυχαία μοριακή κίνηση ως διάχυση ενέργειας. (Νικολός, 2007, Incropera *et al.*, 2007)

Η κατάσταση είναι περίπου η ίδια στα υγρά, εκεί τα μόρια είναι πιο κοντά και οι μοριακές αλληλεπιδράσεις είναι ισχυρότερες και συχνότερες. Εκεί το φαινόμενο της διάχυσης περιμένουμε να είναι πιο έντονο, λόγω των αλληλεπιδράσεων των μορίων. Στην περίπτωση των στερεών, η αγωγιμότητα μπορεί να αποδοθεί στην ατομική δραστηριότητα με τη μορφή ταλαντώσεων πλέγματος. Η σύγχρονη άποψη ότι η μετάδοση της ενέργειας οφείλεται σε κύματα πλέγματος που προκαλούνται από την ατομική κίνηση. Στην περίπτωση των μονωτών, η μεταφορά ενέργειας γίνεται αποκλειστικά μέσω αυτών των κυμάτων πλέγματος. Στην περίπτωση των αγωγών η διάχυση της θερμικής ενέργειας οφείλεται στη μεταφορική κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, παράλληλα με τα πλεγματικά κύματα. (Νικολός, 2007, Incropera *et al.*, 2007)

Οι διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας με αγωγή είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν μέσω των εξισώσεων ρυθμού μετάδοσης της θερμότητας. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της ποσότητας ενέργειας που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου. Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή, περιγράφεται (μονοδιάστατα) από το νόμο του Fourier. Για το μονοδιάστατο επίπεδο τοίχωμα που φαίνεται στην Εικόνα 2, πάχους d (m) με τις άλλες δύο διαστάσεις να τείνουν στο άπειρο, όπου στη μία παρειά επικρατεί θερμοκρασία $T1$ ($^{\circ}K$) και στην άλλη θερμοκρασία $T2$ ($^{\circ}K$), με $T1 > T2$ και στο

εσωτερικό του τοιχώματος η θερμοκρασιακή κλίση είναι σταθερή, τότε ο ρυθμός μετάδοσης της θερμότητας κατά την κατεύθυνση x (κάθετα στο επίπεδο του σώματος) δίνεται από τη σχέση (Νικολός, 2007, Incropera *et al.*, 2007):

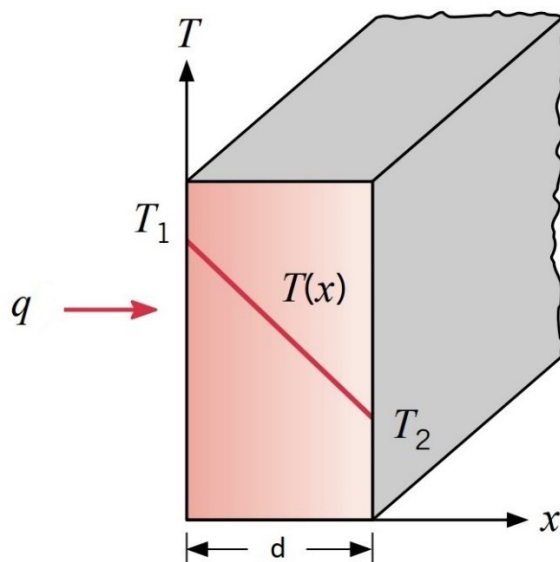
$$q = -\lambda * \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

όπου:

q : ροή θερμότητας λόγω αγωγής (πυκνότητα θερμορροής) (W/m^2)

λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)

T : απόλυτη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{K}$)



Σχήμα 2- 2: Μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή (διάχυση ενέργειας) (Incropera *et al.*, 2007)

Η πυκνότητα θερμορροής q (heat flux) (W/m^2) είναι ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας στην κατεύθυνση x ανά μονάδα επιφάνειας κάθετη προς την κατεύθυνση μεταφοράς και είναι ανάλογος με τη κλίση της θερμοκρασίας, dT/dx , προς αυτή την κατεύθυνση (Σχήμα 2-2). Η παράμετρος λ είναι μια ιδιότητα μεταφοράς γνωστή ως συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($\text{W}/\text{m K}$), είναι δε χαρακτηριστική ιδιότητα του υλικού. Το αρνητικό πρόσημο είναι συνέπεια του γεγονότος ότι η θερμότητα μεταφέρεται κατά τη φορά των αρνητικών θερμοκρασιακών κλίσεων. Κάτω από τις συνθήκες σταθερής κατάστασης που

φαίνονται στο σχήμα, όπου η κατανομή θερμοκρασίας είναι γραμμική, η κλίση της θερμοκρασίας μπορεί να εκφραστεί ως (Κοντολέων, 2006, Incropera *et al.*, 2007):

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{d} \quad (2.2)$$

Έτσι η πυκνότητα θερμορροής από τα (2.1) και (2.2) γίνεται (Κοντολέων, 2006):

$$q = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{d} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} = \lambda \frac{\Delta T}{d} \quad (2.3)$$

Η θερμορροή Q μέσω επιφάνειας ομοιογενούς υλικού, εμβαδού A υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = A * q = A * \lambda \frac{\Delta T}{d} = \frac{\Delta T}{\frac{d}{\lambda * A}} \quad (2.4)$$

2.2.2 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή

Συναγωγή είναι ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και του παρακείμενου κινούμενου ρευστού, όταν βρίσκονται σε επαφή και σε διαφορετική θερμοκρασία. Η λειτουργία μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή αποτελείται από δύο ταυτόχρονους μηχανισμούς. Ο πρώτος μηχανισμός αφορά στην ενεργειακή μεταφορά λόγω τυχαίας κίνησης των μορίων (διάχυση). Ο δεύτερος μηχανισμός αφορά στην ενέργεια που μεταφέρεται όταν το ρευστό κινείται μαζικά ή μακροσκοπικά, όπου τα στοιχειώδη σωματίδια των υγρών ή αερίων μεταφέρουν θερμική ενέργεια μαζί με τη μάζα τους, η οποία οφείλεται στην τυχαία κίνηση κατά τη μεταφορά τους, την περιστροφή τους εσωτερικά και την ταλάντωσή τους. Το μέγεθος της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή, είναι ανάλογο της ταχύτητας κίνησης του ρευστού. Ελλείψει κίνησης ρευστού όγκου, η μετάδοση θερμικής ενέργειας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και του παρακείμενου ρευστού γίνεται με καθαρή αγωγιμότητα. (Cengel, 2002, Δ. Κατσαπρακάκης *et al.*, 2015, Κοντολέων, 2006, Νικολός, 2007, Incropera *et al.*, 2007)

Ο νόμος ψύξης (ή θέρμανσης) του Newton περιγράφει τη μετάδοση με συναγωγή (Κοντολέων, 2006):

$$q = h_c * (T_s - T_\infty) \quad (2.5)$$

όπου:

q : πυκνότητα θερμορροής (W/m^2)

T_s : θερμοκρασία επιφάνειας ($^{\circ}\text{C}$)

T_{∞} : θερμοκρασία ρευστού ($^{\circ}\text{C}$)

h_c : ονομάζεται συντελεστής συναγωγής ($\text{W}/(\text{m}^2/\text{K})$) σχετίζεται από το είδος της ροής, τη μορφή της επιφάνειας και τα θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του ρευστού (Νικολός, 2007, Incropera *et al.*, 2007)

Η θερμορροή Q δίνεται σε μη γραμμική σχέση (Κ.Ν. Κοντολέων, 2006):

$$Q = h_c * A * (T_s - T_{\infty}) = \frac{\Delta T}{\frac{1}{h_c * A}} \quad (2.6)$$

όπου:

Q : θερμορροή (W)

A : εμβαδό επιφάνειας (m^2)

Η παρουσία μαζικής κίνησης του ρευστού έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της μετάδοσης θερμότητας μεταξύ της στερεάς επιφάνειας και του ρευστού και πραγματοποιείται εξαιτίας μίας εξωγενούς δύναμης. Η δύναμη αυτή εμφανίζεται είτε λόγω των μεταβολών της πυκνότητας, απόρροια των θερμοκρασιακών διαφορών, ή εξαιτίας της διαφοράς πίεσεως προερχόμενη από κάποια αντλία, ανεμιστήρα κλπ. Διακρίνονται τρία είδη συναγωγής (Cengel, 2002, Δ. Κατσαπρακάκης *et al.*, 2015, Κ.Ν. Κοντολέων, 2006, Νικολός, 2007, Incropera *et al.*, 2007):

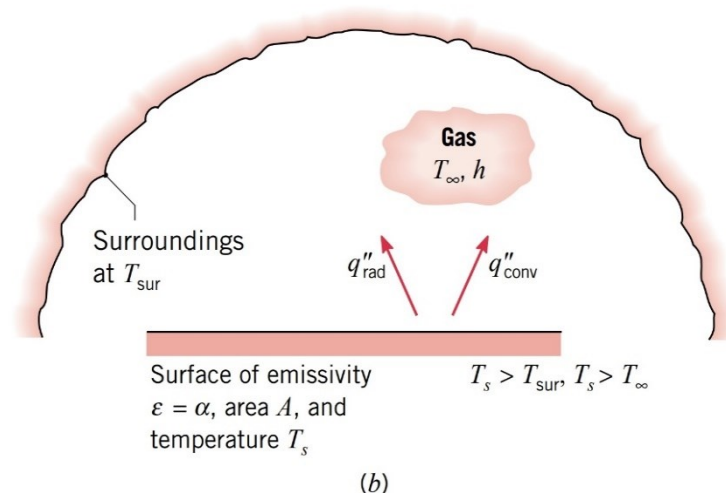
- Η φυσική ή ελεύθερη συναγωγή, όπου η κίνηση του ρευστού δημιουργείται από τις δυνάμεις άνωσης λόγω διακυμάνσεων πυκνότητας που οφείλονται στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του ρευστού. Χαμηλές τιμές ταχύτητας ρευστών και δυνάμεων άνωσης, είναι υπεύθυνες για το φαινόμενο.
- Εξαναγκασμένη συναγωγή όταν μία εξωτερική δύναμη, εκτός της βαρύτητας, συντηρεί τη ροή του ρευστού. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μεγαλύτερη ταχύτητα του ρευστού καθώς και ρυθμός μετάδοσης θερμότητας από εκείνες στη φυσική συναγωγή.

- Συνδυασμένη συναγωγή όπου συνυπάρχουν οι δύο προηγούμενες μορφές και μπορεί να συμβεί όταν οι ταχύτητες που σχετίζονται με τη ροή του ρευστού λόγω εξαναγκασμένης κυκλοφορίας είναι μικρές, ενώ οι δυνάμεις άνωσης είναι μεγάλες.

2.2.3 Μετάδοση θερμότητας με θερμική ακτινοβολία

Το είδος της ενέργειας που εκπέμπει η ύλη όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός ($-273.26\text{ }^{\circ}\text{C}$) αποτελεί τη θερμική ακτινοβολία. Ανεξάρτητα από τη μορφή της ύλης, η εκπομπή μπορεί να αποδοθεί σε αλλαγές στις διαμορφώσεις ηλεκτρονίων των συστατικών των ατόμων ή των μορίων. Η ενέργεια του πεδίου ακτινοβολίας μεταφέρεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, ή με φωτόνια, σύμφωνα με την κβαντομηχανική (Σχήμα 2- 3).

Σε αντίθεση με τους δύο προηγούμενους μηχανισμούς διάδοσης θερμότητας, η μεταφορά με ακτινοβολία δεν προϋποθέτει την παρουσία ενός ενδιάμεσου μέσου. Πρακτικά, η θερμική ακτινοβολία είναι ταχύτερη, αφού πραγματοποιείται με την ταχύτητα του φωτός και δεν εξασθενεί στο κενό. Στην πραγματικότητα, η μεταφορά ακτινοβολίας γίνεται πιο αποτελεσματικά στο κενό. Συχνά, η θερμότητα από την ακτινοβολία ψυχρών σωμάτων δε λαμβάνεται υπόψιν σε σχέση με την αγωγή και τη συναγωγή. Όταν όμως σχετίζεται με θερμά σώματα, συνεκτιμάται. Συμπερασματικά η μετάδοση θερμότητας που συντελείται σε χαμηλές / υψηλές θερμοκρασίες περιλαμβάνουν ασήμαντο / σημαντικό ποσοστό ακτινοβολίας. (Cengel, 2002, K.N. Κοντολέων, 2006, Incropera *et al.*, 2007)



Σχήμα 2- 3: Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία (Incropera *et al.*, 2007)

Η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής q (W/m^2) που δύναται να εκπέμπεται από μια επιφάνεια σε απόλυτη θερμοκρασία δίνεται από το Νόμο *Stefan–Boltzmann* (Cengel, 2002, Κοντολέων, 2006):

$$q = \sigma * T_s^4 \quad (2.7)$$

όπου:

σ : σταθερά των *Stefan–Boltzmann* ($\sigma = 5,66697 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$)

T_s : απόλυτη θερμοκρασία του σώματος ($^\circ \text{C}$)

Η εξιδανικευμένη επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία με αυτή τη μέγιστη πυκνότητα αποτελεί το μέλαν σώμα, ενώ η ακτινοβολία που εκπέμπει, ακτινοβολία μέλανος σώματος. Η εκπεμπόμενη από τις επιφάνειες θερμορροή, είναι μικρότερη από την ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία και περιγράφεται από την εξίσωση (Cengel, 2002, K.N. Κοντολέων, 2006):

$$q = \varepsilon * \sigma * T_s^4 \quad (2.8)$$

όπου:

ε : συντελεστής εκπομπής, $0 \leq \varepsilon \leq 1$ και εκφράζει το πόσο αποτελεσματικά μια επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια σε σχέση με το μέλαν σώμα.

Η ένταση της ροής συναρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος, το υλικό και το φινίρισμα της επιφάνειας (Incropera *et al.*, 2007).

Η απορροφητικότητα της επιφάνειας, είναι η ιδιότητα της ακτινοβολίας που εκφράζει το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας q (W/m^2) που απορροφά το σώμα και δίνεται από τον τύπο (Cengel, 2002, K.N. Κοντολέων, 2006):

$$q_a = \alpha * q \quad (2.9)$$

όπου:

q_a : ακτινοβολία που απορροφά ένα σώμα (W/m^2)

α : συντελεστής απορρόφησης (αδιάστατο φυσικό μέγεθος), με $0 \leq \alpha \leq 1$ και εξαρτάται από το είδος επιφάνεια και την ακτινοβολία. (Νικολός, 2007, Incropera *et al.*, 2007)

Η θερμορροή q που προκαλείται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας ενός σώματος και του περιβάλλοντός του, ορίζεται ως η διαφορά του ποσού της ακτινοβολίας που εκπέμπει η επιφάνεια του σώματος q_s από αυτή που εκπέμπει το περιβάλλον q_p και αποδίδεται από τη σχέση (Κοντολέων, 2006):

$$\begin{aligned} q &= \Delta q = q_s - q_p = \varepsilon * \sigma * T_s^4 - \varepsilon * \sigma * T_p^4 \rightarrow \\ q &= \varepsilon * \sigma * (T_s^4 - T_p^4) = h_r * (T_s - T_p) \end{aligned} \quad (2.10)$$

όπου:

q : πυκνότητα θερμορροής (W/m²)

q_s : εκπεμπόμενη ακτινοβολία επιφάνειας του σώματος (W/m²)

q_p : εκπεμπόμενη ακτινοβολία από το περιβάλλον (W/m²)

T_s : θερμοκρασία σώματος (K)

T_p : θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)

h_r : συντελεστής ακτινοβολίας (W/(m²K)), εξαρτάται από τις θερμοκρασίες T_s & T_p , τα ε , σ , A

από τα άνωθι προκύπτει:

$$\begin{aligned} h_r &= \varepsilon * \sigma * \frac{(T_s^2 + T_p^2) * (T_s + T_p) * (T_s - T_p)}{(T_s - T_p)} \rightarrow \\ h_r &= \varepsilon * \sigma * (T_s^2 + T_p^2) * (T_s + T_p) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Η θερμορροή μέσω μίας επιφάνειας A (m²) εκφράζεται από τη σχέση (Κοντολέων, 2006):

$$Q = \varepsilon * \sigma * A * (T_s^4 - T_p^4) = h_r * A * (T_s - T_p) = \frac{\Delta T}{1/(h_r * A)} \quad (2.12)$$

2.3 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Θερμική αγωγιμότητα λ ενός υλικού, μπορεί να οριστεί ως το ποσό της μεταφοράς θερμότητας διαμέσω ενός υλικού ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα διαφοράς θερμοκρασίας. Η θερμική αγωγιμότητα ενός υλικού αποτελεί την ικανότητα μετάδοσης θερμότητας του υλικού. Υλικά με μεγάλες τιμές λ , αποτελούν καλούς αγωγούς θερμότητας, ενώ υλικά με χαμηλό λ , αποτελούν κακούς αγωγούς θερμότητας ή μονωτές. Η ιδιότητα αυτή των υλικών συναρτάται από τη μοριακή και ατομική δομή τους όπως επίσης από την πίεση και τη θερμοκρασία. Θεωρείται δε ανεξάρτητη από την κατεύθυνση της μεταβίβασης, λόγω της θεώρησης των περισσότερων υλικών ως ισότροπα και ομοιογενή. (Cengel, 2002, Κοντολέων, 2006, Incropera *et al.*, 2007)

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία. Η διακύμανσή του σε ορισμένα εύρη θερμοκρασίας είναι αμελητέα για ορισμένα υλικά, αλλά σημαντική για άλλα. Στα αέρια αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ στα περισσότερα υγρά και τα στερεά η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του λ . (Cengel, 2002, Κοντολέων, 2006)

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ , εξαρτάται γραμμικά από τη θερμοκρασία, σύμφωνα με τη σχέση (Κοντολέων, 2006):

$$\lambda = \lambda_o * (1 + b_o * \Delta T) \quad (2.13)$$

όπου:

λ_o : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στη θερμοκρασία αναφοράς T_o (W / (m*K))

b_o : σταθερά του υλικού (K^{-1}) (υπολογίζεται πειραματικά)

ΔT : θερμοκρασιακή διαφορά (K)

2.3.1 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στερεών

Η μετάδοση θερμότητας στα στερεά οφείλεται σε δύο επιδράσεις: α) στα δονητικά πλεγματικά κύματα που προκαλούνται από τις μοριακές κινήσεις στις σχετικά σταθερές θέσεις με περιοδικό τρόπο και β) στη μεταφερόμενη ενέργεια από την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στο στερεό. Η θερμική αγωγιμότητα ενός στερεού λ προκύπτει από

το άθροισμα της θερμικής αγωγιμότητας λόγω δονήσεων του πλέγματος λ_l και της θερμικής αγωγιμότητας λόγω ροής των ηλεκτρονίων λ_e (Cengel, 2002, Κοντολέων, 2006)

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_l \quad (2.14)$$

Η σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα των καθαρών μετάλλων οφείλεται κυρίως στη ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων. Η συνιστώσα του πλέγματος της θερμικής αγωγιμότητας, κατά ένα μεγάλο ποσοστό, εξαρτάται από τον τρόπο που είναι διατεταγμένα τα μόρια.

Τα καθαρά μέταλλα έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, ενώ η θερμική αγωγιμότητα ενός κράματος δύο μετάλλων είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη από αυτή οποιουδήποτε μετάλλου. Ακόμη και μικρές ποσότητες σε ένα καθαρό μέταλλο «ξένων» μορίων που είναι από μόνα τους καλοί αγωγοί, διαταράσσουν σοβαρά τη ροή της θερμότητας σε αυτό το μέταλλο. (Cengel 2002)

Στα μη μεταλλικά υλικά, η διάδοση της θερμότητας οφείλεται στη διάδοση των κυμάτων στην κρυσταλλική δομή. Ειδικά στα κρυσταλλικά υλικά η διάδοση των κυμάτων είναι πολύ εύκολη και ορισμένες φορές το λ μπορεί να πάρει τιμή μεγαλύτερη από αυτή των μετάλλων. (Νικολός, 2007)

Τα υλικά θερμομόνωσης αποτελούνται από υλικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που συνδυάζονται για την επίτευξη ακόμη χαμηλότερης θερμικής αγωγιμότητας του συστήματος. Σε συμβατικές μονώσεις τύπου ινών, σκόνης και νιφάδων, ο αέρας εγκλωβίζεται στους πόρους του στερεού υλικού. Σε τέτοια συστήματα η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα και τις ιδιότητες επιφανειακής ακτινοβολίας του στερεού υλικού, καθώς και από τη φύση και το ογκομετρικό κλάσμα του αέρα ή του κενού χώρου. Ιδιαίτερη παράμετρος του συστήματος είναι η πυκνότητά του η οποία κατά ένα μεγάλο ποσοστό, εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο συσκευάζεται το υλικό. Η εισροή υγρασίας μειώνει τη θερμομονωτική ικανότητα των υλικών, καθώς ο αέρας που περιέχουν οι πόροι, αντικαθίσταται με νερό, που έχει χειρότερες θερμομονωτικές ιδιότητες από τον αέρα. (TEE, 2011, Κοντολέων, 2006, Incropera *et al.*, 2007)

2.3.2 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υγρών και αερίων

Στα ρευστά (υγρά και αέρια) η διαμοριακή απόσταση είναι πολύ μεγαλύτερη και η κίνηση των μορίων είναι πιο τυχαία από τα στερεά, η μεταφορά θερμικής ενέργειας είναι λιγότερο αποτελεσματική. Η θερμική αγωγιμότητα των αερίων και των υγρών είναι επομένως γενικά μικρότερη από αυτή των στερεών. (Incropera *et al.*, 2007)

Σε ένα υγρό ή αέριο, η κινητική ενέργεια των μορίων οφείλεται στην τυχαία μεταγραφική τους κίνηση καθώς και στις δονητικές και περιστροφικές τους κινήσεις. Αύξηση της θερμοκρασίας, προκαλεί αύξηση της ταχύτητας των μορίων, μεγαλύτερο αριθμό συγκρούσεων με αποτέλεσμα την καλύτερη μεταφορά θερμότητας. Η θερμική αγωγιμότητα ενός αερίου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και τη μείωση της μοριακής μάζας, ενώ για τα υγρά, ο μηχανισμός αγωγιμότητας της θερμότητας περιπλέκεται από το γεγονός ότι τα μόρια είναι πιο κοντά και ασκούν ένα ισχυρότερο διαμοριακό πεδίο δύναμης. Η θερμική αγωγιμότητα των υγρών συνήθως βρίσκεται μεταξύ αυτών των στερεών και αερίων (Cengel 2002)

2.4 Συντελεστής συναγωγής h_c

Ο συντελεστής συναγωγής h_c δεν είναι ιδιότητα του ρευστού. Είναι μια παράμετρος, καθορισμένη με πειραματικές μεθόδους, με διαφορετικές τιμές στα διάφορα σημεία μίας επιφάνειας, και η τιμή της συναρτάται από όλες τις μεταβλητές που επιδρούν στη μεταφορά, όπως το σχήμα και η ομαλότητα της επιφάνειας, η φύση της κίνησης του ρευστού, οι ιδιότητες του ρευστού και η ταχύτητα του ρευστού όγκου. (Cengel, 2002, Δ. Κατσαπρακάκης *et al.*, 2015).

Στα κτίρια τα οποία μελετάμε, θεωρείται ως ρευστό ο αέρας (σε ατμοσφαιρική πίεση), στο χώρο και το περιβάλλον, σε επαφή με οριζόντιες και κατακόρυφες επιφάνειες, έτσι ο συντελεστής h_c εξαρτάται από του κάτωθι παράγοντες (Δ. Κατσαπρακάκης *et al.*, 2015):

- **Ταχύτητα του αέρα**

Όταν αέρας με θερμοκρασία T_a , έρθει σε επαφή με επιφάνεια θερμοκρασίας T_e ($T_e < T_a$), τότε η θερμοκρασία του τείνει να προσεγγίσει τη θερμοκρασία επιφανείας. Ο ρυθμός των ροών θερμότητας μειώνεται όσο η θερμοκρασία του αέρα πλησιάζει τη θερμοκρασία επιφανείας. Ακολουθώς, θερμός αέρας αντικαθιστά τον κρύο. Η ταχύτητα αντικατάστασης είναι ανάλογη της ταχύτητας του αέρα, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο αριθμό εναλλαγών. Από

τα προηγούμενα συμπεραίνουμε ότι σημαντικός παράγοντας για την πραγματοποίηση μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή στις εξωτερικές επιφάνειες των κτηρίων, είναι η ταχύτητα του ανέμου. Επιπροσθέτως, το γεγονός του μεγαλύτερου βάρους του ψυχρού αέρα από τον αντίστοιχο θερμό, προκαλεί μία συνεχή κίνηση του αέρα με κατεύθυνση πάνω ή κάτω. Το φαινόμενο συναντάται μόνιμα, καλείται φυσική ή ελεύθερη ροή του αέρα και αποτελεί κύριο τρόπο μετάδοσης θερμότητας από και προς τις εσωτερικές επιφάνειες των κτιρίων, όπως επίσης και με τον αερισμό των χώρων κ.α.

▪ **Προσανατολισμός της επιφάνειας και της κατεύθυνσης ροής θερμότητας**

Στην περίπτωση οριζόντιας επιφάνειας που το στοιχείο με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία βρίσκεται πάνω από αυτό με τη μικρότερη, όπως π.χ. δάπεδο πάνω από υπόγειο μη θερμαινόμενο χώρο το χειμώνα, τότε η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή είναι μικρή. Το φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός ότι ο αέρας που έρχεται σε επαφή με την ψυχρή επιφάνεια αποκτά μεγαλύτερο βάρος και ακινητοποιείται στο δάπεδο.

Στην περίπτωση θερμαινόμενης οροφής, (ροή θερμότητας προς τα κάτω) ο θερμαινόμενος αέρας, λόγω μικρότερου βάρους και παραμένει στην οροφή.

Όταν η θερμή επιφάνεια βρίσκεται κάτω από την ψυχρή, π.χ. σε θερμαινόμενο δάπεδο, παρατηρείται αυξημένη μεταφορά θερμότητας. Όταν ο χώρος θερμαίνεται, ο ελαφρύς, λόγω θερμοκρασίας, αέρας έρχεται σε επαφή με την χαμηλότερης θερμοκρασίας οροφή (ροή θερμότητας προς τα πάνω) ψύχεται με τη σειρά του και κινείται ελεύθερα προς τα κάτω. Ο θερμός αέρας ανεβαίνοντας αντικαθιστά τον ψυχρό και δημιουργείται έντονη κίνηση του αέρα, άρα αυξημένη συναγωγή.

Στις επιφάνειες των τοίχων η κατεύθυνση της ροής της θερμότητας δεν επηρεάζει σημαντικά τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής, ενώ η μεταβολή του συντελεστή με την ταχύτητα του αέρα και η εκτίμησή του γίνεται με τη βοήθεια διαγραμμάτων. (Δ. Κατσαπρακάκης *et al.*, 2015)

3. Παράμετροι επιρροής της θερμικής συμπεριφοράς

3.1 Θερμική απόκριση επιφάνειας

Μεγάλο μέρος της ενέργειας καταναλώνεται για την ψύξη και θέρμανση των οφείλεται στη μετάδοση θερμότητας μέσω του κελύφους του κτιρίου, λόγω των ακραίων εξωτερικών συνθηκών που επικρατούν. Ο σωστός σχεδιασμός του κελύφους ενός κτιρίου και των στοιχείων του είναι ένα αποτελεσματικό μέσο για τη μείωση των απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης-ψύξης. Η θερμομόνωση είναι ένα από τα πιο πολύτιμα εργαλεία για την επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια. (Ozel, 2014)

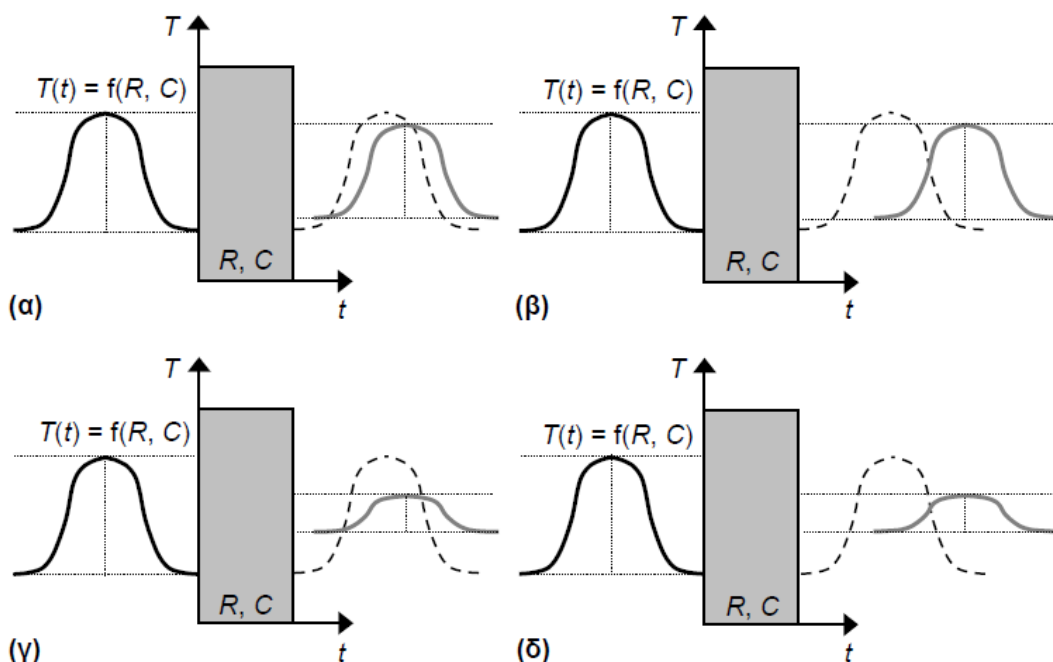
Στα παθητικά συστήματα, οι θερμικές μάζες στους τοίχους και τις στέγες κτιρίων λειτουργούν ως στοιχεία θερμικής αποθήκευσης που συμβάλλουν στη μείωση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια (και επομένως στη μείωση του φορτίου αιχμής) και επίσης βοηθούν στη μετατόπιση του χρόνου εμφάνισης του φορτίου αιχμής σε μεταγενέστερο χρόνο μέσα στην ημέρα. (Al-Sanea *et al.*, 2011)

Η αύξηση της θερμικής αντίστασης (R) του κελύφους μέσω της χρήσης θερμομόνωσης είναι σήμερα το πιο αποτελεσματικό μέσο για τη μείωση του φορτίου μετάδοσης θερμότητας (εκροών και θερμικών απωλειών το χειμώνα – εισροής θερμότητας το καλοκαίρι). Από την άλλη πλευρά, η αύξηση της ικανότητας θερμικής αποθήκευσης (θερμική μάζα-θερμοχωρητικότητα C) του κελύφους μέσω της αύξησης της θερμικής μάζας παρέχει μέσα για την αύξηση της χρονικής υστέρησης (αύξηση του χρόνου μεταξύ εμφάνισης θερμοκρασιών αιχμής στην εξωτερική και την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου) και τη μείωση του συντελεστή μείωσης (μείωση της διακύμανσης της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου), που βελτιώνει την ισοστάθμιση του φορτίου και παρέχει καλύτερη άνεση σε εσωτερικούς χώρους. (Κοντολέων, 2006, Al-Sanea *et al.*, 2013)

Στη διατομή του εξωτερικού κελύφους ενός κτιρίου, υπάρχουν πολλές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις σε κάθε στιγμή ημέρας. Αυτές οι διακυμάνσεις εξαρτώνται από την εσωτερική θερμοκρασία, της εξωτερική θερμοκρασία και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του τοίχου. Το φαινόμενο της περιοδικής αλλαγής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, οδηγεί στη δημιουργία νέων θερμοκρασιακών προφίλ κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Η θερμική απόκριση $T(t)$ μίας επιφάνειας εξαρτάται από τη θερμική αντίσταση R και τη θερμική μάζα C των υλικών που αποτελούν το κέλυφος και συντελούν στον περιορισμό των θερμοκρασιακών μεταβολών. (Κοντολέων, 2006, Asan, 2000)

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η θερμική απόκριση $T(t)=f(R,C)$ μίας αδιαφανούς επιφάνειας του κτιριακού κελύφους, κατά τη διαδικασία διάδοσης περιοδικού θερμικού κύματος, περιγράφεται από τις κάτωθι τέσσερις περιπτώσεις (Σχήμα 3-1) (Κοντολέων, 2006):

- (α) Μικρή θερμική αντίσταση R και μικρή θερμική μάζα C
- (β) Μικρή θερμική αντίσταση R και μεγάλη θερμική μάζα C
- (γ) Μεγάλη θερμική αντίσταση R και μικρή θερμική μάζα C
- (δ) Μεγάλη θερμική αντίσταση R και μεγάλη θερμική μάζα C



Σχήμα 3- 1: Θερμική απόκριση επιφάνειας εξωτερικού κελύφους κατά τη διαδικασία διάδοσης περιοδικού θερμικού κύματος (Κοντολέων, 2006)

3.2 Θερμική αντίσταση R

Το κτιριακό κέλυφος απαρτίζεται από υλικά, διαμέσω των οποίων πραγματοποιείται ροή θερμότητας από τις υψηλότερες θερμοκρασιακά περιοχές, στις χαμηλότερες. Η θερμική αντίσταση R των περιεχόμενων υλικών του κελύφους προκαλεί την καθυστέρηση της θερμικής ροής και συνιστά τη θερμομονωτική ικανότητα του υλικού. (Αξαρηλή *et al.*, 2001)

Το κέλυφος του κτιρίου θα πρέπει να είναι ικανό να διαμορφώνει τα επιτρεπτά επίπεδα θερμικής άνεσης στους ενοίκους, να προστατεύει το εσωτερικό από ακραίες καιρικές συνθήκες, να μειώνει τις μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας καθώς και να μειώνει τις απαιτήσεις κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη και θέρμανση. Αυτό συνήθως γίνεται αυξάνοντας τη θερμική αντίσταση R αυτού του περιβλήματος και, ως εκ τούτου, μειώνοντας τα φορτία μετάδοσης. (Ozel, 2012)

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του χειμώνα, το κέλυφος θα πρέπει να αποτρέπει τη θερμική ροή, από το εσωτερικό (θερμό χώρο) στο εξωτερικό (ψυχρό), που έχει ως αποτέλεσμα την ενεργειακή επιβάρυνση του κτιρίου. Επιπροσθέτως για να αποφευχθεί η συμπύκνωση υδρατμών, είναι απαραίτητο η θερμοκρασία των εσωτερικών επιφανειών του κελύφους, να διατηρείται πάνω από συγκεκριμένες απαγορευτικές τιμές.

Κατά τη διάρκεια του θέρους αντίστοιχα, το κέλυφος θα πρέπει να αποτρέπει τη θερμική ροή από το εσωτερικό (ψυχρό χώρο) προς το εξωτερικό (θερμό), που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των φορτίων ψύξης, προκειμένου να διατηρηθούν στο εσωτερικό του κτιρίου συνθήκες θερμικής άνεσης για τους χρήστες των κτιρίων. (Κοντολέων, 2006)

Θεωρούμε απλοποιητικά ότι: α) η ροή θερμότητας πραγματοποιείται μονοδιάστατα, κάθετα στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου, ανεξαρτήτως χρόνου, χωρίς να επηρεάζονται από εξωγενείς παράγοντες, β) τα δομικά υλικά είναι ομογενή και ισότροπα, με σταθερά θερμοφυσικά χαρακτηριστικά και χωρίς να επηρεάζονται από θερμοκρασιακές μεταβολές. Με τις ανωτέρω παραδοχές, η θερμική αντίσταση ομογενούς στρώσεως δομικού στοιχείου, στη ροή θερμότητας, δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3.1)$$

όπου:

R : η αντίσταση της στρώσης του υλικού στη ροή θερμότητας ($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$)

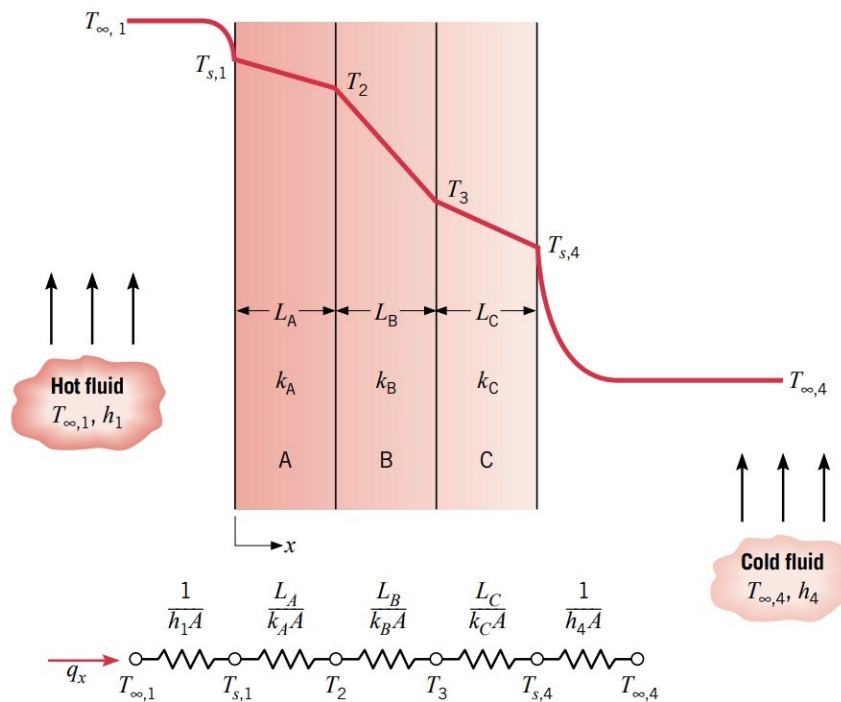
d : το πάχος της στρώσης (m)

λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της στρώσης ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017, 2017)

Στην πράξη συναντάμε συχνά επίπεδους τοίχους που αποτελούνται από πολλά στρώματα διαφορετικών υλικών. Η έννοια της θερμικής αντίστασης μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της αντίστασης θερμοδιαφυγής R_L σύνθετων τοίχων, από το

άθροισμα των επί μέρους αντιστάσεων των στρώσεων ως εξής (Cengel 2002, T.O.T.E.E. 20701-2/2017, 2017)

$$R_{\Lambda} = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} = \sum_j R_j \quad (3.2)$$



Σχήμα 3- 2: Ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα για σύνθετο τοίχο.(Incropera *et al.*, 2007)

Για τον υπολογισμό της συνολικής θερμικής αντίστασης δομικού στοιχείου πολλαπλών ομογενών στρώσεων (Σχήμα 3-2), που εκτίθεται σε συναγωγή με αέρα και από τις δύο πλευρές του, κατά το ηλεκτρικό ανάλογο, θεωρούμε την αντίσταση κάθε στρώσεως υλικού καθώς και των στρώσεων αέρα εκατέρωθεν συνδεδεμένες σε σειρά, και υπολογίζεται (Cengel, 2002, T.O.T.E.E. 20701-2/2017, 2017):

$$R_{\text{ολ}} = R_i + R_1 + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_a \quad (3.3)$$

όπου :

$R_{\text{ολ}}$: συνολική θερμική αντίσταση δομικού στοιχείου ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)

n: πλήθος στρώσεων δομικού στοιχείου

R_i : αντίσταση θερμικής μετάβασης επιφανειακού στρώματος αέρα, εσωτερικής παρειάς ($m^2 \cdot K/W$)

R_a : αντίσταση θερμικής μετάβασης επιφανειακού στρώματος αέρα, εξωτερικής παρειάς ($m^2 \cdot K/W$)

Ο σωστός σχεδιασμός και η επιλογή του κτιριακού κελύφους και των στοιχείων του είναι ένα αποτελεσματικό μέσο για τη μείωση των φορτίων θέρμανσης-ψύξης. Εκτός από τη σημασία της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας, η θερμική αντίσταση των δομικών στοιχείων (R) είναι ζωτικής σημασίας όσον αφορά τη μείωση του φορτίου μετάδοσης. Η θερμομόνωση είναι ένα από τα πιο πολύτιμα εργαλεία για την επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια και η προσθήκη της είναι σημαντική, ιδιαίτερα σε περιοχές με ακραία κλίματα. Τα μονωτικά υλικά δεν είναι μέσα αποθήκευσης θερμότητας. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι δίνουν παρόμοια αποτελέσματα στη χρονική υστέρηση (αύξηση του χρόνου μεταξύ εμφάνισης θερμοκρασιών αιχμής στις εξωτερικές και εσωτερικές επιφάνειες του τοίχου) και στη μείωση της διακύμανσης της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου, με αυτά που δίνονται από τα υλικά αποθήκευσης θερμότητας (θερμική μάζα). Επιπλέον, τα θερμικά χαρακτηριστικά υπό δυναμικές συνθήκες επηρεάζονται από τις σχετικές θέσεις (κατανομή) της θερμικής μάζας και των στρώσεων μόνωσης. Το μονωτικό στρώμα χαρακτηρίζεται από χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, και μεγάλη θερμική αντίσταση. Χαρακτηριστικό των μονωτικών υλικών είναι η ιδιότητά τους να διαθέτουν ακινητοποιημένο αέρα σε πόρους, στη μάζα τους. Η θερμομονωτική τους ικανότητα επηρεάζεται αν οι θύλακες του υλικού γεμίσουν νερό. Χαρακτηριστικό τους επίσης είναι οι χαμηλές τιμές ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας $\rho \cdot C_p$. Εξαιτίας των ιδιοτήτων τους, τα μονωτικά υλικά αποκρίνονται σαν φράγματα θερμότητας που προκαλούν μείωση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας προς την κατεύθυνση της ροής θερμότητας. (Al-Sanea *et al.*, 2012, Ozel, 2014, Al-Sanea *et al.*, 2011, Kontoleon *et al.*, 2013, Αξαρλή *et al.*, 2001)

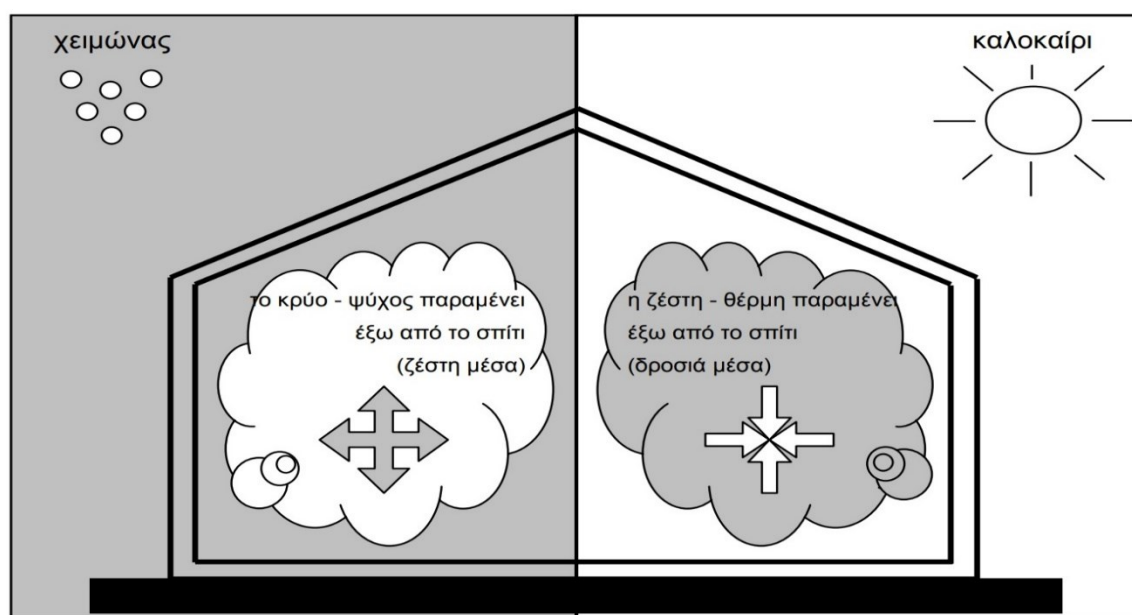
3.3 Θερμική μάζα – Θερμοχωρητικότητα C

Σημαντική ιδιότητα του κτιριακού κελύφους είναι η ικανότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στη μάζα του (Σχήμα 3-3). Η ικανότητα αυτή εκφράζεται μέσω της θερμικής

μάζας όπου ελέγχει την ποσότητα και το ρυθμό αποθήκευσης θερμότητας στα δομικά στοιχεία, μειώνει τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και αυξάνει τη χρονική καθυστέρηση απόδοσης της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας στο περιβάλλον. Η χρήση βαριών θερμικών μαζών σε τοίχους κτιρίων είναι ευρέως γνωστή σε μέτρια κλίματα (π.χ. μεσογειακό κλίμα) ως μέσο ρύθμισης της θερμοκρασίας των εσωτερικών χώρων μέσω του φυσικού αερισμού τη νύχτα. (Al-Sanea *et al.*, 2012)

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, το κέλυφος θα πρέπει να συγκρατεί τη θερμότητα εντός της μάζας του, ώστε αποτρέπει τη θερμική ροή, από τον εσωτερικό (θερμό χώρο) στο εξωτερικό (ψυχρό).

Κατά τη διάρκεια του θέρους αντίστοιχα, το κέλυφος θα πρέπει να συγκρατεί τη θερμότητα εντός της μάζας του, να αποτρέπει τη θερμική ροή από το εσωτερικό (ψυχρό χώρο) προς το εξωτερικό (θερμό), που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των φορτίων ψύξης, προκειμένου να διατηρηθούν στο εσωτερικό του κτιρίου συνθήκες θερμικής άνεσης για τους χρήστες των κτιρίων. (Κοντολέων, 2006)



Σχήμα 3- 3: Ο ρόλος της θερμικής προστασίας του κτιριακού περιβλήματος κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο. (Κοντολέων, 2006)

Η θερμική μάζα στο κτιριακό κέλυφος λειτουργεί ως στοιχείο θερμικής αποθήκευσης που συμβάλλει στη μείωση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια (και επομένως στη μείωση του φορτίου αιχμής) και επίσης βοηθά στη μετατόπιση του

χρόνου εμφάνισης του φορτίου αιχμής σε μεταγενέστερο χρόνο μέσα στην ημέρα. Η μείωση και η μετατόπιση του φορτίου αιχμής είναι πολύ σημαντικές: εξομαλύνει τη μεγάλη ζήτηση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής, αυξάνει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος κλιματισμού (καθώς το φορτίο αιχμής θα συμβεί αργότερα το βράδυ όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι χαμηλότερη από εκείνη το απόγευμα), επίσης, με τη μείωση του φορτίου αιχμής, θα απαιτηθεί σύστημα κλιματισμού μικρότερων δυνατοτήτων και γενικότερα βελτιώνει την ισοστάθμιση του φορτίου και παρέχει καλύτερη άνεση σε εσωτερικούς χώρους. (Al-Sanea *et al.*, 2012)

Έτσι, τους χειμερινούς μήνες, η αποθηκευμένη θερμότητα αποδίδεται στο χώρο τις ώρες που σταματά η θέρμανση, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες η θερμότητα του περιβάλλοντος συγκρατείται στη μάζα του κελύφους και αποδίδεται στο χώρο όταν οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες. (Κοντολέων, 2006)

Πρωτεύουσα σημασία για τη διασφάλιση της θερμικής άνεσης, είναι η επιλογή των υλικών πλήρωσης του κτιριακού κελύφους, τα οποία θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από μεγάλες τιμές ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας $\rho^* C_p$, που σημαίνει μεγάλες τιμές πυκνότητας και ειδικής θερμότητας. Οι κατηγορίες των ανωτέρω υλικών χαρακτηρίζονται από το πολύ μικρό ποσοστό ακινητοποιημένου αέρα στους θύλακες της μάζας τους και το μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, σε αντίθεση με τα υλικά θερμομόνωσης. (Κοντολέων, 2006)

Το ανωτέρω γινόμενο $\rho^* C_p$, ονομάζεται θερμοχωρητικότητα ενός υλικού. Τόσο η ειδική θερμότητα C_p όσο και η θερμοχωρητικότητα $\rho^* C_p$ αντιπροσωπεύουν την ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ενός υλικού. Το C_p , το εκφράζει ανά μονάδα μάζας ενώ το $\rho^* C_p$ το εκφράζει ανά μονάδα όγκου, όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τις μονάδες τους $J/kg \cdot ^\circ C$ και $J/m^3 \cdot ^\circ C$, αντίστοιχα. (Cengel 2002)

Ενώ η θερμική αγωγιμότητα λ αντιπροσωπεύει το πόσο καλά ένα υλικό μεταφέρει τη θερμότητα, η θερμοχωρητικότητα $\rho^* C_p$ αντιπροσωπεύει πόση ενέργεια αποθηκεύει ένα υλικό ανά μονάδα όγκου. (Cengel 2002)

Ο υπολογισμός θερμοχωρητικότητας δίνεται από τον τύπο:

$$C = \rho^* C_p^* V \quad (3.4)$$

Όπου:

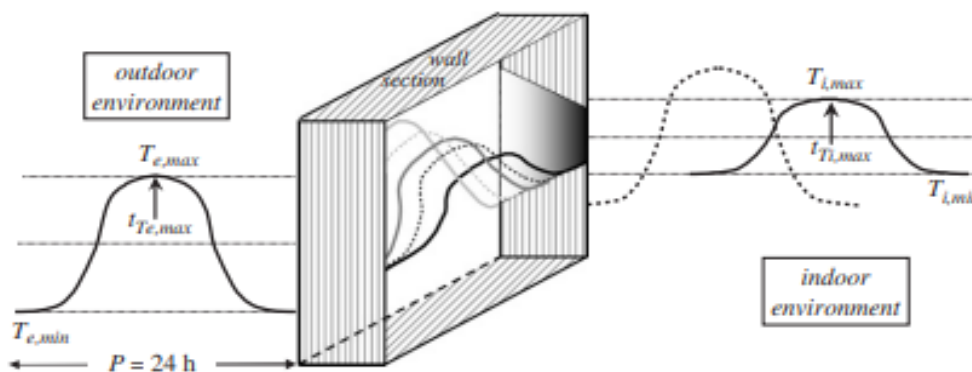
C : η θερμοχωρητικότητα του υλικού (J/K)

ρ : η πυκνότητα του υλικού (kg/m³)

V : ο όγκος του στοιχείου (m³)

3.4 Θερμική αδράνεια

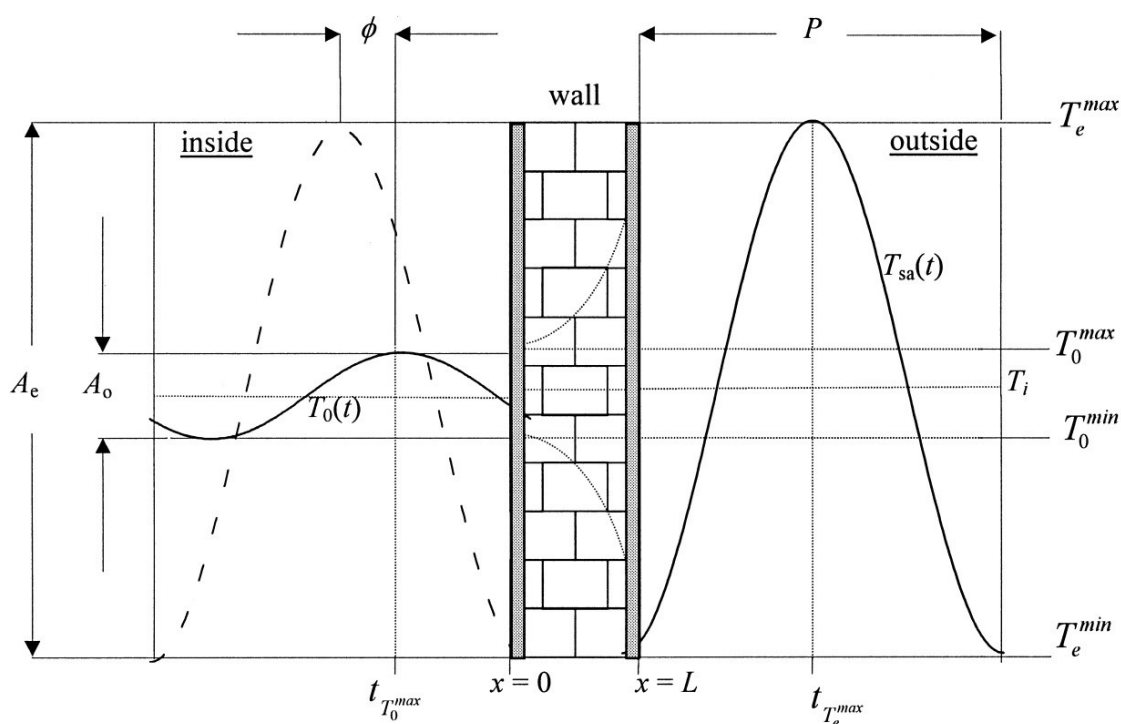
Στη διατομή του εξωτερικού κελύφους ενός κτιρίου, υπάρχουν πολλές διακυμάνσεις θερμοκρασίας σε κάθε στιγμή ημέρας. Αυτές οι διακυμάνσεις εξαρτώνται από την εσωτερική θερμοκρασία, την εξωτερική θερμοκρασία και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του τοίχου. Η εξωτερική θερμοκρασία αλλάζει περιοδικά κατά τη διάρκεια της ημέρας (24h) αλλά και σε εύρος εποχών, άρα θα υπάρχουν νέα θερμοκρασιακά προφίλ κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ένα κύμα θερμότητας ρέει μέσω του τοίχου από έξω προς τα μέσα, με κάποια χρονική διάρκεια (Σχήμα 3-4). Ο ρυθμός πρόσληψης ή απομάκρυνσης θερμότητας ενός δομικού στοιχείου, ονομάζεται θερμική αδράνεια και συναρτάται από το πάχος d , τη θερμική αντίσταση R και τη θερμική μάζα C των υλικών του κελύφους. (Κοντολέων, 2006, Asan, 2000)



Σχήμα 3-4: Διάδοση ενός περιοδικού κύματος θερμότητας από την εξωτερική στην εσωτερική επιφάνεια ενός τοίχου, (Kontoleon et al., 2008)

Μπορούμε να συμπεράνουμε βάση των ανωτέρω ότι μικρή τιμή θερμικής αδράνειας και κατ' επέκταση μικρές τιμές R , λ , C , αφορούν σε ελαφρά υλικά θερμομόνωσης, ενώ σε αντίθετη περίπτωση μεγάλες τιμές των αντίστοιχων ιδιοτήτων, αφορούν σε υλικά πλήρωσης. (Κοντολέων, 2006)

Το πλάτος του κύματος θερμότητας στο εξωτερικό κέλυφος βασίζεται στην ηλιακή ακτινοβολία και τη συναγωγή μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας και του αέρα του περιβάλλοντος. Κατά τη διάδοση αυτού του κύματος θερμότητας μέσω του τοίχου, το πλάτος του θα μειωθεί ανάλογα με τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών του κτιριακού κελύφους. Όταν αυτό το κύμα φτάσει στην εσωτερική επιφάνεια, θα έχει ένα πλάτος σημαντικά μικρότερο από την τιμή που είχε στην εξωτερική επιφάνεια. Το πλάτος αυτών των κυμάτων δείχνει το μέγεθος της θερμοκρασίας και το μήκος των κυμάτων δείχνει το χρόνο διάδοσης (Σχήμα 3-5). (Κοντολέων, 2006, Asan, 2000)



Σχήμα 3- 5: Σχηματική αναπαράσταση της χρονικής υστέρησης ϕ και του συντελεστή μείωσης f , (Asan, 2000).

Χρονική υστέρηση ϕ (ή υστέρηση φάσης ή χρονική μετατόπιση ή χρονική καθυστέρηση) ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για ένα κύμα θερμότητας, με περίοδο P , να διαδοθεί μέσω ενός τοίχου από την εξωτερική στην εσωτερική επιφάνεια. Από την άλλη πλευρά, συντελεστής μείωσης f (ή φθίνουσα αναλογία ή αδιάστατο πλάτος ή εξασθένηση θερμοκρασίας) ορίζεται ως ο μειούμενος λόγος του πλάτους της θερμοκρασίας του κατά τη μεταβατική διαδικασία ενός κύματος που διεισδύει μέσα από ένα στερεό στοιχείο. (Kontoleon *et al.*, 2008, Asan, 2000)

Η χρονική υστέρηση και ο συντελεστής μείωσης είναι πολύ κρίσιμες παράμετροι θερμικής αδράνειας για την ερμηνεία και την αξιολόγηση της δυνατότητας αποθήκευσης θερμότητας του κτιριακού κελύφους. Ο προσδιορισμός τους είναι πολύτιμος κυρίως σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν μεγάλες ημερήσιες διακυμάνσεις θερμοκρασίας και όπου οι μέσες θερμοκρασίες περιβάλλοντος βρίσκονται εντός της ζώνης άνεσης. (Asan, 2000, Kontoleon et al., 2008)

Η επιθυμητή χρονική υστέρηση και οι τιμές του συντελεστή μείωσης μπορούν να οδηγήσουν στη μελέτη ενός πιο αποδοτικού κτιριακού κελύφους στο οποίο η ενέργεια που αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια της ημέρας απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες πέφτουν σημαντικά. Επιπλέον, επιτυγχάνεται ένα βιώσιμο περιβάλλον, με μικρές διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας και μειωμένες μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες. Η χρονική υστέρηση και ο συντελεστής μείωσης ορίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\varphi = t_{Ti,min} - t_{Te,min}, \quad (3.5)$$

$$\varphi = t_{Ti,max} - t_{Te,max} \quad (3.6)$$

$$f = \frac{A_i}{A_e} = \frac{T_{i,max} - T_{i,min}}{T_{e,max} - T_{e,min}} \quad (3.7)$$

όπου A_i και A_e είναι τα πλάτη του κύματος στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια αντίστοιχα $t_{Ti,min}$, $t_{Te,min}$, $t_{Ti,max}$, $t_{Te,max}$ αντιπροσωπεύουν τους χρόνους που οι θερμοκρασίες της εξωτερικής και της εσωτερικής επιφάνειας είναι στο ελάχιστο και στο μέγιστο, αντίστοιχα. Επιπλέον $T_{i,max}$, $T_{i,min}$, $T_{e,max}$, $T_{e,min}$ είναι οι ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις δύο επιφάνειες τοίχου. (Asan, 2000, Kontoleon et al., 2008)

3.5 Προηγούμενες έρευνες – Βιβλιογραφική επισκόπηση

Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν πολλές μελέτες για τον προσδιορισμό του βέλτιστου πάχους και θέσης της μόνωσης, τη θερμική συμπεριφορά των δομικών υλικών, την αξιολόγηση και σύγκριση της θερμικής απόδοσης διαφορετικών στοιχείων τοίχου, τη διερεύνηση των

επιδράσεων της θερμικής μάζας στα φορτία μετάδοσης, τον ρυθμό αποθήκευσης ενέργειας, τη δυναμική θερμική αντίσταση, τη χρονική υστέρηση και τον συντελεστή μείωσης στους τοίχους του κτιρίου για την ίδια θερμική αντίσταση κ.α. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε κάποιες από αυτές.

Ο Asan στη μελέτη του το 1998, για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων του πάχους και της θέσης μόνωσης ενός τοίχου στη χρονική υστέρηση και το συντελεστή μείωσης, έκανε μια λεπτομερή υπολογιστική μελέτη. Αποδείχθηκε ότι το πάχος και η θέση της μόνωσης έχουν μεγάλη επίδραση στη χρονική υστέρηση και το συντελεστή μείωσης. Οι υπολογισμοί επαναλήφθηκαν για τρία διαφορετικά μονωτικά υλικά: αφρό πολυουρεθάνης, φελλό και καουτσούκ και για δύο θερμικές μάζες, τούβλο και ξύλο. (Asan, 1998)

Οι Asan και Sancaktar το 1998 ασχολήθηκαν λεπτομερώς με τον υπολογιστικό προσδιορισμό των επιδράσεων του πάχους και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων ενός τοίχου στη χρονική υστέρηση και στον συντελεστή μείωσης. Οι υπολογισμοί επαναλήφθηκαν για διαφορετικά υλικά τοίχου και τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους. Για το σκοπό αυτό ο τοίχος θεωρήθηκε μόνο κατά την κατεύθυνση x και εξαρτώμενη από το χρόνο και επιλύθηκε μια μονοδιάστατη εξίσωση μεταβατικής αγωγιμότητας θερμότητας. Διερευνήθηκαν μεμονωμένες και συνδυασμένες επιδράσεις του πάχους και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων στη χρονική υστέρηση και στον παράγοντα μείωσης. Διαπιστώθηκε ότι οι θερμοφυσικές ιδιότητες έχουν μια πολύ θετική επίδραση στη χρονική υστέρηση και στον παράγοντα μείωσης. (Asan *et.al*, 1998)

Το 2000, ο Asan μελέτησε αριθμητικά τη βέλτιστη θέση μόνωσης από την άποψη της μέγιστης χρονικής υστέρησης και του ελάχιστου συντελεστή μείωσης. Επιλέχθηκαν δύο ειδών υλικά για τη θερμική μάζα (τούβλο και μπλοκ γρανίτη) καθώς και δύο είδη μόνωσης (πολυουρεθάνη και φελλός). Διαπιστώθηκε ότι βέλτιστες θέσεις μόνωσης δεν συμπίπτουν από την άποψη της μέγιστης χρονικής υστέρησης και του ελάχιστου συντελεστή μείωσης. Επίσης, η βέλτιστη θέση μόνωσης από την άποψη της μέγιστης χρονικής καθυστέρησης δεν είναι πρακτική. (Asan, 2000)

Η εργασία του Al-Sanea πραγματεύεται την αξιολόγηση και σύγκριση της θερμικής απόδοσης διαφορετικών στοιχείων τοίχου όπως χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατασκευή κτιρίων στο Βασίλειο της Σαουδικής Αραβίας. Η έρευνα διεξάγεται υπό σταθερές περιοδικές συνθήκες και για τα κλιματολογικά δεδομένα της πόλης του Ριάντ. Μελετάται επίσης η επίδραση του προσανατολισμού σχετικά με τη θερμική απόδοση του τοίχου.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου στα στοιχεία τοίχου έδειξαν ότι η χρήση μόνωσης είχε σημαντική επίδραση στα θερμικά χαρακτηριστικά. Το πάχος της μόνωσης ήταν ο καθοριστικός παράγοντας που επηρέασε το θερμικό φορτίο στα τέσσερα στοιχεία τοίχου που μελετήθηκαν. Ωστόσο, η παρούσα μελέτη είχε παραγάγει τόσο ποιοτικές όσο και ποσοτικές εκτιμήσεις και υπολόγισε τις ημερήσιες διακυμάνσεις των θερμικών φορτίων ανά τετραγωνικό μέτρο τοίχου. (Al-Sanea, 1999)

Οι Al-Sanea-Zedan μελετούν τη θερμική απόδοση στοιχείων τοίχου κτιρίου υπό αρχικές μεταβατικές επιδράσεις, που οδηγούν σε σταθερή περιοδική κατάσταση. Μελετάται η επίδραση της θέσης μόνωσης υπό αρχικές μεταβατικές συνθήκες, μέσω μιας συστηματικής έρευνας στην οποία χρησιμοποιείται ένας τυπικός σύνθετος τοίχος με τη μόνωση μία φορά στο εξωτερικό και μία άλλη φορά στο εσωτερικό. Τα κλιματικά δεδομένα του Ριάντ χρησιμοποιούνται για αντιπροσωπευτικές ημέρες για τον Ιούλιο και τον Ιανουάριο και για διαφορετικούς προσανατολισμούς τοίχων.

Υπό αυτές τις συνθήκες, τα αποτελέσματα για έναν τοίχο με δυτική όψη τον Ιούλιο έδειξαν ότι η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας έπεσε πολύ γρήγορα και η μεταφορά θερμότητας έφτασε σε σταθερές περιοδικές συνθήκες μετά από σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα (5 ώρες) στην περίπτωση εσωτερικής μόνωσης. Αντίθετα, στην περίπτωση της εξωτερικής μόνωσης, η θερμοκρασία έπεφτε πολύ πιο αργά και ο τοίχος χρειαζόταν περισσότερους από δύο πλήρεις κύκλους (48 ώρες) για να φτάσει σε σταθερές περιοδικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα για τους άλλους προσανατολισμούς τοίχων είχαν την ίδια τάση. Έτσι, οι χρήστες θα ανακουφίζονταν από τις ενοχλητικές επιπτώσεις της ακτινοβολίας πολύ νωρίτερα με την εσωτερική μόνωση που οδηγεί σε καλύτερες και ταχύτερες συνθήκες άνεσης. Επιπλέον, ο στιγμιαίος ρυθμός μετάδοσης θερμότητας κατά το αρχικό μεταβατικό στάδιο ήταν μικρότερος με την εσωτερική μόνωση (περίπου το 20% αυτού για την εξωτερική μόνωση).

Τα R-value και το κέρδος/απώλεια θερμότητας υπολογίστηκαν κατά τις πρώτες 24 ώρες λειτουργίας του κλιματισμού και συγκρίθηκαν για διαφορετικούς προσανατολισμούς τοίχων το καλοκαίρι και το χειμώνα. Η μέση μετάδοση θερμότητας τις πρώτες 24 ώρες με εσωτερική μόνωση ήταν περίπου το ένα τρίτο αυτής με εξωτερική μόνωση. Έτσι, συνιστάται η χρήση εσωτερικής μόνωσης για χώρους όπου η χρήση κλιματιστικού αναμένεται να είναι διακοπτόμενη. Αυτό συμβαίνει συνήθως σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν κλιματιστικά δωματίου. (Al-Sanea *et.al* 2001)

Στη μελέτη των Al-Sanea, Zedan (2011), ο κύριος στόχος ήταν η διενέργεια θερμικής ανάλυσης τοίχων που έχουν την ίδια θερμική μάζα και αποτελούνται από ένα, δύο ή τρία στρώματα μόνωσης. Οι θέσεις των στρώσεων μόνωσης ποικίλλουν και τα πάχη τους βελτιστοποιούνται με στόχο την επίτευξη της καλύτερης συνολικής δυναμικής απόδοσης. Η έρευνα διεξάγεται υπό σταθερές περιοδικές συνθήκες χρησιμοποιώντας κλιματικά δεδομένα του Ριάντ. Το συνολικό και το μέγιστο φορτίο μετάδοσης, η χρονική υστέρηση και ο συντελεστής μείωσης αξιολογούνται και συγκρίνονται.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το βέλτιστο πάχος μίας μόνο στρώσης μόνωσης ήταν ανεξάρτητο από τη θέση του στον τοίχο και ότι, όταν χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες από μία μονωτικές στρώσεις, το συνολικό βέλτιστο πάχος τους ήταν το ίδιο με το βέλτιστο πάχος μίας μόνο στρώσης. Επομένως οι θερμικές αντιστάσεις όλων των τοίχων ήταν ίσες αφού διερευνήθηκαν υπό τις βέλτιστες συνθήκες. Η καλύτερη απόδοση, που κρίνεται από τη σύγκριση των φορτίων μετάδοσης, της χρονικής υστέρησης και του συντελεστή μείωσης, επιτεύχθηκε από τον τοίχο με τις τρεις στρώσεις τοποθετημένες στο εξωτερικό, στη μέση και στο εσωτερικό. (Al-Sanea *et.al.*, 2011)

Στη μελέτη των Al-Sanea, Al-Sanea Zedan, S.N. Al-Hussain *et.al.* (2012) (2012) κύριος στόχος ήταν η διερεύνηση των επιδράσεων της θερμικής μάζας στα φορτία μετάδοσης, τον ρυθμό αποθήκευσης ενέργειας, τη δυναμική θερμική αντίσταση, τη χρονική υστέρηση και τον συντελεστή μείωσης στους τοίχους του κτιρίου για την ίδια θερμική αντίσταση. Αυτά τα θερμικά χαρακτηριστικά μελετώνται για περιπτώσεις εξωτερικής και εσωτερικής μόνωσης υπό σταθερές περιοδικές συνθήκες (δηλ. συνεχής λειτουργία συστήματος κλιματισμού) χρησιμοποιώντας κλιματικά δεδομένα του Ριάντ. Για πρώτη φορά εμφανίζονται και αναπτύσσονται οι έννοιες του «δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας θερμικής μάζας» και «κρίσιμης θερμικής μάζας» προκειμένου να προσδιοριστεί η θερμική μάζα που απαιτείται για ένα επιλεγμένο επιθυμητό ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας.

Η διατήρηση της σταθερής ονομαστικής αντίστασης του τοίχου, ενώ μεταβάλλεται το πάχος θερμικής μάζας, έδειξε ότι δεν επηρεάστηκαν τα ημερήσια φορτία μετάδοσης από το πάχος της θερμικής μάζας το καλοκαίρι, όταν το σύστημα κλιματισμού λειτουργεί συνεχώς σε λειτουργία μόνο ψύξης ή θέρμανσης. Για τους μέσους μήνες όπου η ψύξη και η θέρμανση απαιτούνται σε διαφορετικούς χρόνους, τα ημερήσια φορτία μετάδοσης ψύξης και θέρμανσης μειώνονταν με την αύξηση της θερμικής μάζας και είτε μειώθηκαν στο μηδέν είτε μειώθηκαν ασυμπτωτικά σε σταθερές τιμές, ορίζοντας έτσι ένα δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας λόγω μόνο της θερμικής μάζας. Αυτή η συμπεριφορά αποδόθηκε

σε μεγάλο βαθμό στις μεταβολές της εξωτερικής θερμοκρασίας σε σχέση με την εσωτερική θερμοκρασία και τη διαφορά φάσης μεταξύ τους. Επιτεύχθηκε σημαντική εξοικονόμηση σε ετήσια φορτία μετάδοσης ψύξης και θέρμανσης ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης της θερμικής μάζας μόνο για δεδομένη ονομαστική αντίσταση του τοίχου. (Al-Sanea *et.al.*, 2012)

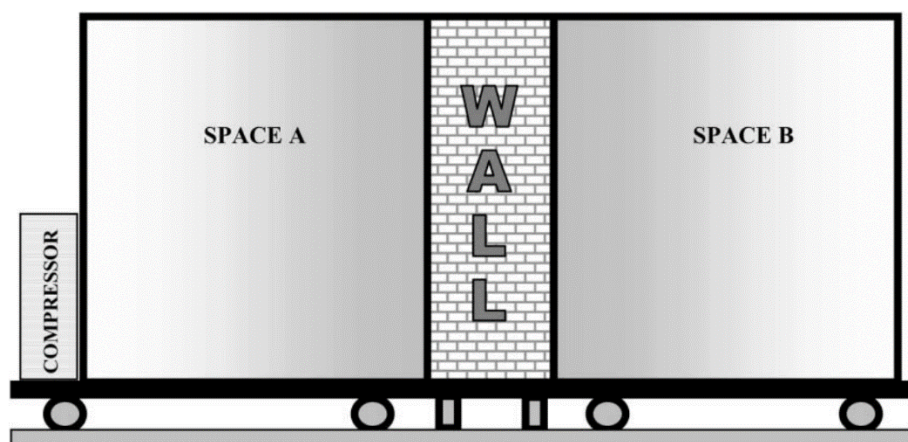
Συνέχεια της προηγούμενης αποτελεί η μελέτη των Al-Sanea, Zedan, Al-Hussain (2013). Διερεύνησαν τις επιπτώσεις της χρήσης διαφορετικών τύπων υλικού τοιχοποιίας και διαφορετικής απορροφητικότητας επιφανειών στην κρίσιμη θερμική μάζα και το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας.

Κατέληξαν ότι η κατασκευή βαρειών τοίχων με επαρκή ποσότητα θερμικής μάζας, με όσο το δυνατόν χαμηλότερη επιφανειακή απορρόφηση, συνιστάται να χρησιμοποιείται σε χώρους όπου υπάρχει σημαντική ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας γύρω από τις συνθήκες σχεδιασμού εσωτερικού χώρου. Η ποσότητα της θερμικής μάζας που χρησιμοποιείται θα πρέπει να αντιστοιχεί σε υψηλό δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας, περίπου 95%. Αυτό θα επιτύχει σημαντική εξοικονόμηση σε ετήσια φορτία μετάδοσης ψύξης και θέρμανσης μέσω της βελτιστοποίησης της θερμικής μάζας μόνο για μία δεδομένη R_{value} τοίχου. Περαιτέρω, η θερμική μάζα θα πρέπει να τοποθετείται εσωτερικά, σε σχέση με το μονωτικό στρώμα, υπό σταθερές περιοδικές συνθήκες (συνεχής λειτουργία του συστήματος κλιματισμού). (Al-Sanea *et.al.*, 2013)

Το 2002, μελετήθηκε από τον Ulgen τη συμπεριφορά των υλικών αδιαφανών τοίχων που αποτελούν οικοδομικές επιφάνειες κτιρίων υπό την ηλιακή ενέργεια, για να βρει τη χρονική υστέρηση και το συντελεστή μείωσης για διαφορετικές συνθέσεις τοίχων. Ο κύριος στόχος αυτής της μελέτης είναι να εξευρεθούν οι κατάλληλες συνθέσεις τοίχου προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε παθητικά ηλιακά κτίρια. Για την πειραματική μελέτη δημιουργήθηκε μία μονάδα προσομοίωσης (Σχήμα 3-6) αποτελούμενη από δύο χώρους, όπου ο Α που αντιπροσωπεύει τον εξωτερικό και στον οποίο επιβλήθηκε ημιτονοειδής θερμοκρασιακή μεταβολή.

Συμπερασματικά σημειώνεται ότι το κατάλληλο κτιριακό κέλυφος μπορεί να επιτευχθεί με ογκώδη στοιχεία τα οποία διαθέτουν μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας και σύνθετους τύπους τοίχων που σχηματίζονται από ελαφρά και μη αγωγίμα υλικά, δίνοντας την απαραίτητη προσοχή στη λειτουργία του εσωτερικού χώρου και στη θέση των υλικών στους σχηματισμούς τοίχων. Η περίοδος χρήσης είναι επίσης αποτελεσματική όσον αφορά την επιλογή των υλικών των αδιαφανών τοίχων που σχηματίζουν κτιριακό κέλυφος.

Σε χώρους που χρησιμοποιούνται για βραχυχρόνια και περιορισμένα χρονικά διαστήματα, προτιμάται ένα κέλυφος κτιρίου με χαμηλής θερμικής χωρητικότητας, ενώ ένα υψηλής θερμικής χωρητικότητας κέλυφος ενδείκνυται σε κτίρια που χρησιμοποιούνται για μεγάλες χρονικές περιόδους. Αυτό είναι απαραίτητο για τη διατήρηση των εσωτερικών θερμοκρασιακών αλλαγών σε χαμηλό επίπεδο. (Ulgen, 2002)



Σχήμα 3- 6: Σχηματική παρουσίαση μονάδας της προσομοίωσης ενός τοίχου, (Ulgen, 2002)

Ο Τσιλιγγίρης το 2003 έκανε μία κάπως διαφορετική ανάλυση, ως προς τον σκοπό και την προσέγγιση. Αναπτύσσει ένα απλό και ευέλικτο μοντέλο προσομοίωσης, μεταβατικής μεταφοράς θερμότητας, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας, μεταβαλλόμενης αγωγιμότητας στον τοίχο υπό τη συνδυασμένη επίδραση χρονικά μεταβαλλόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, κάτω από καθορισμένες συνθήκες δωματίου για ένα ευρύ φάσμα πρακτικών συνδυασμών τοίχων. Η συγκριτική παρουσίαση των παραγόμενων αποτελεσμάτων δείχνει ότι και οι δύο ομάδες συνδυασμών τοίχων από σκυρόδεμα και τούβλα με προοδευτικά αυξανόμενο πάχος παρουσιάζουν μια ποιοτική παρόμοια συμπεριφορά, όπου, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού εμφανίζεται πιο αποτελεσματική απόσβεση, ενώ κατά τη διάρκεια του χειμώνα σταδιακή κατάργηση της μέγιστης χρονικά μεταβαλλόμενης ροής θερμότητας αγωγιμότητας. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για μια συγκεκριμένη περίοδο λειτουργίας, οι τοίχοι από τούβλα, αν και φαίνεται να είναι ανώτεροι στην απόσβεση, σχεδόν καταργούν σταδιακά το φορτίο αιχμής, συγκριτικά με τους τοίχους από σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Όσον αφορά τις καλοκαιρινές συνθήκες, οι τοίχοι από τούβλα φαίνεται να

είναι σχεδόν εξίσου ικανοί να αποσβένουν και να καταργούν σταδιακά ελαφρώς καλύτερα από τους τοίχους από σκυρόδεμα. (Tsilingiris, 2003)

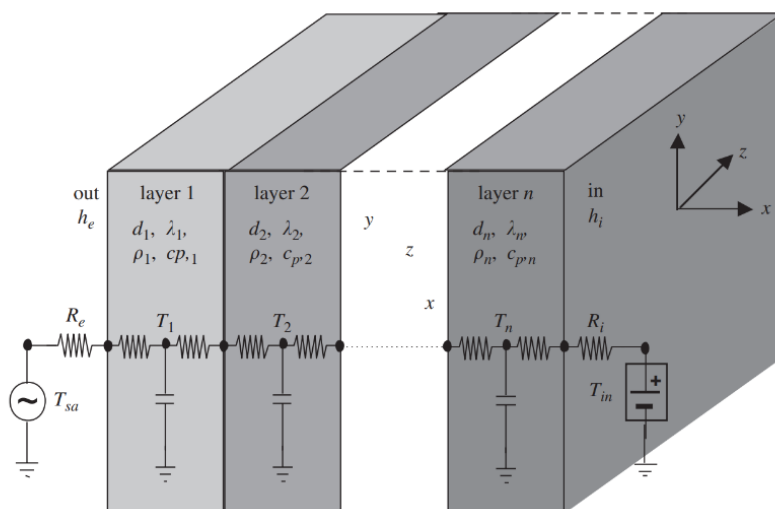
Μελέτη του ίδιου (Tsilingiris, 2006) διερευνά θεωρητικά τις επιδράσεις της θερμοχωρητικότητας και της χωρικής κατανομής της στη μεταβατική και σχεδόν σταθερή κατάσταση θερμικής συμπεριφοράς των δομικών τοίχων υπό την επίδραση τυπικών μετεωρολογικών κινητήριων δυνάμεων, που αντιστοιχούν στις συνθήκες του ήπιου μεσογειακού κλίματος.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, προέκυψε ότι παρόλο που η χωρική κατανομή της θερμικής ικανότητας σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο του τοίχου επηρεάζει έντονα τη ροή θερμότητας του μεταβατικού τοιχώματος, η ασυμπτωτική προσέγγιση της σχεδόν σταθερής περιοδικής συμπεριφοράς, δεν έχει καμία απολύτως επίδραση στη μέση χρονική ροή θερμότητας σχεδόν σταθερής κατάστασης του τοιχώματος.

Οι Κοντολέων και Μπίκας στην εργασία τους το 2007, προσδιορίζουν την επίδραση του συντελεστή απορρόφησης εξωτερικού χώρου (ηλιακή απορρόφηση) στη χρονική υστέρηση, το συντελεστή μείωσης και τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας και των δύο επιφανειών τοίχων, για διάφορους σχηματισμούς τοίχων, κατά την περίοδο ψύξης.

Το ανακλαστικό χρώμα (λευκό ή ανοιχτόχρωμο) της επίστρωσης ενός τοίχου αποδεικνύεται το πιο κερδοφόρο στοιχείο ελέγχου προς όφελος του εσωτερικού περιβάλλοντος κατά τη θερινή περίοδο. Επιπλέον, η τοποθέτηση δύο στρωμάτων της μόνωσης φαίνεται να βελτιώνει ουσιαστικά και τις δύο αυτές παραμέτρους δυναμικής θερμικής αδράνειας. Επιπλέον, αποφεύγονται οι μεγάλες διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας. Οι μέγιστες τιμές χρονικής υστέρησης λαμβάνονται με τη μία μονωτική στρώση στην εξωτερική επιφάνεια και την άλλη στο μεσαίο επίπεδο της τοιχοποιίας. Οι ελάχιστες τιμές του συντελεστή μείωσης και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας (μέσες θερμοκρασίες και ταλαντώσεις) λαμβάνονται με την τοποθέτηση των δύο στρώσεων μόνωσης στην εξωτερική και την εσωτερική επιφάνεια. (Kontoleon *et. al*, 2007)

Οι Κοντολέων και Ευμορφοπούλου το 2008, εξετάζουν εκτενώς την επίδραση των ακριβών περιβαλλοντικών συνθηκών, ως συνάρτηση του προσανατολισμού του τοίχου και της ηλιακής απορρόφησης της επιφάνειας, στη χρονική υστέρηση και στον παράγοντα μείωσης. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μεταβατική θερμική ανάλυση, έχει αναπτυχθεί ένα κατάλληλο μοντέλο ομαδοποιημένου θερμικού δικτύου (Σχήμα 3-7), στο οποίο οι κατανεμημένες θερμικές αντιστάσεις και οι χωρητικότητες συνδέονται μεταξύ τους μέσω διακριτού αριθμού κόμβων.



Σχήμα 3- 7: Μοντέλο ομαδοποιημένου θερμικού δικτύου της μεταβατικής ανάλυσης για τοίχο πολλαπλών στρώσεων, (Kontoleon, Eumorfoulou 2008)

Η επίδραση του συντελεστή απορρόφησης εξωτερικού χώρου σε συνδυασμό με την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στη θερμοκρασία ηλίου-αέρα, για κάθε σχηματισμό και προσανατολισμό τοίχου, είναι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή χρονική καθυστέρηση της διάδοσης της θερμότητας και η μείωση της αναλογίας των εσωτερικών θερμοκρασιών. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι οι καλύτερες τιμές των δυναμικών θερμικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών τοίχων εξαρτώνται επίσης από: (α) τον τύπο (δημόσιο ή οικιστικό) και τη λειτουργία (συνεχής ή διακοπτόμενη) της κτιριακής ζώνης, (β) το επιθυμητό επίπεδο των εσωτερικών θερμοκρασιών, καθώς και της ανοχής ταλαντώσεων θερμοκρασίας, (γ) την παρουσία ή απουσία κλιματιστικών μονάδων, (δ) τις υπάρχουσες επιφάνειες υαλοπινάκων (επέκταση και τύπος) και (ε) το περιβάλλον εξωτερικό περιβάλλον. (Kontoleon *et.al.*, 2008)

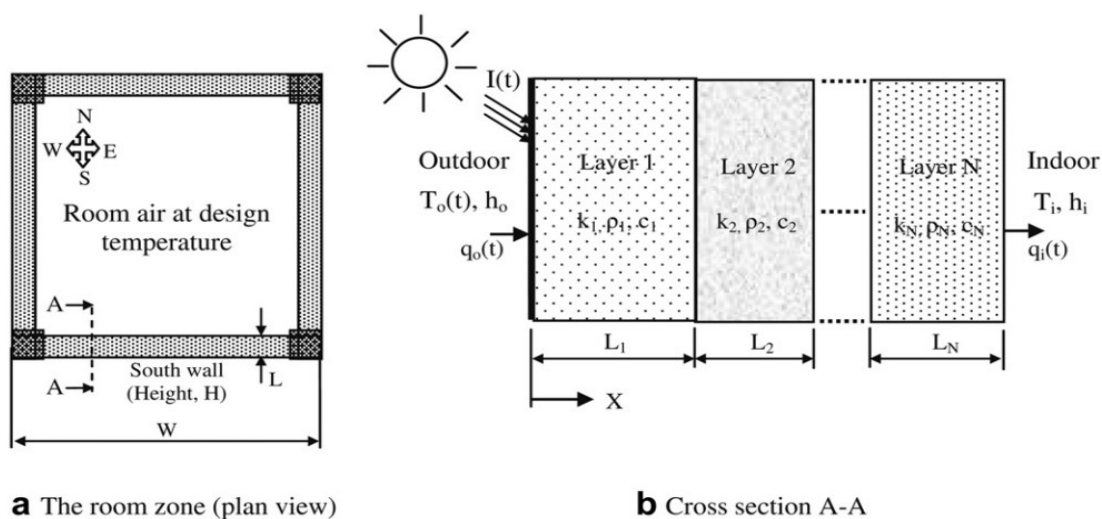
Οι Κοντολέων, Θεοδοσίου και Τσικαλουδάκη το 2013, στη μελέτη τους αναλύουν την επίδραση των αυξομειώσεων της πυκνότητας και της αγωγιμότητας του σκυροδέματος στον συντελεστή μείωσης και τη χρονική καθυστέρηση σε έξι δείγματα τοίχων με μόνωση, στην περιοχή της Μεσογείου. Τέτοιες διακυμάνσεις μεταβάλλουν τη θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος με άμεσες συνέπειες στις παραμέτρους αδράνειας των τοίχων. Η αύξηση της πυκνότητας του σκυροδέματος των τοίχων προκαλεί μείωση στη θερμική του αντίσταση, αυξάνει την ικανότητα για θερμική αποθήκευση που προκαλεί καθυστέρηση και μειώνει τη διάδοση της θερμότητας μέσω του τοίχου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν πώς οι διακυμάνσεις της πυκνότητας και της αγωγιμότητας του σκυροδέματος καθώς και η σχετική τοποθέτηση του σκυροδέματος και της μόνωσης (σε μία ή δύο στρώσεις εντός του συγκροτήματος τοίχου) επηρεάζουν τον συντελεστή μείωσης και τη χρονική καθυστέρηση. (Kontoleon *et. al.*, 2013)

Ο Ozel (2011) στη μελέτη του στοχεύει στον προσδιορισμό της θερμικής απόδοσης και του βέλτιστου πάχους μόνωσης τοίχων κτιρίων κατασκευασμένων από πέντε διαφορετικά υλικά κατασκευής και δύο διαφορετικά μονωτικά υλικά

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τον καθορισμό της βέλτιστης μόνωσης, τα πάχη ποικίλλουν και αντίστοιχα η εξοικονόμηση ενέργειας και οι περίοδοι απόσβεσης ανάλογα με πέντε διαφορετικά υλικά κατασκευής και δύο διαφορετικά υλικά μόνωσης. (Ozel, 2011)

Ο Ozel (2012), διερεύνησε την επίδραση της ηλιακής απορροφητικότητας της εξωτερικής επιφάνειας τόσο στα θερμικά χαρακτηριστικά όσο και στο βέλτιστο πάχος μόνωσης. Η μελέτη πραγματοποιείται για κατασκευή τοίχου που αποτελείται από N παράλληλα στρώματα με διαφορετικό πάχος και φυσικές ιδιότητες όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-8.



Σχήμα 3- 8: Η ζώνη του εξεταζόμενου δωματίου και η σύνθετη δομή του τοίχου (Ozel 2012)

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επίδραση της ηλιακής απορροφητικότητας στο ετήσιο φορτίο μετάδοσης ψύξης είναι μεγαλύτερη από αυτή της θέρμανσης. Για μη μονωμένους και μονωμένους τοίχους, η ηλιακή απορροφητικότητα έχει μεγάλη επίδραση στα ετήσια φορτία μετάδοσης ενώ έχει μικρή επίδραση στη μέση ετήσια χρονική υστέρηση. Από την άλλη πλευρά, ο παράγοντας μείωσης είναι σχεδόν ανεπηρέαστος από την ηλιακή απορρόφηση. Η μέση ετήσια χρονική υστέρηση και ο συντελεστής μείωσης μεταξύ των δυναμικών θερμικών χαρακτηριστικών επηρεάζονται λιγότερο από την ηλιακή

απορροφητικότητα. Η ηλιακή απορρόφηση έχει περισσότερο σημαντική επίδραση στην εξοικονόμηση ενέργειας ενώ έχει πολύ μικρή επίδραση στο βέλτιστο πάχος μόνωσης και στην περίοδο απόσβεσης. (Ozel 2012)

Ο Ozel επίσης (Ozel, 2014) μελέτησε τη βελτιστοποίηση του πάχους της μόνωσης ανάλογα με τη θέση μόνωσης και τον προσδιορισμό της δομής του τοίχου που παρέχει την καλύτερη θερμική απόδοση.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ετήσια φορτία μετάδοσης θερμότητας δεν εξαρτώνται από τη θέση μόνωσης, ενώ η θέση μόνωσης έχει σημαντική επίδραση στην ετήσια μέση χρονική υστέρηση και στον παράγοντα μείωσης. Επί πλέον το πάχος της μόνωσης βελτιστοποιείται με τη χρήση ανάλυσης κόστους κατά τη διάρκεια ζωής 20 ετών του κτιρίου. Φαίνεται ότι το βέλτιστο πάχος μόνωσης δεν επηρεάζεται από τη θέση κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Τέλος, οι θερμικές επιδόσεις τριών διαφορετικών κατασκευών τοίχων συγκρίνονται χρησιμοποιώντας το βέλτιστο πάχος μόνωσης. Οι μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας και το μέγιστο φορτίο εμφανίζονται στην περίπτωση που η μόνωση τοποθετείται στο μέσο του τοίχου ενώ η εξωτερική μόνωση δίνει τη μικρότερη διακύμανση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η καλύτερη θερμική απόδοση επιτυγχάνεται όταν η μόνωση τοποθετείται στο εξωτερικό του τοίχου.

Οι Jing, Zhang, Cao και Wang μελέτησαν την επίδραση του τοίχου στη ροή θερμότητας. Ο τοίχος θα επηρεάσει πρώτα τη ροή θερμότητας στο χώρο και στη συνέχεια η ροή θερμότητας προκαλεί τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα. Σε σύγκριση με τη θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου, η ροή θερμότητας του τοίχου είναι ο άμεσος λόγος που προκαλεί τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα, επηρεάζει άμεσα το φορτίο ψύξης/θέρμανσης και τη θερμική άνεση του δωματίου. Επομένως ερευνά την επίδραση του τοίχου στη ροή θερμότητας. Χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους, τη χρονική υστέρηση ροής θερμότητας και το συντελεστή μείωσης ροής θερμότητας, για την αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης του τοίχου. Με βάση το αριθμητικό μοντέλο που κατασκευάστηκε στην εργασία, τα συμπεράσματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: (1) Η διακύμανση των ροών θερμότητας μέσω του τοίχου μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας τη θερμική χωρητικότητα του τοίχου, αλλά η συνολική ροή θερμότητας του τοίχου κατά τη διάρκεια μιας ημέρας δεν μπορεί να μειωθεί. (2) Η χρονική υστέρηση ροής θερμότητας, αυξάνεται με την αύξηση της θερμικής χωρητικότητας και του πάχους του τοίχου, ενώ μειώνεται με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του τοίχου. Ο συντελεστής μείωσης της ροής θερμότητας μειώνεται με την αύξηση της θερμικής

χωρητικότητας και του πάχους του τοιχώματος, ενώ αυξάνεται με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του τοίχου. (X.Jing *et.al.*, 2012).

4. Μοντέλο θερμικής ανάλυσης

4.1 Υλικά δόμησης

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας εξετάστηκαν διαφορετικές συνθέσεις τοιχοποιίας κτιριακού κελύφους, με θερμομόνωση. Το μοντέλο δομείται ως εξής: α) υλικό πλήρωσης (Masonry), β) υλικό θερμομόνωσης (Insulation), γ) επίχρισμα (Coating).

Στην εργασία αυτή, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι: α) οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 25cm, β) πετροβάμβακας μεταβλητού πάχους, γ) συνθετικό κονίαμα πάχους 1 cm. Ειδικότερα, ο πετροβάμβακας μελετήθηκε για δύο πάχη $d_i = 5\text{cm}$ και $d_i = 10\text{cm}$, για να δοθεί έμφαση στην επίδραση της μεταβολής του πάχους της θερμομόνωσης στο χρόνο ανόδου της εσωτερικής θερμοκρασίας του συστήματος μελέτης. Τα ανωτέρω υλικά επιλέχθηκαν βάσει των θερμοφυσικών ιδιοτήτων τους, αλλά και λόγω του γεγονότος ότι χρησιμοποιούνται ευρέως στις κατασκευές, θεωρούνται δε ομογενή και ισότροπα.

Όσον αφορά στις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών, οι τιμές που ελήφθησαν για τους υπολογισμούς απεικονίζονται στον Πίνακα 4-1. Οι διακυμάνσεις των θερμοφυσικών ιδιοτήτων σε ορισμένα εύρη θερμοκρασίας είναι αμελητέα για ορισμένα υλικά, αλλά σημαντική για άλλα. Έτσι, στο οπλισμένο σκυρόδεμα καθώς και στον πετροβάμβακα οι μεταβολές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δεν είναι αμελητέες και λαμβάνουν τιμές που απεικονίζονται στον Πίνακα 4-2.

ΔΟΜΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	d (cm)	λ (W/(m*K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/(kg*K))
Οπλισμένο Σκυρόδεμα ¹	25	μεταβλητό	2300	900
Πετροβάμβακας ^{2 3}	5/10	μεταβλητό	120	800
Συνθετικό κονίαμα ⁴	1	0.87	1800	1100

Πίνακας 4-1: Υλικά και θερμοφυσικές τους ιδιότητες

¹ EN1992-1-2 (2004) Eurocode 2

² Georgiadis-Filiras, 2015

³ Sjöström *et al.*, 2012

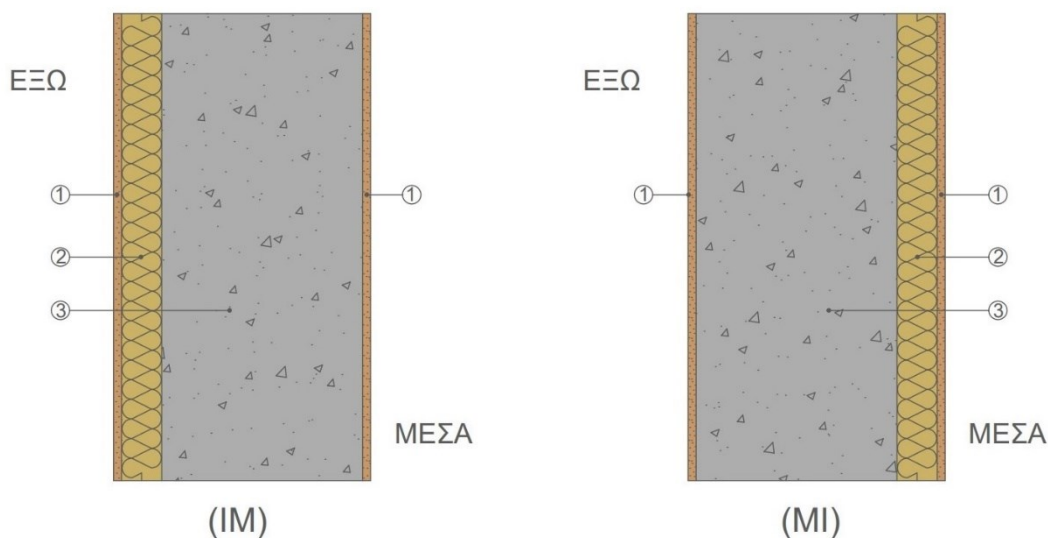
⁴ T.O.T.E.E. 20701-2/2017, 2017

Θερμοκρασία (°C)	-20	-10	0	10	20	30	40	100
λ (W/(m*K)) οπλισμένου σκυροδέματος ⁵	2.049	2.025	2	1.976	1.951	1.927	1.904	1.766
λ (W/(m*K)) πετροβάμβακα ^{6 7}	0.0379	0.0389	0.0400	0.0410	0.0421	0.0433	0.0445	0.0530

Πίνακας 4- 2: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υλικών πλήρωσης και θερμομόνωσης

4.2 Κατασκευαστικές διατομές

Για τη διεξαγωγή της μελέτης εξετάστηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις τοιχοποιίας, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 4-1. Οι διατάξεις αποτελούνται από στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος, πλάκες πετροβάμβακα και συνθετικό επίχρισμα. Η διάκρισή τους εντοπίζεται στη θέση τοποθέτησης της θερμομόνωσης. Έτσι το θερμομονωτικό τοποθετείται στη μία περίπτωση, στην εξωτερική παρειά της τοιχοποιίας (IM) και στη δεύτερη περίπτωση, στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας (MI).



Σχήμα 4- 1: Χαρακτηριστικές διατάξεις εξωτερικής τοιχοποιίας μελέτης. Υλικά: 1. Συνθετικό κόνιαμα, 2. Πετροβάμβακας, 3. Οπλισμένο Σκυρόδεμα

⁵ EN1992-1-2 (2004) Eurocode 2

⁶ Georgiadis-Filiras, 2015

⁷ Sjöström *et al.*, 2012

4.3 Συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος

Οι χαρακτηριστικές διατάξεις εξωτερικής τοιχοποιίας που εξετάζονται, υποβάλλονται σε δύο διαφορετικές θερμοκρασιακές φορτίσεις εξωτερικού περιβάλλοντος, μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας, για δύο «φαινομενικά» αντιπροσωπευτικές ημέρες του χειμώνα. Η πρώτη περίπτωση αφορά σε συνθήκες κρύας χειμερινής ημέρας με χαμηλότερη θερμοκρασία $T_{min} = -5^{\circ}\text{C}$ και υψηλότερη $T_{max} = 5^{\circ}\text{C}$, μέσο όρο ημερήσιας θερμοκρασίας $T_{out_mean} = 0^{\circ}\text{C}$, ενώ στη δεύτερη περίπτωση μελετάμε τις διατομές επίσης σε συνθήκες χειμερινής ημέρας με χαμηλότερη θερμοκρασία $T_{min} = 5^{\circ}\text{C}$ και υψηλότερη $T_{max} = 15^{\circ}\text{C}$, με μέσο όρο ημερήσιας θερμοκρασίας $T_{out_mean} = 10^{\circ}\text{C}$, σε μία οποιαδήποτε ορεινή περιοχή της Ελλάδας.

Πιο αναλυτικά, οι διατομές υποβάλλονται σε περιοδικές εξωτερικές διεγέρσεις, οι οποίες αποδίδονται από τη θερμοκρασία ήλιου-αέρα T_{sa} , που περιλαμβάνει τις επιπτώσεις της ηλιακής ακτινοβολίας συνδυασμένη με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα και αλλάζει περιοδικά. Αυτή η θερμοκρασία θεωρείται ότι δείχνει ημιτονοειδείς μεταβολές κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου. Αφού η χρονική καθυστέρηση και ο συντελεστής μείωσης εξαρτώνται μόνο από το υλικό του τοίχου και όχι από κλιματολογικά δεδομένα, η εξίσωση που μας δίνει τη θερμοκρασία ηλίου-αέρα δίνεται ως εξής (Asan, 2000):

$$T_{sa(t)} = \frac{|T_{max} - T_{min}|}{2} \sin\left(\frac{2\pi t}{p} - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{|T_{max} - T_{min}|}{2} \quad (4.1)$$

Όπου:

T_{min} : η ελάχιστη εξωτερική θερμοκρασία της ημερήσιας περιόδου

T_{max} : η μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία της ημερήσιας περιόδου

P : η ημερήσια περίοδος ($p = 24$ ώρες).

4.4 Συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος

Όσον αφορά στις εσωτερικές θερμοκρασιακές συνθήκες, στην πρώτη φάση της ανάλυσης, στον εσωτερικό χώρο τη χρονική στιγμή $t=0$, επικρατεί θερμοκρασία T_{in} ίση με τη μέση τιμή εξωτερικής θερμοκρασίας T_{out_mean} και το σύστημα ισορροπεί. Στη συνέχεια επιβάλλεται συνεχόμενη ροή θερμότητας q_{heat} , καθορισμένης ισχύος, που μεταβάλλεται παραμετρικά και παίρνει τιμές από 5.0 W/m^2 έως 25.0 W/m^2 με βήμα 2.5 W/m^2 , ώστε να

επιτευχθεί ισορροπία. Σε αυτή τη φάση, τα αποτελέσματα θα αποκαλύψουν τη ζητούμενη τιμή ροής θερμότητας q_{heat} , η οποία οδηγεί το σύστημα σε ισορροπία με μέσο όρο εσωτερικής θερμοκρασίας 15°C .

Στη δεύτερη φάση της ανάλυσης, θα ξανατρέξουμε τους υπολογισμούς, επιβάλλοντας τη ζητούμενη ροή θερμότητας q_{heat} , η οποία προέκυψε από το προηγούμενο βήμα, για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα ώστε το σύστημα να ισορροπήσει στην ασφαλή θερμοκρασία (safe temperature) των 15°C . Την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή, επιβάλλεται ροή θερμότητας μεγαλύτερης ισχύος, για χρονικό διάστημα 2 ημερών, η οποία μεταβάλλεται παραμετρικά και παίρνει τιμές από 5.0 W/m^2 έως 60.0 W/m^2 με βήμα 5.0 W/m^2 , ώστε να επιτευχθούν οι θερμοκρασίες στόχευσης 18°C , 20°C , 22°C .

4.5 Το λογισμικό COMSOL Multiphysics

Το COMSOL Multiphysics αποτελεί ένα σημαντικό διαδραστικό περιβάλλον προσομοίωσης, το οποίο πραγματοποιεί μοντελοποιήσεις και επιλύσεις κάθε φύσης επιστημονικών και τεχνικών προβλημάτων. Διαθέτει ενσωματωμένο ένα ισχυρό περιβάλλον εργασίας με τη δυνατότητα Κατασκευής Μοντέλου (Model Builder) που παρέχει εκτενή επισκόπηση του μοντέλου και πρόσβαση σε όλες τις λειτουργίες. Το COMSOL Multiphysics προσφέρεται για την εύκολη επέκταση συμβατικών μοντέλων ενός τύπου φυσικής σε πολλαπλά μοντέλα (multiphysics) όπου επιλύουν ταυτόχρονα συζευγμένα φυσικά φαινόμενα. Η αξιοποίηση των δυνατοτήτων του λογισμικού δεν προϋποθέτει βαθύτερη γνώση μαθηματικών ή αριθμητικής ανάλυσης. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

Με τη χρήση των ενσωματωμένων διασυνδέσεων (physics interfaces) και την προηγμένη υποστήριξη των ιδιοτήτων των υλικών, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων ορίζοντας τα σχετικά φυσικά μεγέθη, όπως ιδιότητες υλικού, φορτία, περιορισμούς, πηγές και ροές, αντί να ορίζει τις υποκείμενες εξισώσεις. Υπάρχει πάντα η δυνατότητα να γίνει η εφαρμογή των μεταβλητών, των εκφράσεων ή των αριθμών απευθείας σε στερεούς και ρευστούς τομείς, όρια, ακμές και σημεία ανεξάρτητα από το πλέγμα των υπολογισμών. Κατόπιν αυτού, το λογισμικό συγκεντρώνει εσωτερικά ένα σύνολο εξισώσεων που αντιπροσωπεύουν ολόκληρο το μοντέλο. Επιπλέον, μέσω της ευέλικτης γραφικής διεπαφής

χρήστη (GUI), μέσω του προγράμματος, δίνεται πρόσβαση σε εφαρμογές που έχουν δημιουργηθεί σε Java ή MATLAB. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

Μέσω αυτών των διασυνδέσεων φυσικής, μπορούν να εκτελεστούν διάφοροι τύποι μελετών, όπως:

- Στατικές και χρονοεξαρτώμενες (παροδικές) μελέτες
- Γραμμικές και μη γραμμικές μελέτες
- Μελέτες απόκρισης ιδιοσυχνότητας, τρόπου λειτουργίας και συχνότητας

Κατά τη διαδικασία επίλυσης των μοντέλων, το COMSOL συναρμόζει και λύνει το πρόβλημα κάνοντας χρήση μίας ομάδας προηγμένων εργαλείων αριθμητικής ανάλυσης. Το λογισμικό εκτελεί την ανάλυση μαζί με προσαρμοστική βελτίωση πλέγματος και έλεγχο σφαλμάτων με τη βοήθεια αριθμητικών επιλυτών. Οι μελέτες μπορούν να κάνουν χρήση συστημάτων πολυεπεξεργαστών και υπολογιστών συμπλέγματος και υπάρχει η δυνατότητα να εκτελεστούν εργασίες δέσμης και παραμετρικές σαρώσεις. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

Το λογισμικό δημιουργεί ακολουθίες για να καταγραφούν όλες οι διαδικασίες από τις οποίες προκύπτουν η γεωμετρία, το πλέγμα, η φυσική, οι μελέτες και οι ρυθμίσεις επίλυσης, όπως και η προβολή και η απόδοση των αποτελεσμάτων. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η παραμετροποίηση οποιουδήποτε μέρους του μοντέλου. Ο χρήστης μπορεί να διαμορφώσει διαδοχικά το μοντέλο μέσα από το πρόγραμμα, συναρτήσει των παραμέτρων που έχει θέσει αρχικά. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις (PDE) αποτελούν τη βάση για τους νόμους της επιστήμης και παρέχουν τη βάση για τη μοντελοποίηση ενός ευρέος φάσματος επιστημονικών και μηχανικών φαινομένων. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

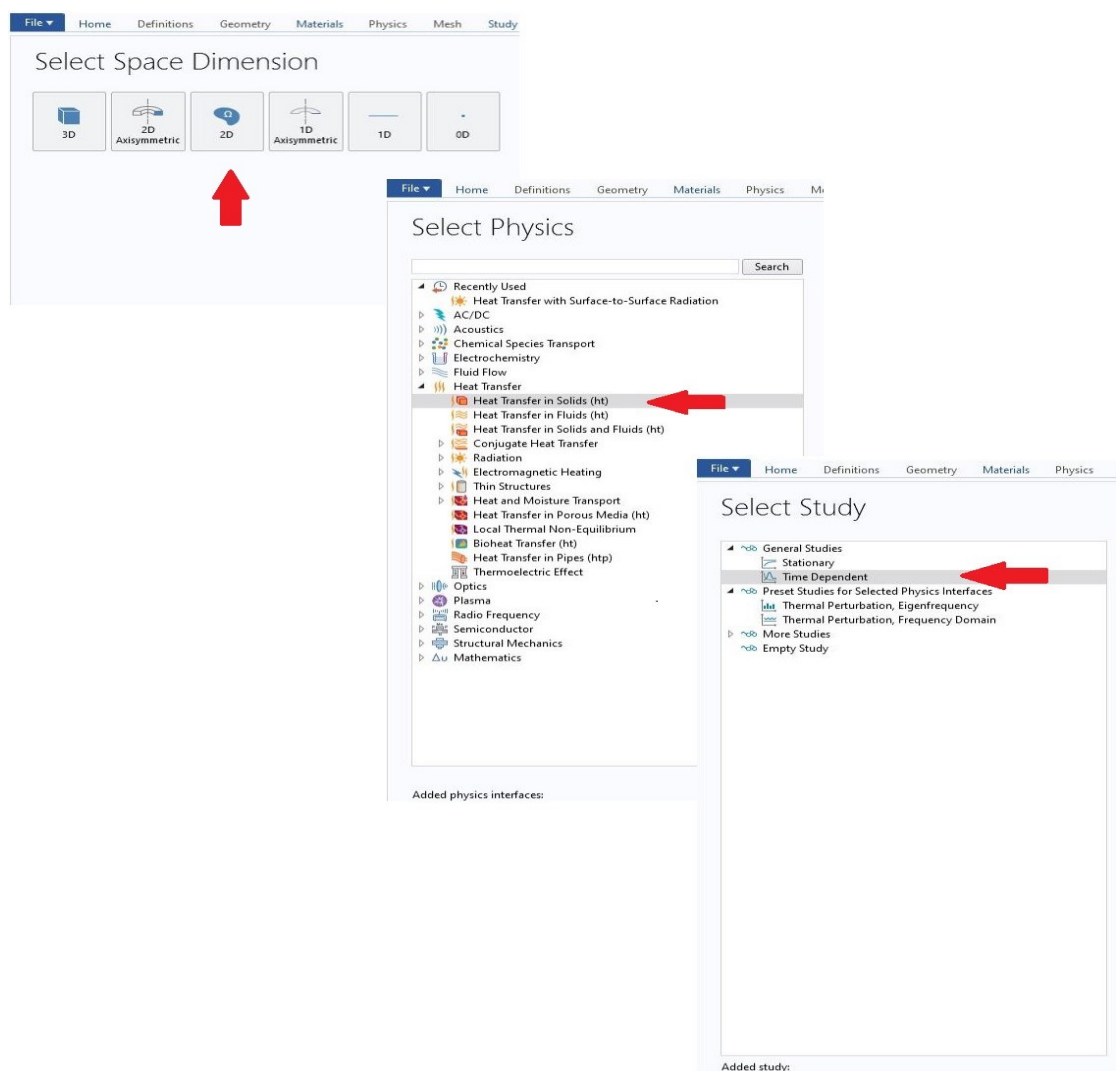
Πολλές εφαρμογές του πραγματικού κόσμου περιλαμβάνουν ταυτόχρονες ζεύξεις σε ένα σύστημα PDEs - multiphysics. Στη βασική του διαμόρφωση, το COMSOL Multiphysics προσφέρει ισχύ μοντελοποίησης και ανάλυσης για πολλούς τομείς εφαρμογής. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

4.5.1 Το περιβάλλον μοντελοποίησης του COMSOL Multiphysics

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος COMSOL Multiphysics, επιλέγονται αρχικά οι γεωμετρικές διαστάσεις (select space dimensions), οι τύποι της φυσικής (select physics, review physics interface) και τέλος οι τύποι της μελέτης (select study). (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

Στην εικόνα 4.1 απεικονίζονται οι επιλογές για την παρούσα εργασία:

- (α) Γεωμετρία δύο διαστάσεων (2D)
- (β) Μετάδοση θερμότητας σε στερεά (Heat transfer with Surface-to-Surface Radiation)
- (γ) Μελέτη εξαρτώμενη από το χρόνο (Time Dependent)



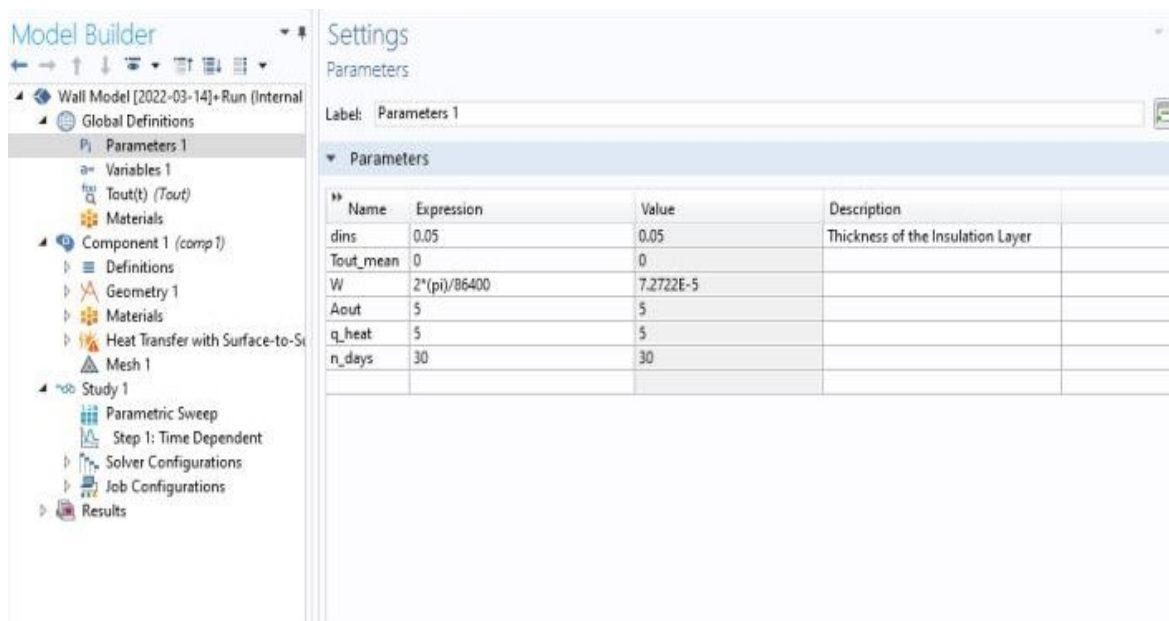
Εικόνα 4- 2: Εκκίνηση προγράμματος COMSOL Multiphysics, επιλογή: (α) Γεωμετρία 2 διαστάσεων, (β) Μετάδοση θερμότητας σε στερεά, (γ) Μελέτη εξαρτώμενη από το χρόνο

4.5.2 Καθολικοί ορισμοί (Global Definitions)

4.5.2.1 Παράμετροι (Parameters)

Είναι καθολικές βαθμιδωτές τιμές που καθορίζονται από το χρήστη, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η παραμετροποίηση σε οποιοδήποτε σκέλος του μοντέλου. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

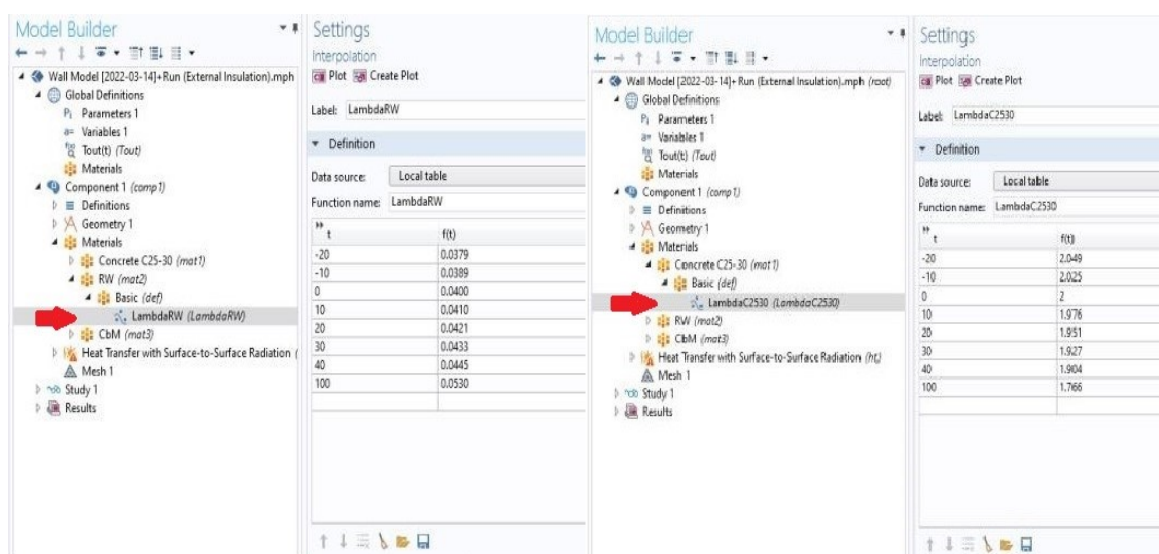
Στο παρόν μοντέλο οι παράμετροι που τοποθετήθηκαν είναι: το πάχος της θερμομόνωσης (d_{ins}), η μέση εξωτερική θερμοκρασία (T_{out_mean}), η τιμή της γωνιακής ταχύτητας (W), το πλάτος κύματος της εξωτερικής επιφάνειας (A_{out}), η ισχύς της ροής θερμότητας που επιβάλλεται εσωτερικά (q_{heat}), ο αριθμός των ημερών (n_days).



Εικόνα 4- 3: Εισαγωγή παραμέτρων

4.5.2.2 Συναρτήσεις (Functions)

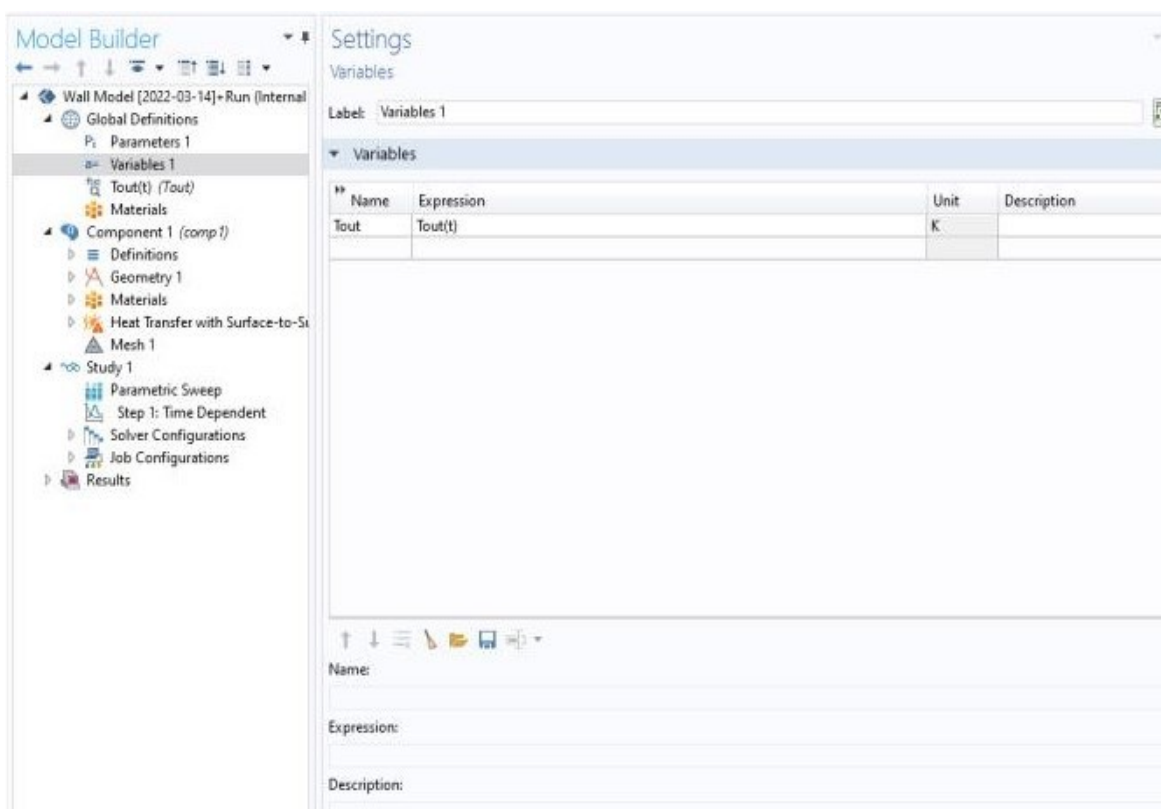
Στο COMSOL υπάρχει η δυνατότητα σχηματισμού ενδεικνυόμενων συναρτήσεων για την επίλυση των κατά περίπτωση προβλημάτων (Interpolation Functions). (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual) Η συνάρτηση παρεμβολής στην παρούσα εργασία χρησιμοποιεί τις μεταβλητές των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας λ , του οπλισμένου σκυροδέματος και του υλικού θερμομόνωσης και καθορίζεται από πίνακες τιμών που αφορούν συντελεστές λ ($W/(m \cdot K)$), για συγκεκριμένες θερμοκρασίες.



Εικόνα 4- 4: Εισαγωγή συναρτήσεων για τον προσδιορισμό του λ , σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες

4.5.2.3 Μεταβλητές (Variables)

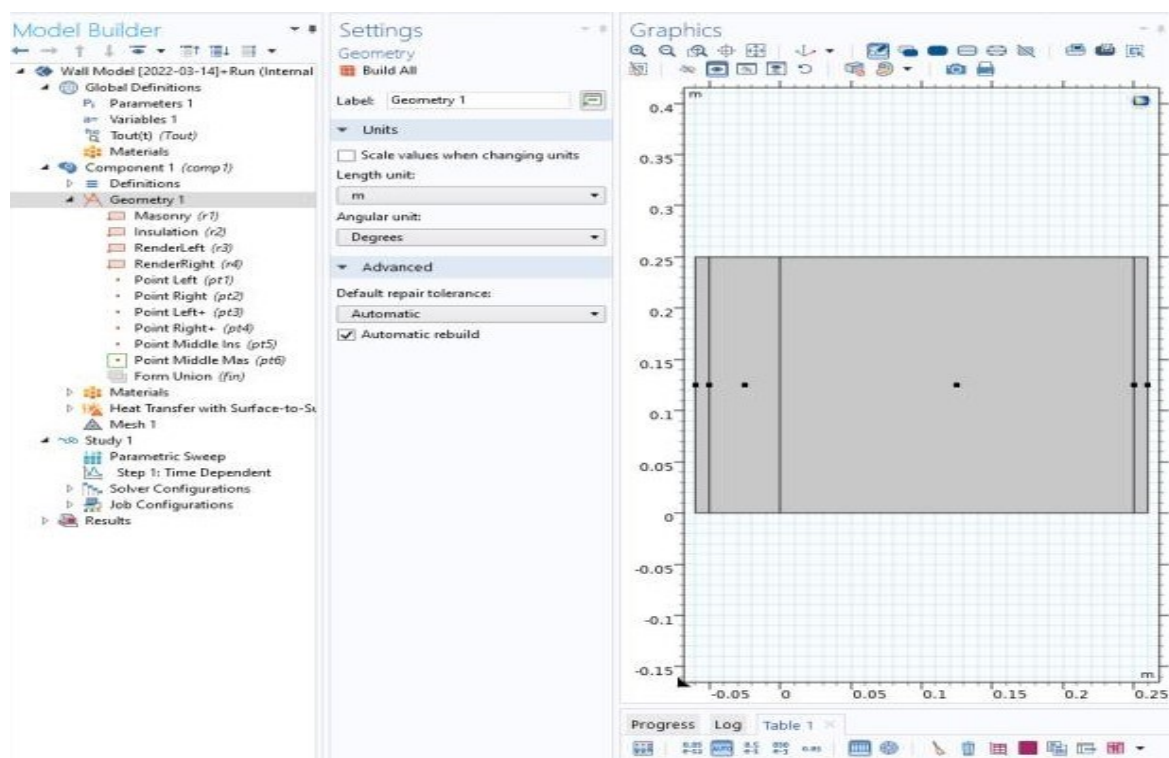
Στην ενότητα αυτή θα καθορισθούν η ανεξάρτητη και η εξαρτημένη μεταβλητή της συνάρτησης παρεμβολής, ενώ περιγράφονται ο συμβολισμός της συνάρτησης και τα ονόματα των μεταβλητών. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual) Στην παρούσα μελέτη, η συνάρτηση παρεμβολής είναι η $T_{out}(t)$, έχει ως ανεξάρτητη μεταβλητή το χρόνο t , ενώ ως εξαρτημένη μεταβλητή ορίζεται η τελική θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος T_{out} που επιδρά με περιοδικές διεγέρσεις στην εξωτερική παρεία της τοιχοποιίας (σε βαθμούς K). Η θερμοκρασία αυτή περιγράφεται από τη σχέση (4.1) και είναι ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου.



Εικόνα 4- 5: Εισαγωγή παραμέτρων

4.5.3 Γεωμετρία (Geometry)

Για τη μοντελοποίηση της διατομής μελέτης χρησιμοποιήθηκε γεωμετρία 2 διαστάσεων (2D). Ορίστηκαν οι μονάδες μέτρησης και σχεδιάστηκαν σε δύο διαστάσεις οι διατομές που αναφέρονται αναλυτικά στο 4.2. Σε κάθε περίπτωση στο σημείο μηδέν των αξόνων αντιστοιχίστηκε το αριστερό άκρο του οπλισμένου σκυροδέματος, ενώ κατά περίπτωση επιλέχθηκε η εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας.



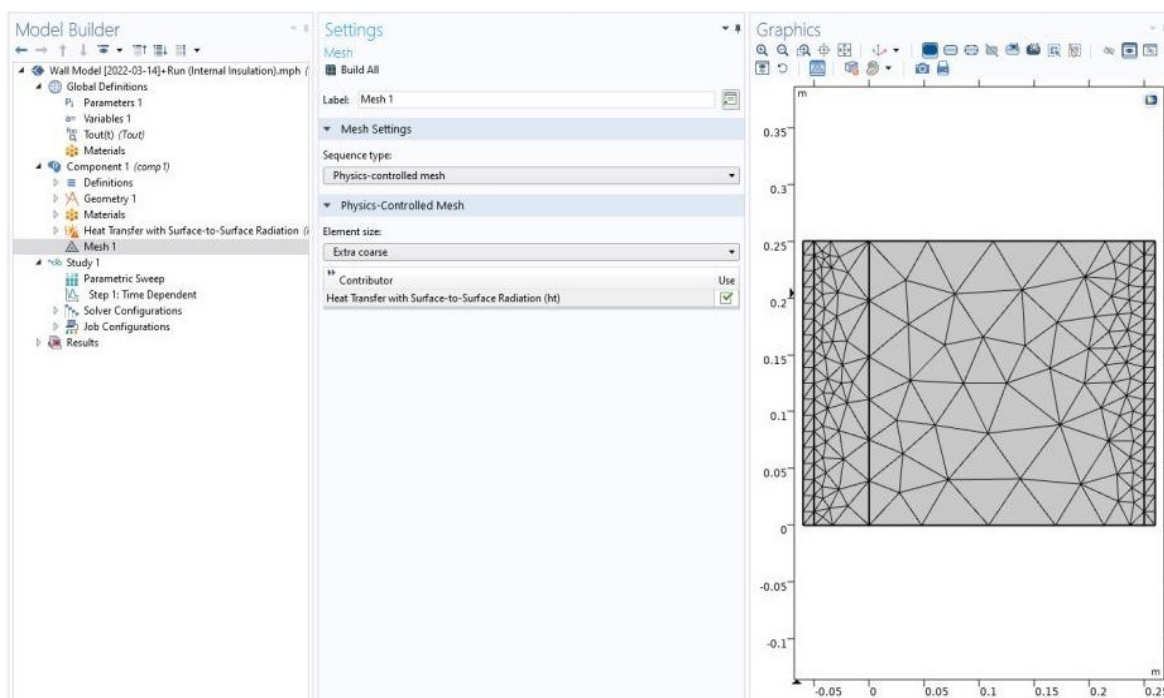
Εικόνα 4-6: Μοντελοποίηση διατομής τοιχοποιίας σε 2D

4.5.4 Χρήση πλέγματος (Meshing)

Οι κόμβοι πλέγματος (Mesh) επιτρέπουν την ψηφιοποίηση της γεωμετρίας σε μικρές μονάδες απλών σχημάτων, που αναφέρονται ως στοιχεία πλέγματος. Ένα πλέγμα είναι το αποτέλεσμα της δημιουργίας μιας ακολουθίας πλέγματος. Η δημιουργία πλέγματος διαχωρίζει τους τομείς σε τριγωνικά ή τετράπλευρα στοιχεία. Εάν το όριο είναι καμπύλο, αυτά τα στοιχεία αντιπροσωπεύουν μια προσέγγιση της αρχικής γεωμετρίας. Οι πλευρές των τριγώνων και των τετράπλευρων ονομάζονται δικτυωτά άκρα και οι γωνίες τους είναι κορυφές του πλέγματος. Μια δικτυωτή άκρη δεν πρέπει να περιέχει τις κορυφές του πλέγματος στο εσωτερικό της.

Τα όρια που ορίζονται στη γεωμετρία διακρίνονται (κατά προσέγγιση) σε ακμές πλέγματος, που αναφέρονται ως οριακά στοιχεία (ή στοιχεία ακμών), τα οποία πρέπει να συμμορφώνονται με τα στοιχεία πλέγματος των παρακείμενων περιοχών. Οι κορυφές της γεωμετρίας αντιπροσωπεύονται από στοιχεία κορυφής. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

Στην παρούσα γεωμετρία επιλέχθηκε η πυκνότητα ψηφιοποίησης “extra coarse” ως η καταλληλότερη.



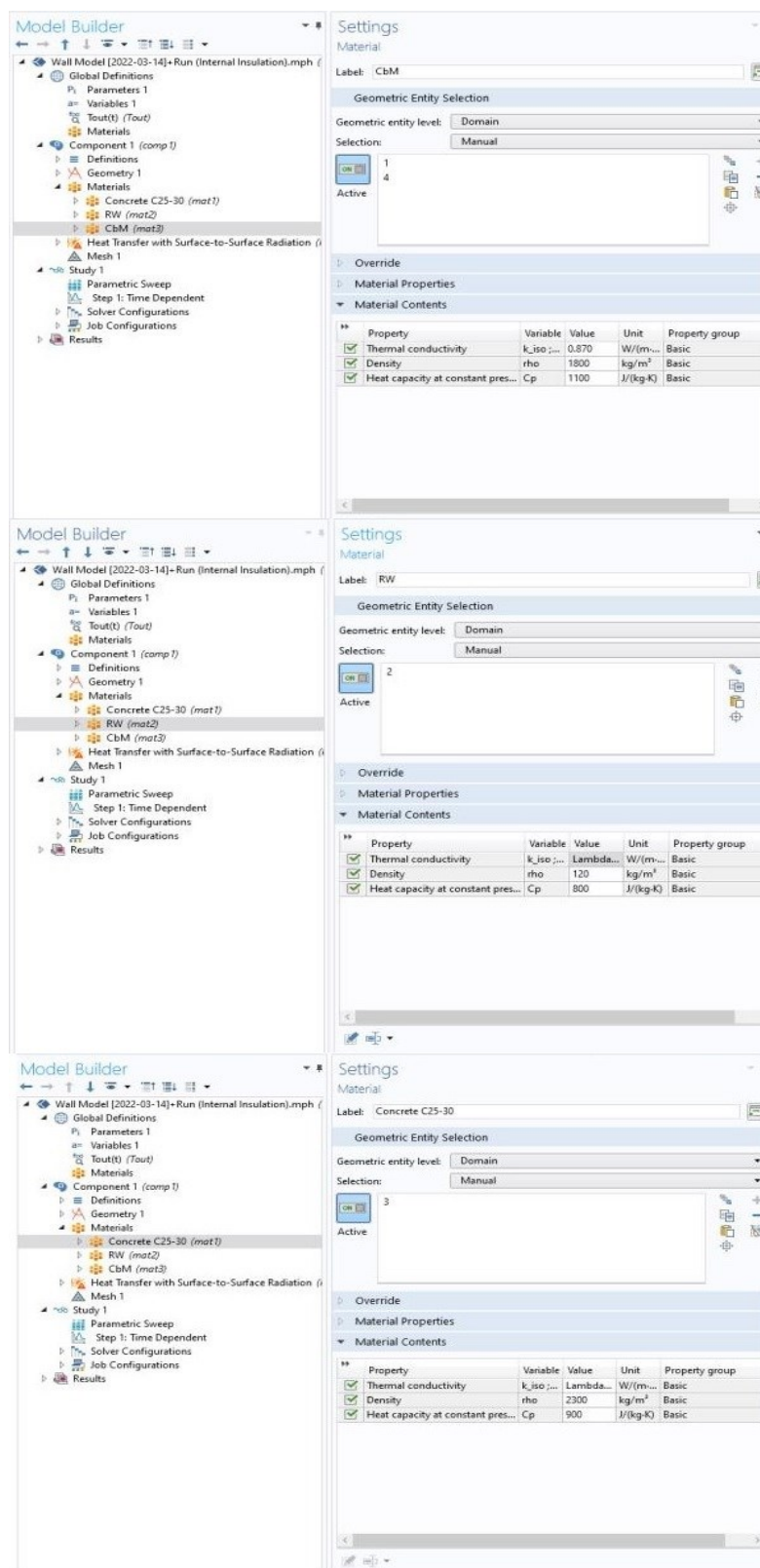
Εικόνα 4- 7: Ψηφιοποίηση (meshing) του μοντέλου με πυκνότητα “extra fine”

4.5.5 Υλικά (Materials)

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά δόμησης α) ως υλικό πλήρωσης, το οπλισμένο σκυρόδεμα (Concrete C25-30), β) ως υλικό θερμομόνωσης, ο πετροβάμβακας (RW) και γ) συνθετικό επίχρισμα (CbM).

Τα ανωτέρω υλικά:

- θεωρούνται ομογενή και ισότροπα
- όσον αφορά στις θερμοφυσικές ιδιότητές τους, οι τιμές της πυκνότητας ρ και της ειδικής θερμοχωρητικότητας c_p θεωρούνται σταθερές για όλα τα υλικά, ενώ οι διακυμάνσεις του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ , σε ορισμένα εύρη θερμοκρασίας για το οπλισμένο σκυρόδεμα και τη θερμομόνωση δεν είναι αμελητέα και όπως αναφέρθηκε στο 4.5.2.2, λαμβάνονται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 4-8: Εισαγωγή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών στο μοντέλο

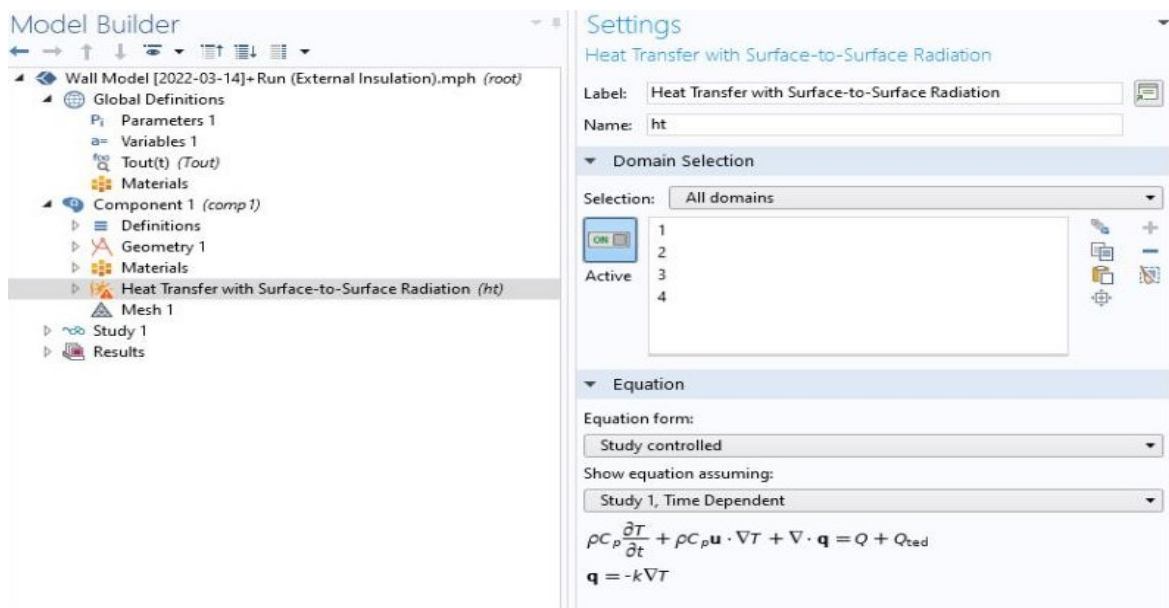
4.5.6 Μετάδοση θερμότητας σε στερεά (Heat transfer with Surface-to-Surface Radiation)

Στην παρούσα μελέτη αντί του συνήθους μηχανισμού “Heat transfer in solids” , χρησιμοποιήθηκε το “Heat transfer with Surface-to-Surface Radiation” θέλοντας να δώσουμε έμφαση στη μοντελοποίηση μεταφοράς θερμότητας. Ο μηχανισμός, ο οποίος αποτελεί μία πιο ενισχυμένη μορφή μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας, μπορεί να λάβει υπόψιν τη μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας και μέσα σε κλειστά διάκενα, εφόσον αυτά υπάρχουν , χωρίς όμως να χρειαστεί να αξιοποιηθούν όλες οι δυνατότητες του μηχανισμού στην περίπτωσή μας. Επίσης λαμβάνεται υπόψιν στο σύνολο των υλικών που αποτελούν τος διατομές της μελέτης.

Αντιμετωπίζει τη θερμική ακτινοβολία ως μεταφορά ενέργειας μεταξύ ορίων και εξωτερικών πηγών θερμότητας όπου το μέσο δεν συμμετέχει στην ακτινοβολία (διαφανές μέσο). Αυτός ο μηχανισμός δεν υπολογίζει το πεδίο θερμοκρασίας, το απαιτεί ως είσοδο μοντέλου. (COMSOL DOCUMENTATION)

Το μαθηματικό μοντέλο μετάδοσης θερμότητας στα στερεά υλικά περιγράφεται στο πρόγραμμα με την παρακάτω εξίσωση.

$$\rho * c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q \quad (4.2)$$

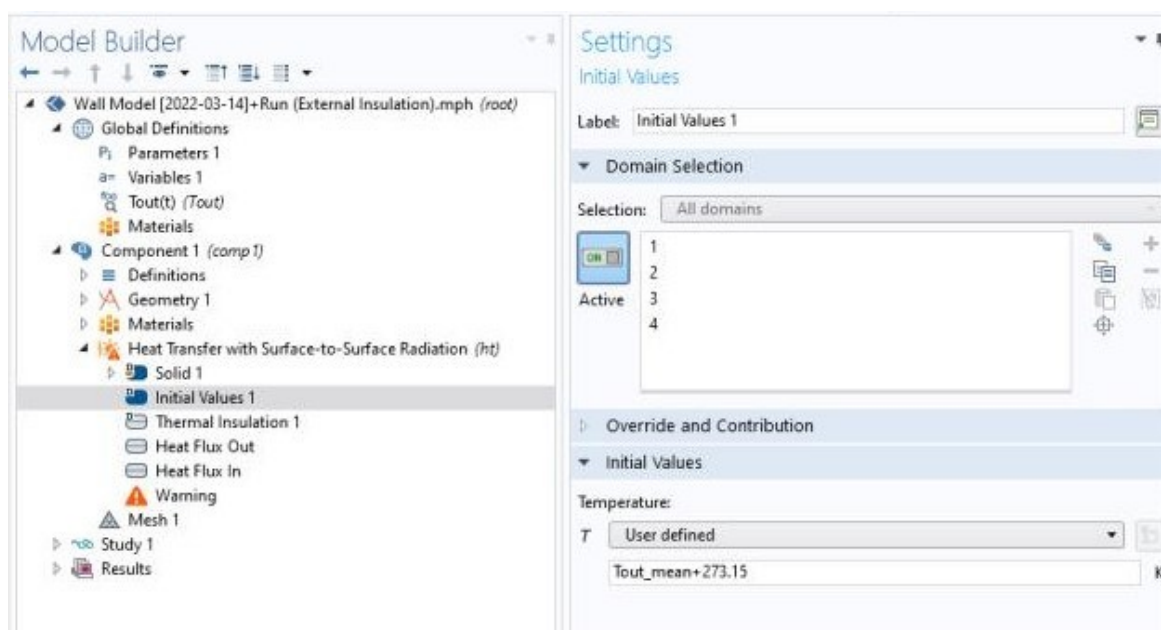


Εικόνα 4- 9: Μαθηματικό μοντέλο μετάδοσης θερμότητας του COMSOL, στο οποίο υπακούν τα στερεά στοιχεία διατομής

Η εξίσωση λαμβάνει υπόψιν τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών : συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ , πυκνότητα ρ , ειδική θερμοχωρητικότητα c_p και μία πηγή θερμότητας. Στο επόμενο στάδιο θα προστεθούν επιπλέον πηγές θερμότητας. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

4.5.6.1 Αρχική τιμή θερμοκρασίας (Initial Values)

Αρχικά θεωρείται ότι τη χρονική στιγμή $t=0$ το σύστημα ισορροπεί θερμικά , η εξωτερική θερμοκρασία ισούται με την εσωτερική ($T_{in} = T_{out}$), ήτοι δεν υπάρχει ροή θερμότητας προς καμία κατεύθυνση. Ορίζεται δηλαδή ότι στην έναρξη του χρόνου, η θερμοκρασία κάθε σημείου του μοντέλου είναι $T = T_{out_mean} + 273.15$ K. Την επόμενη στιγμή στο σύστημα εφαρμόζεται θερμοκρασιακή διέγερση, η οποία έχει ορισθεί στο πλαίσιο της έρευνας. Το σύστημα τρέχει αρχικά για n ημέρες, οι οποίες είναι υπό διερεύνηση, ώστε να φτάσει σε ισορροπία και να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες σφαλμάτων λόγω αρχικών συνθηκών. Το αποτέλεσμα που λαμβάνουμε είναι η ημερήσια διακύμανση των θερμοκρασιών σε t_h σημείο που βρίσκεται στην εσωτερική παρειά του μοντέλου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} εσωτερικής ροής θερμότητας.



Εικόνα 4- 10: Ορισμός της τιμής $T_{out_mean} + 273.15$ ως αρχικής θερμοκρασίας

4.5.6.2 Ροή θερμότητας με συναγωγή (Convective Heat Flux)

Η ροή θερμότητας με συναγωγή, ως οριακή συνθήκη σε ένα θερμαινόμενο σώμα, στην εκτεθειμένη προς τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες παρειά, υπολογίζεται με βάση το συντελεστή θερμικής μετάβασης και τη διαφορά θερμοκρασίας και δίνεται από τον τύπο: (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

$$q = h \cdot (T_{ext} - T) \quad (4.3)$$

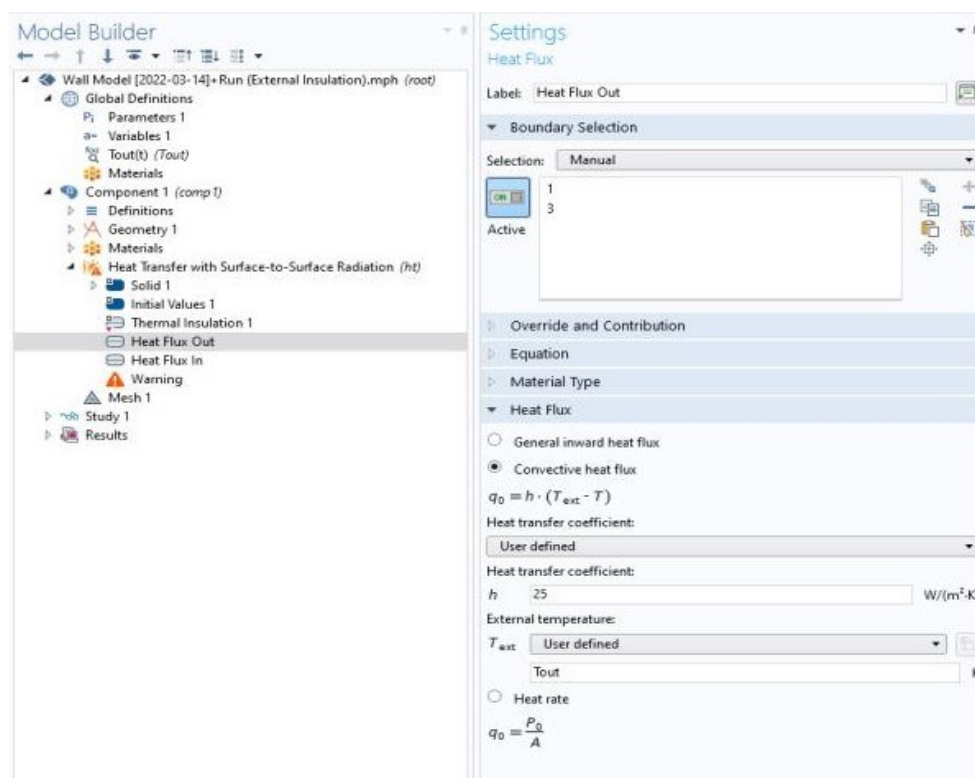
όπου:

h : ο συντελεστής θερμικής μετάβασης ($W/(m^2/K)$) λόγω συνδυασμένης δράσης συναγωγής και ακτινοβολίας

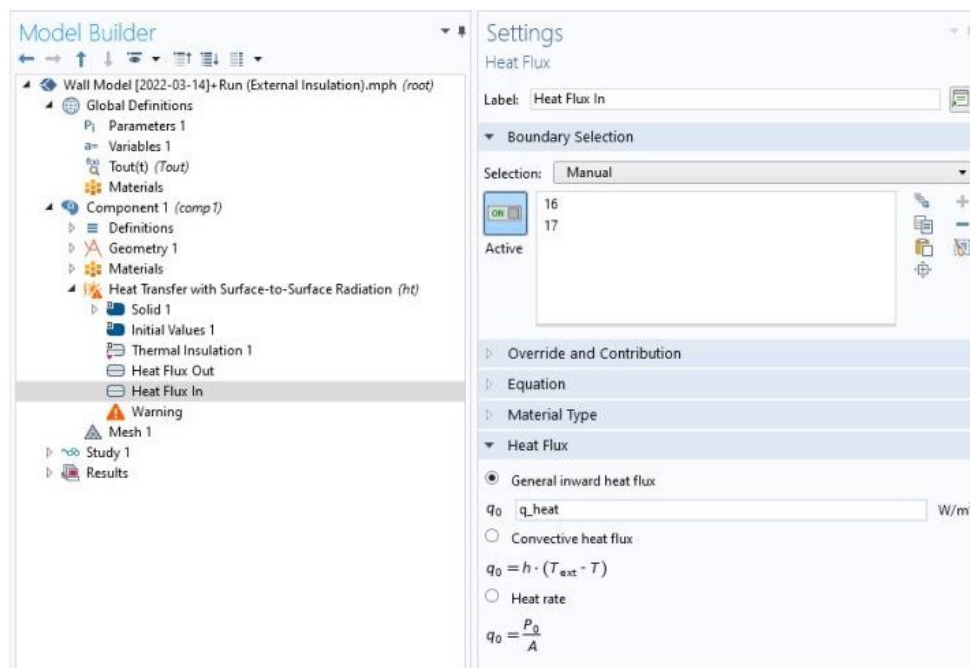
T_{ext} : η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας (K)

Ελήφθησαν συντελεστής θερμικής μετάβασης για την εξωτερική επιφάνεια $h = 25 W/(m^2/K)$ για χειμερινές συνθήκες, ενώ για τη θερμοκρασία T_{ext} η εξίσωση (4.1) που αποδίδει την τιμή T_{out} .

Στην εσωτερική πλευρά επιβάλλεται συνεχόμενη ροή θερμότητας q_{heat} , σταθερής ισχύος, που μεταβάλλεται παραμετρικά και περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 4.4.



Εικόνα 4- 11: Ορισμός των τιμών (h) και (T_{ext}) για τη μοντελοποίηση της ροής θερμότητας με συναγωγή του εξωτερικού περιβάλλοντος



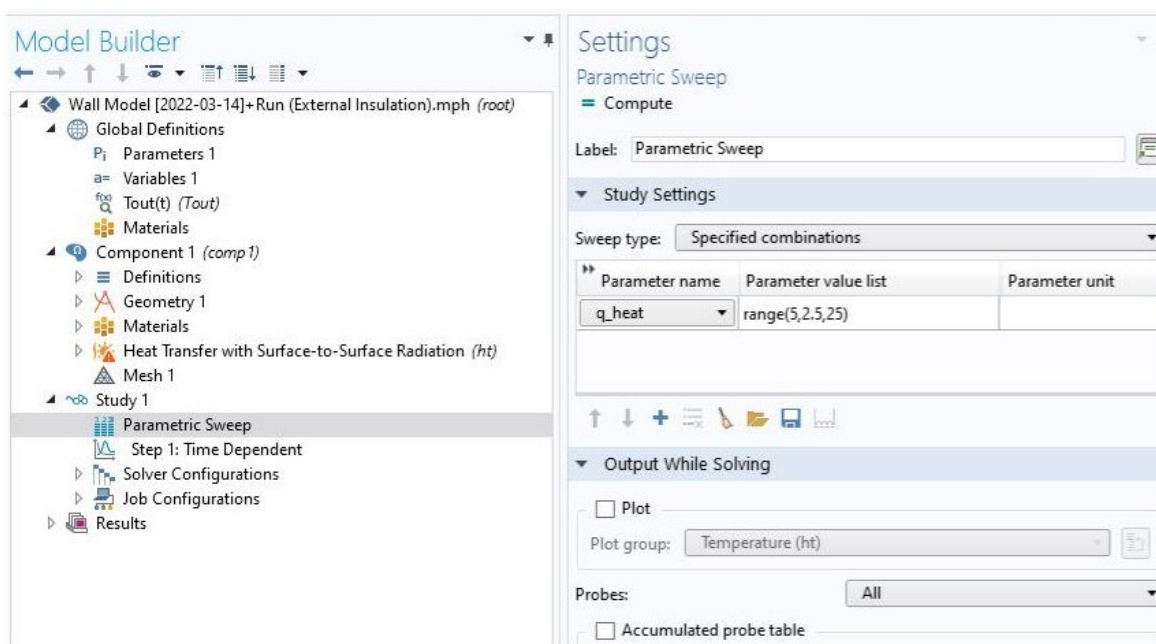
Εικόνα 4- 12: Ορισμός της τιμής σταθερής ροής θερμότητας q_{heat} του εσωτερικού περιβάλλοντος

4.5.7 Μελέτες και επιλύσεις (Studies and Solvers)

4.5.7.1 Παραμετρική Σάρωση (Parametric Sweep)

Στην εσωτερική πλευρά επιβάλλεται συνεχόμενη ροή θερμότητας q_{heat} , σταθερής ισχύος, η οποία μεταβάλλεται παραμετρικά. Αναλυτικότερα, στην 1^η φάση το q_{heat} , παίρνει τις τιμές από 5.0 W/m² έως 25.0 W/m² με βήμα 2.5 W/m² (9 τιμές).

Στη δεύτερη φάση της ανάλυσης, επιβάλλεται ροή θερμότητας q_{heat} , για χρονικό διάστημα ώστε το σύστημα να ισορροπήσει στην ασφαλή θερμοκρασία (safe temperature) των 15°C. Την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή, επιβάλλεται ροή θερμότητας μεγαλύτερης ισχύος, για χρονικό διάστημα 2 ημερών, η οποία μεταβάλλεται παραμετρικά και παίρνει τιμές από 5.0 W/m² έως 60.0 W/m² με βήμα 5.0 W/m² (10 τιμές), ώστε να επιτευχθούν οι θερμοκρασίες στόχευσης 18°C, 20°C, 22°C.

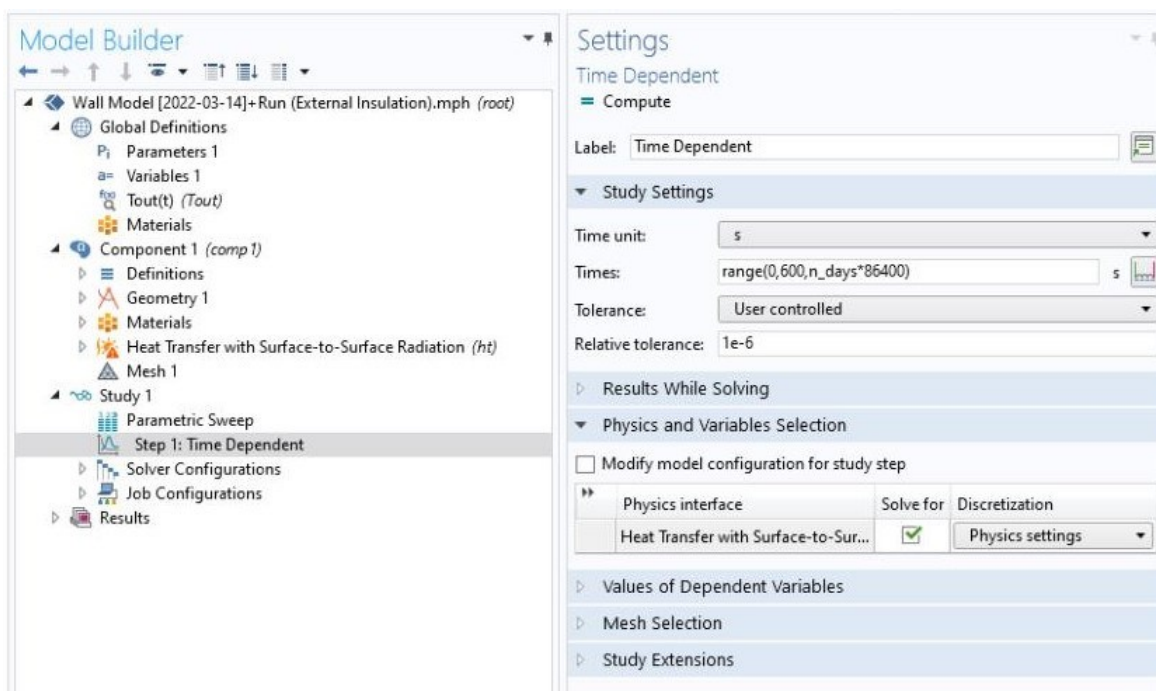


Εικόνα 4- 13: Ορισμός παραμέτρου q_{heat} του εσωτερικού περιβάλλοντος

4.5.7.2 Χρονικά Μεταβαλλόμενες Συνθήκες (Time Dependent)

Οι μελετώμενες προσομοιώσεις έγιναν για χρονικό διάστημα από $t=0$ έως $t=n$ ημέρες με χρονικό βήμα $\Delta t=600$ sec (10 min). Το μοντέλο μελετάται σε χρονική διάρκεια ώστε να εξαλειφθεί η επιρροή των αρχικών συνθηκών και να έρθει σε ισορροπία. Κατόπιν θα αντληθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Η τιμή σχετικής ανοχής (Relative tolerance) είναι η σχετική ανοχή σφάλματος που χρησιμοποιείται στην επίλυση. Κατά τη διάρκεια της επίλυσης ελέγχεται το μέγεθος του βήματος έτσι ώστε να ικανοποιείται το εκτιμώμενο σφάλμα σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης. Στις χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες, στην ενότητα Απόλυτη ανοχή, οι απόλυτες και οι σχετικές ανοχές ελέγχουν το σφάλμα σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual) Η τιμή σχετικής ανοχής στη μελέτη έχει οριστεί 10^{-6} .



Εικόνα 4- 14: Ορισμός χρόνου έναρξης, χρονικού βήματος, χρόνου λήξης και σχετικής ανοχής στο μοντέλο.

4.6 Μεθοδολογία διερεύνησης

Η διεξαγωγή της παρούσας μελέτης διακρίνεται σε δύο φάσεις:

α) στην πρώτη φάση, αναζητείται η τιμή της ροής θερμότητας, η οποία οδηγεί, κατά περίπτωση, σε ισορροπία με μέσο όρο εσωτερικής θερμοκρασίας 15°C.

Πιο αναλυτικά, μελετήθηκε η επιρροή της κατασκευαστικής διάταξης (IM, MI), του πάχους θερμομόνωσης (5cm, 10cm), των εξωτερικών μεταβαλλόμενων συνθηκών καθώς και της επιβαλλόμενης ροής θερμότητας στο εσωτερικό περιβάλλον των δομικών στοιχείων, στον υπολογισμό των τιμών της ημερήσιας διακύμανσης θερμοκρασίας σε σημείο που βρίσκεται στην εσωτερική παρειά του μοντέλου.

Στις διατομές επιβλήθηκε σταθερή ροή θερμότητας q_{heat} που μεταβάλλεται παραμετρικά, όπως αναλύθηκε στο 4.5.7.1. και μελετήθηκαν δύο διαφορετικές αρχικές θερμοκρασίες (initial value). Κατόπιν διερεύνησης στη διατομή IM, που είναι κι η δυσμενέστερη, προέκυψε, ότι το μοντέλο χρειάστηκε να μελετηθεί για χρονικό διάστημα διάρκειας: i) 70 ημερών για πάχος μόνωσης $d_i=5\text{cm}$ και ii) 120 ημερών για πάχος μόνωσης $d_i=10\text{cm}$, προκειμένου να υπάρξει ο απαραίτητος χρόνος ώστε να επιτευχθεί η ισορροπία και να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες σφαλμάτων λόγω αρχικών συνθηκών. Θεωρήθηκε ότι

εξασφαλίζεται ισορροπία όταν οι μέγιστες και ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες, εμφανίζουν αντίστοιχα, ημερήσια απόκλιση της τάξεως του 0.005°C .

Η εξέταση των πρώτων αναλύσεων των διατομών, αποκάλυψε τις τιμές του q_{heat} που οδηγούν σε θερμοκρασίες ισορροπίας που προσεγγίζουν τους 15°C . Λαμβάνοντας τις δύο πιο κοντινές συνεχόμενες τιμές, ανάμεσα στις οποίες βρίσκεται το επιθυμητό q_{heat} , εξετάσαμε αρχικά τη διατομή MI, με μικρό βήμα θερμικής ροής, η οποία προσφέρει ταχύτερο επιτελεστικό χρόνο θερμοκρασιακής ισορροπίας, και με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής προβλέπουμε με σχετική ακρίβεια την επιθυμητή τιμή. Με άξονα τον προσδιορισμό αυτό, σε δεύτερο χρόνο διενεργήθηκαν επί πλέον ακριβέστερες παραμετρικές αναλύσεις και στη δεύτερη διατομή, προκειμένου να επιβεβαιωθούν οι τιμές. β) στη δεύτερη φάση της ανάλυσης, αναζητείται το εύρος των τιμών του q_{heat} , που με το χαμηλότερο επιτελεστικό χρόνο θα οδηγήσει στις θερμοκρασίες στόχευσης.

Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επιρροή της κατασκευαστικής διάταξης (IM, MI), του πάχους θερμομόνωσης (5cm, 10cm), των εξωτερικών μεταβαλλόμενων συνθηκών καθώς και της επιβαλλόμενης ροής θερμότητας στο εσωτερικό περιβάλλον των δομικών στοιχείων, στον υπολογισμό του χρόνου επίτευξης των θερμοκρασιών στόχευσης 18°C , 20°C , 22°C , που κινούνται στο εύρος της θερμικής άνεσης.

Ειδικότερα, πραγματοποιούνται ξανά οι υπολογισμοί στις διατομές, για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος, με τη ροή θερμότητας q_{heat} , η οποία προέκυψε από το προηγούμενο βήμα, για χρονικό διάστημα ώστε το σύστημα να ισορροπήσει στην ασφαλή θερμοκρασία (safe temperature) των 15°C . Κατόπιν, επιβάλλεται ροή θερμότητας μεγαλύτερης ισχύος, για χρονικό διάστημα 2 ημερών, η οποία μεταβάλλεται παραμετρικά, ενώ το εύρος των τιμών της εξαρτάται από τον τύπο της διατομής και την τιμή q_{heat} που οδήγησε στους 15°C .

Συνολικά πρόκειται να αναλυθούν οι εξής διαφορετικές περιπτώσεις:

Φάση	Είδος διατομής	Πάχος θερμομόνωσης	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	q_{heat}	Θερμοκρασία στόχευσης
1	2	2	2	9	-
2	2	2	2	10	3

Φάση 1: $2 \times 2 \times 2 \times 9 = 72$ περιπτώσεις

Φάση 2: $2 \times 2 \times 2 \times 10 \times 3 = 240$ περιπτώσεις

Συνολικά: 312 περιπτώσεις

5. Θερμική ανάλυση

5.1 Διάρθρωση αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα COMSOL Multiphysics όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα. Τα αποτελέσματα αφορούν στη θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς, που προκύπτει από: την επιρροή της κατασκευαστικής διάταξης (IM, MI), το πάχος θερμομόνωσης (5cm, 10cm), τις εξωτερικά μεταβαλλόμενες συνθήκες καθώς και την επιβαλλόμενη ροή θερμότητας στο εσωτερικό περιβάλλον των δομικών στοιχείων.

Η μελέτη πραγματοποιείται και παρουσιάζεται σε δύο (2) φάσεις και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με κατάλληλα γραφήματα, για την καλύτερη κατανόηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Η ενότητα 5.2 αφορά στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων της 1^{ης} φάσης της μελέτης. Η υποενότητα 5.2.1. αφορά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ & $T_{initial} = 0^\circ\text{C}$. Οι παράγραφοι 5.2.1.1. και 5.2.1.2. αναφέρονται στις διατομές IM & MI αντίστοιχα και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης ($di=5\text{cm}$ & $di=10\text{cm}$), ενώ οι παράγραφοι 5.2.1.3 & 5.2.1.4. αναφέρονται στη σύγκριση διατομών IM-MI με $di=5\text{cm}$ και IM-MI με $di=10\text{cm}$, αντίστοιχα. Η παράγραφος 5.2.1.5. παρουσιάζει την επίτευξη επιθυμητής θερμοκρασίας ισορροπίας 15°C , για διατομές IM-MI και $di=5\text{cm}$, $di=10\text{cm}$.

Η υποενότητα 5.2.2. αφορά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ & $T_{initial} = 10^\circ\text{C}$. Οι παράγραφοι 5.2.2.1. και 5.2.2.2. αναφέρονται στις διατομές IM & MI αντίστοιχα και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης ($di=5\text{cm}$ & $di=10\text{cm}$), ενώ οι παράγραφοι 5.2.2.3 & 5.2.2.4. αναφέρονται στη σύγκριση διατομών IM-MI με $di=5\text{cm}$ και IM-MI με $di=10\text{cm}$, αντίστοιχα. Η παράγραφος 5.2.2.5. παρουσιάζει την επίτευξη επιθυμητής θερμοκρασίας ισορροπίας 15°C , για διατομές IM-MI και $di=5\text{cm}$, $di=10\text{cm}$.

Η ενότητα 5.3 αφορά στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων της 2^{ης} φάσης της μελέτης. Η υποενότητα 5.3.1. αφορά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ & $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$. Οι παράγραφοι 5.3.1.1. και 5.3.1.2. αναφέρονται στις διατομές IM & MI αντίστοιχα και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης ($di=5\text{cm}$ & $di=10\text{cm}$), ενώ οι παράγραφοι 5.3.1.3 & 5.3.1.4. αναφέρονται στη σύγκριση διατομών IM-MI με $di=5\text{cm}$ και IM-MI με $di=10\text{cm}$, αντίστοιχα. Οι παράγραφοι 5.3.1.5. και 5.3.1.6. παρουσιάζουν την επιτελεστική

θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους για διατομές IM & MI αντίστοιχα και για διατομές $d_i=5\text{cm}$, $d_i=10\text{cm}$.

Η υποενότητα 5.3.2. αφορά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ & $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$. Οι παράγραφοι 5.3.2.1. και 5.3.2.2. αναφέρονται στις διατομές IM & MI αντίστοιχα και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης ($d_i=5\text{cm}$ & $d_i=10\text{cm}$), ενώ οι παράγραφοι 5.3.2.3 & 5.3.2.4. αναφέρονται στη σύγκριση διατομών IM-MI με $d_i=5\text{cm}$ και IM-MI με $d_i=10\text{cm}$, αντίστοιχα. Οι παράγραφοι 5.3.2.5. και 5.3.2.6. παρουσιάζουν την επιτελεστική θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους για διατομές IM & MI αντίστοιχα και για διατομές $d_i=5\text{cm}$, $d_i=10\text{cm}$.

5.2 Φάση 1 (1st Stage)

Στην πρώτη φάση της ανάλυσης, λαμβάνουμε τις τιμές της ημερήσιας διακύμανσης των θερμοκρασιών σε σημείο που βρίσκεται στην εσωτερική παρειά του μοντέλου, συναρτήσει του χρόνου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} που μεταβάλλεται παραμετρικά και παίρνει τιμές από 5.0 W/m^2 έως 25.0 W/m^2 με βήμα 2.5 W/m^2 . Κατόπιν διερεύνησης, προέκυψε, ότι το μοντέλο χρειάστηκε να διερευνηθεί για χρονικό διάστημα διάρκειας: α) 70 ημερών για πάχος μόνωσης $d_i=5\text{cm}$ και β) 120 ημερών για πάχος μόνωσης $d_i=10\text{cm}$, προκειμένου να υπάρξει ο απαραίτητος χρόνος ώστε να επιτευχθεί η ισορροπία και να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες σφαλμάτων λόγω αρχικών συνθηκών.

Τα αποτελέσματα αφορούν σε δύο διαφορετικές θερμοκρασιακές φορτίσεις εξωτερικού περιβάλλοντος, $T_{out}=0 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{out}=10 \pm 5^\circ\text{C}$, σε δύο διαφορετικές διατομές όπως αναφέρθηκαν ήδη αναλυτικά και για δύο πάχη θερμομόνωσης **5cm** και **10cm**.

5.2.1 Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial} = 0^\circ\text{C}$

5.2.1.1 Διατομή IM

Στο σχήμα 5-1 απεικονίζεται το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσει του χρόνου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 0^\circ\text{C}$, για διατομή IM και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης.

Στο σχήμα 5-1 α) απεικονίζονται τα ημιτονοειδή διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i=5\text{cm}$.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας ισορροπίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$	$T_{in,min}$
5.0 W/m ²	7.239 °C	7.073 °C
7.5 W/m ²	10.776 °C	10.610 °C
10.0 W/m ²	14.290 °C	14.124 °C
12.5 W/m ²	17.780 °C	17.614 °C
15.0 W/m ²	21.247 °C	21.081 °C
17.5 W/m ²	24.691 °C	24.585 °C
20.0 W/m ²	28.111 °C	27.945 °C
22.5 W/m ²	31.507 °C	31.342 °C
25.0 W/m ²	34.880 °C	34.715 °C

Στο σχήμα 5-1 β) απεικονίζονται τα ημιτονοειδή διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i=10\text{cm}$.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας ισορροπίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$	$T_{in,min}$
5.0 W/m ²	13.302 °C	13.218 °C
7.5 W/m ²	19.784 °C	19.700 °C
10.0 W/m ²	26.172 °C	26.088 °C
12.5 W/m ²	32.465 °C	32.381 °C
15.0 W/m ²	38.667 °C	38.583 °C
17.5 W/m ²	44.781 °C	44.698 °C
20.0 W/m ²	50.801 °C	50.718 °C
22.5 W/m ²	56.729 °C	56.640 °C
25.0 W/m ²	62.568 °C	62.485 °C

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-1 α), β), γ) και δ) παρατηρούνται τα εξής:

- α) το σύστημα της διατομής με $d_i=5\text{cm}$ επέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας κατά την 69^η ημέρα για όλες τις τιμές που λαμβάνει το q_{heat} , ενώ αντίστοιχα για $d_i=10\text{cm}$ την 120^η ημέρα.
- β) το πλάτος κύματος του ημιτονοειδούς διαγράμματος στην κατάσταση ισορροπίας, που αντιπροσωπεύει τη διαφορά θερμοκρασίας ισορροπίας μεταξύ $T_{in,max}$ και $T_{in,min}$, είναι κοινό

για όλες της καμπύλες που αντιστοιχούν στην ίδια διατομή, ανεξάρτητα από την τιμή q_{heat} που επιβάλλεται. Είναι δε αντιστρόφως ανάλογο του πάχους θερμομόνωσης και παίρνει τιμές της τάξεως του : 0.17 για $d_i=5\text{cm}$, 0.085 για $d_i=10\text{cm}$

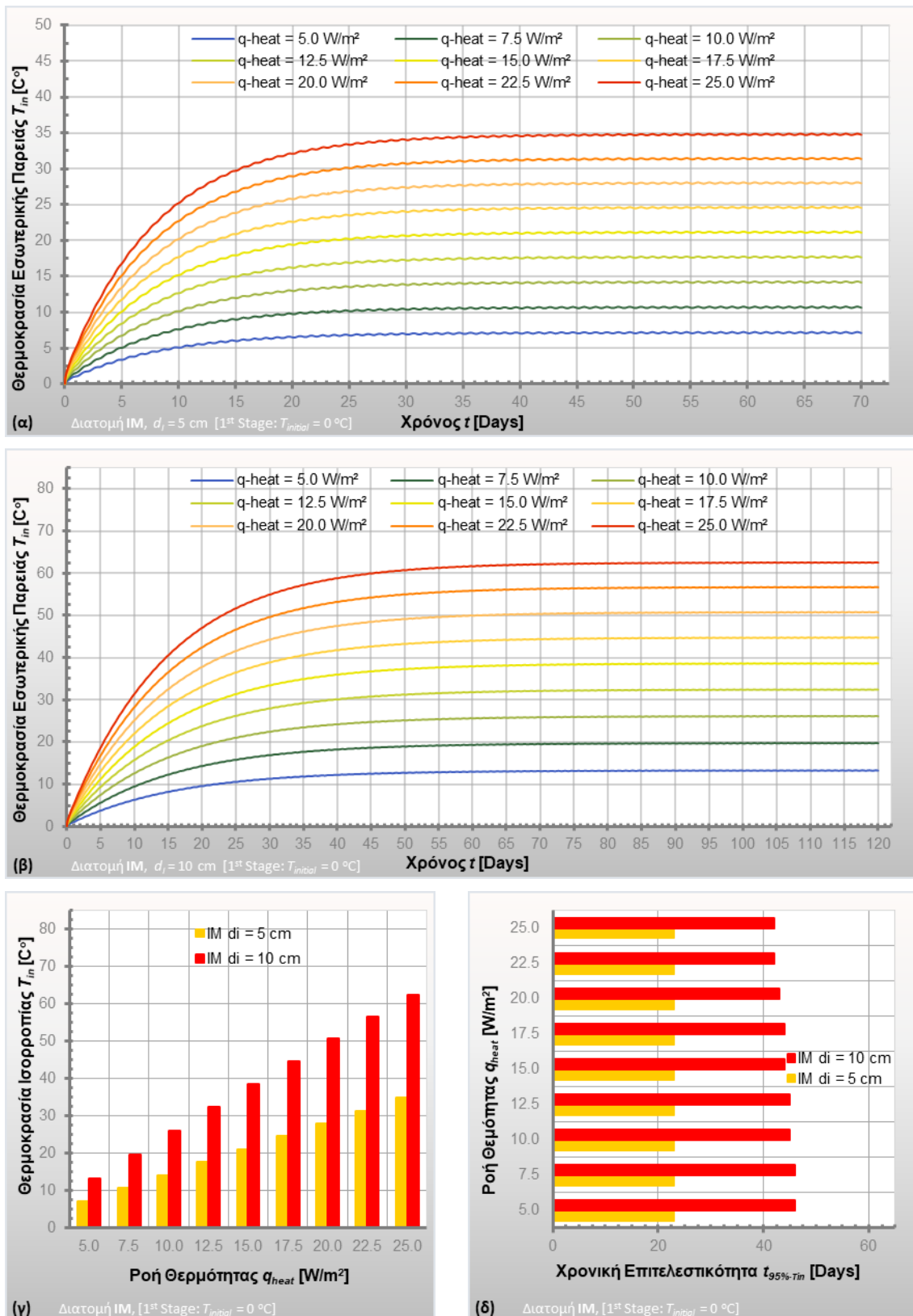
γ) η τιμή της θερμοκρασίας ισορροπίας λαμβάνει υψηλότερες τιμές για τη διατομή $d_i=10\text{cm}$ και κυμαίνεται σε θερμοκρασίες της τάξεως $12^\circ\text{C} - 62^\circ\text{C}$, σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν για $d_i=5\text{cm}$, της τάξεως $8^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}$, με εφαρμογή των αντιστοιχών q_{heat}

δ) παρατηρείται γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας ισορροπίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ισορροπίας, παίρνει την τιμή της τάξεως του 1.35 για $d_i=5\text{cm}$, και 2.45 για $d_i=10\text{cm}$

ε) ο επιτελεστικός χρόνος του 95% των ανωτέρω θερμοκρασιών, είναι πρακτικά κοινός για όλα τα q_{heat} που εφαρμόζονται στην ίδια διατομή και παίρνει τιμές: ~22 ημέρες για $d_i=5\text{cm}$, ~44 ημέρες για $d_i=10\text{cm}$.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i=5\text{cm}$ σε $d_i=10\text{cm}$ για διατομή IM οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασίας ισορροπίας
- υποδιπλασιασμό του πλάτους κύματος της ημιτονοειδούς διακύμανσης της θερμοκρασίας ισορροπίας. Η σχέση πλάτους κύματος – πάχους θερμομόνωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη.
- αύξηση της θερμοκρασίας ισορροπίας του συστήματος
- αύξηση του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας ισορροπίας
- αύξηση του επιτελεστικού χρόνου του 95% της θερμοκρασίας ισορροπίας, ανάλογη με την αύξηση του πάχους της μόνωσης



Σχήμα 5-1: Θερμοκρασία εσωτ. παρείας T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του χρόνου, για διάφορες τιμές q_{heat} για: α) $d_i=5$ cm και β) για $d_i=10$ cm. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} .

5.2.1.2 Διατομή ΜΙ

Στο σχήμα 5-2 απεικονίζεται το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρείας T_{in} συναρτήσει του χρόνου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 0^\circ\text{C}$, για διατομή ΜΙ και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης.

Στο σχήμα 5-2 α) απεικονίζονται τα ημιτονοειδή διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 5\text{cm}$.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας ισορροπίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$	$T_{in,min}$
5.0 W/m ²	7.658 °C	6.603 °C
7.5 W/m ²	11.177 °C	10.122 °C
10.0 W/m ²	14.666 °C	13.611 °C
12.5 W/m ²	18.123 °C	17.068 °C
15.0 W/m ²	21.551 °C	20.496 °C
17.5 W/m ²	24.948 °C	23.893 °C
20.0 W/m ²	28.313 °C	27.258 °C
22.5 W/m ²	31.648 °C	30.593 °C
25.0 W/m ²	34.954 °C	33.899 °C

Στο σχήμα 5-2 β) απεικονίζονται τα ημιτονοειδή διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 10\text{cm}$.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας ισορροπίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$	$T_{in,min}$
5.0 W/m ²	13.492 °C	12.953 °C
7.5 W/m ²	19.941 °C	19.401 °C
10.0 W/m ²	26.280 °C	25.740 °C
12.5 W/m ²	32.510 °C	31.970 °C
15.0 W/m ²	38.637 °C	38.097 °C
17.5 W/m ²	44.660 °C	44.120 °C
20.0 W/m ²	50.574 °C	50.034 °C
22.5 W/m ²	56.384 °C	55.844 °C

25.0 W/m²

62.096 °C

61.556°C

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-2 α), β), γ) και δ) παρατηρούνται τα εξής:

α) το σύστημα της διατομής με $d_i=5\text{cm}$ επέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας κατά την 3^η ημέρα για όλες τις τιμές που λαμβάνει το q_{heat} , ενώ αντίστοιχα για $d_i=10\text{cm}$ την 9^η ημέρα.

β) το πλάτος κύματος του ημιτονοειδούς διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη διαφορά θερμοκρασίας ισορροπίας μεταξύ $T_{in,max}$ και $T_{in,min}$, είναι κοινό για όλες της καμπύλες που αντιστοιχούν στην ίδια διατομή, ανεξάρτητα από την τιμή q_{heat} που επιβάλλεται. Είναι δε αντιστρόφως ανάλογο του πάχους θερμομόνωσης και παίρνει τιμές της τάξεως του : 1.10 για $d_i=5\text{cm}$, και 0.55 για $d_i=10\text{cm}$

γ) η τιμή της θερμοκρασίας ισορροπίας λαμβάνει υψηλότερες τιμές για τη διατομή $d_i=10\text{cm}$ και κυμαίνεται σε θερμοκρασίες της τάξεως 12 °C - 62 °C, σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν για $d_i=5\text{cm}$, της τάξεως 8 °C - 35 °C, με εφαρμογή των αντιστοίχων q_{heat}

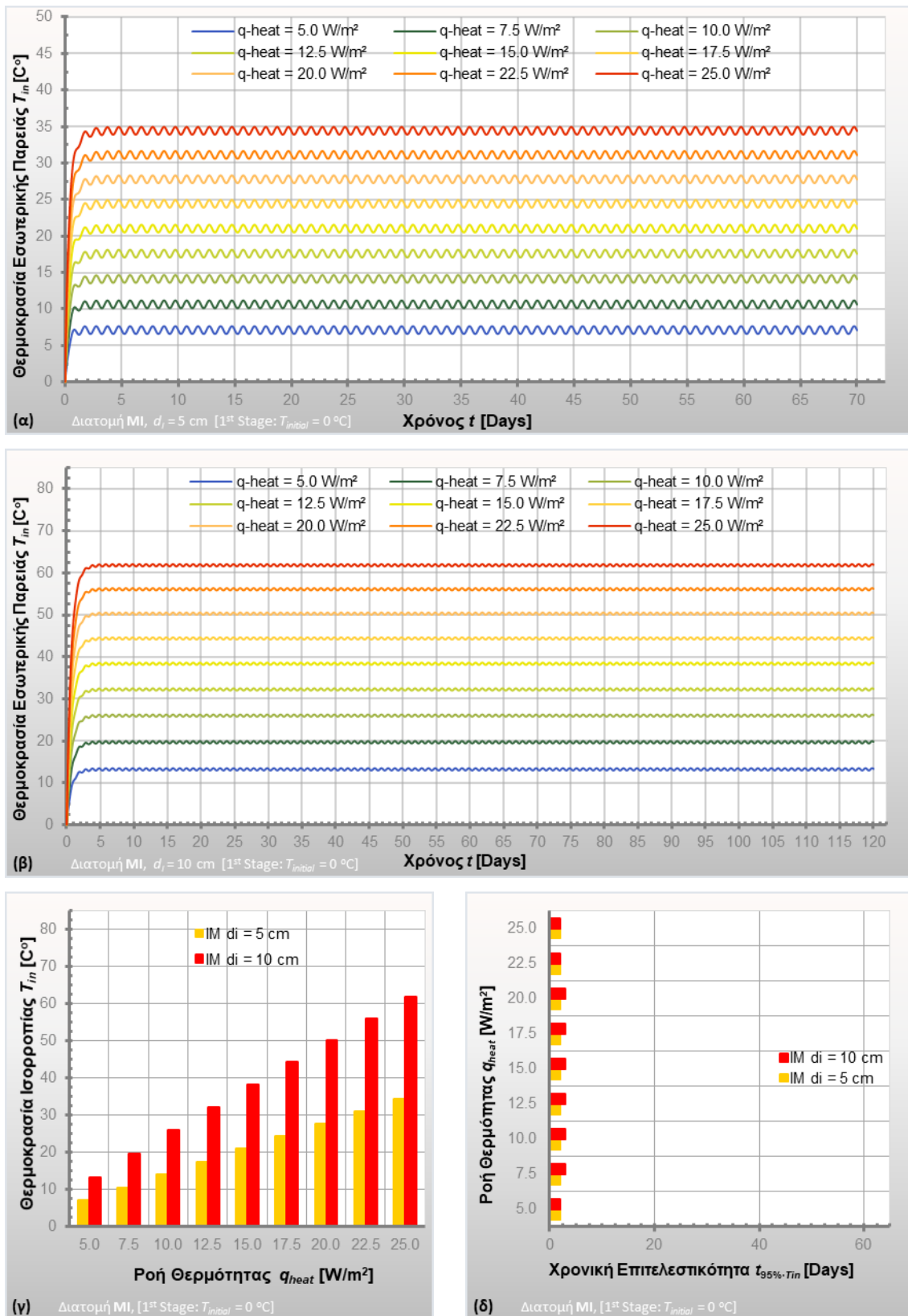
δ) παρατηρείται γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας ισορροπίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ισορροπίας, παίρνει την τιμή της τάξεως του 1.35 για $d_i=5\text{cm}$, και 2.45 για $d_i=10\text{cm}$ και είναι οι ίδιοι με αυτούς της διατομής IM που μελετήσαμε στην παράγραφο 5.2.1.1.

ε) ο επιτελεστικός χρόνος του 95% των ανωτέρω θερμοκρασιών είναι πρακτικά κοινός για όλα τα q_{heat} που εφαρμόζονται στην ίδια διατομή και παίρνει τιμές: ~1,5 ημέρες για $d_i=5\text{cm}$, ~3 ημέρες για $d_i=10\text{cm}$.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i=5\text{cm}$ σε $d_i=10\text{cm}$ για διατομή MI οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασίας ισορροπίας
- υποδιπλασιασμό του πλάτους κύματος της ημιτονοειδούς διακύμανσης της θερμοκρασίας ισορροπίας. Η σχέση πλάτους κύματος – πάχους θερμομόνωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη.
- αύξηση της θερμοκρασίας ισορροπίας του συστήματος
- αύξηση του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας ισορροπίας
- αύξηση του επιτελεστικού χρόνου του 95% της θερμοκρασίας ισορροπίας, ανάλογη με την αύξηση του πάχους της μόνωσης

Παρατηρούμε ότι τα φαινόμενα είναι αντίστοιχα με αυτά της διατομής IM.



Σχήμα 5-2: Θερμοκρασία εσωτ. παρείας T_{in} , διατομής MI, συναρτήσει του χρόνου, για διάφορες τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} .

5.2.1.3 Διατομές IM-MI, $d_i=5\text{cm}$

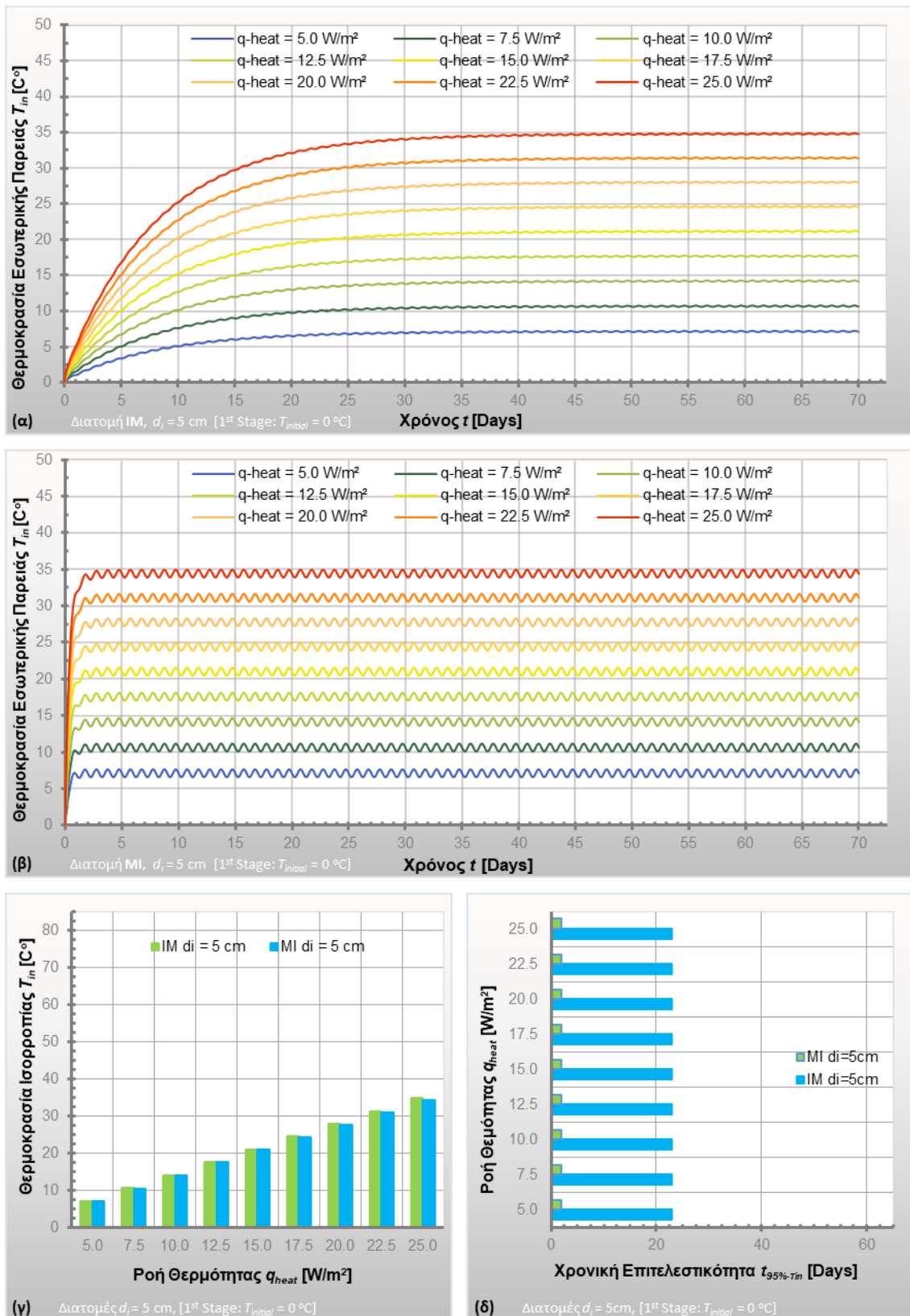
Στο σχήμα 5-3 απεικονίζονται συγκριτικά το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 0^\circ\text{C}$, για διατομές IM και MI για κοινό πάχος θερμομόνωσης $d_i=5\text{cm}$.

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-3 α), β), γ) και δ) συνάγονται τα εξής:

- α) το σύστημα της διατομής IM επέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας την 69^η ημέρα για όλες τις τιμές που λαμβάνει το q_{heat} , ενώ αντίστοιχα η διατομή MI την 3^η ημέρα.
- β) το πλάτος κύματος του ημιτονοειδούς διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ $T_{in,max}$ και $T_{in,min}$, παίρνει τιμές της τάξεως του: 0.17 για IM και 1.10 για MI
- γ) οι θερμοκρασίες ισορροπίας είναι πρακτικά ίδιες και για τις δύο διατομές
- δ) ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ισορροπίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , είναι κοινός και στις δύο περιπτώσεις, της τάξεως του 1.35
- ε) ο επιτελεστικός χρόνος του 95% των ανωτέρω θερμοκρασιών ενώ για τη διατομή IM είναι 22 ημέρες, για την MI είναι 1,5 ημέρες

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αλλαγή στη θέση της θερμομόνωσης από IM σε MI για πάχος θερμομόνωσης $d_i=5\text{cm}$ οδηγεί σε:

- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασίας ισορροπίας
- σημαντική αύξηση του πλάτους κύματος της ημιτονοειδούς διακύμανσης της θερμοκρασίας ισορροπίας
- ίδιες θερμοκρασίες ισορροπίας του συστήματος
- ίδιο ρυθμό ανόδου θερμοκρασίας ισορροπίας
- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου του 95% της θερμοκρασίας ισορροπίας



Σχήμα 5-3: Θερμοκρασία εσωτ. παρείας T_{in} , συναρτήσεως του χρόνου, για διάφορες τιμές q_{heat} , $d_i=5$ cm, για:

α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσεως του q_{heat} , $d_i=5$ cm για IM & MI, δ)

Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσεως του q_{heat} , $d_i=5$ cm για IM & MI

5.2.1.4 Διατομές IM-MI, $d_i=10\text{cm}$

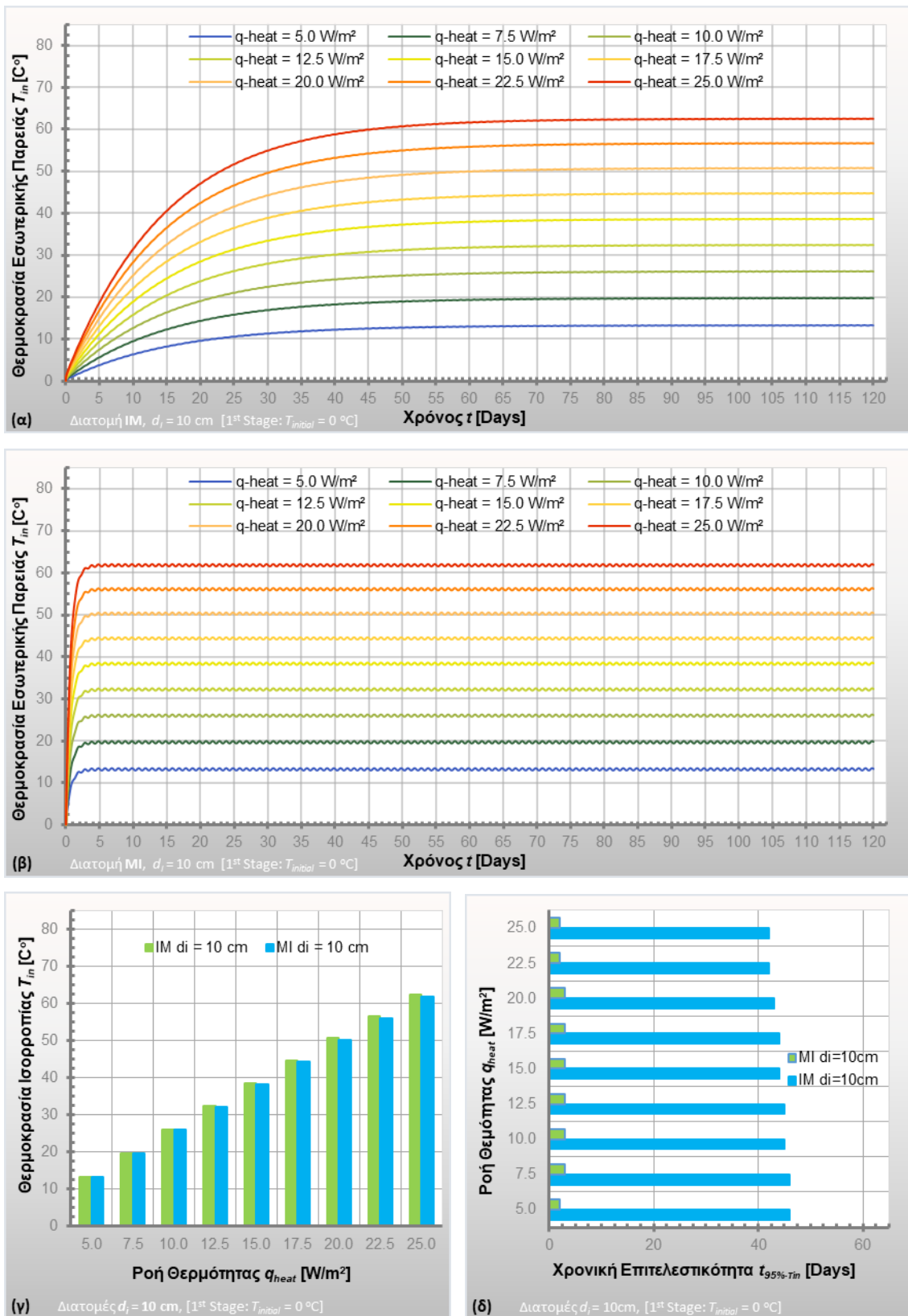
Στο σχήμα 5-4 απεικονίζονται συγκριτικά το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσεως του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0\pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 0^\circ\text{C}$, για διατομές IM και MI για κοινό πάχος θερμομόνωσης $d_i=10\text{cm}$.

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-4 α), β), γ) και δ) συνάγονται τα εξής:

- α) το σύστημα της διατομής IM επέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας την 120^η ημέρα για όλες τις τιμές που λαμβάνει το q_{heat} , ενώ αντίστοιχα η διατομή MI την 9^η ημέρα.
- β) το πλάτος κύματος του ημιτονοειδούς διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ $T_{in,max}$ και $T_{in,min}$, παίρνει τιμές: 0.085 για IM και 0.55 για MI
- γ) οι θερμοκρασίες ισορροπίας είναι πρακτικά ίδιες και για τις δύο διατομές
- δ) ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ισορροπίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , είναι κοινός και στις δύο περιπτώσεις, της τάξεως του 2.45
- ε) ο επιτελεστικός χρόνος του 95% των ανωτέρω θερμοκρασιών ενώ για τη διατομή IM είναι 44 ημέρες, για την MI είναι 3 ημέρες

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αλλαγή στη θέση της θερμομόνωσης από IM σε MI για πάχος θερμομόνωσης $d_i=10\text{cm}$ οδηγεί σε:

- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασίας ισορροπίας
- σημαντική αύξηση του πλάτους κύματος της ημιτονοειδούς διακύμανσης της θερμοκρασίας ισορροπίας
- ίδιες θερμοκρασίες ισορροπίας του συστήματος
- ίδιο ρυθμό ανόδου θερμοκρασίας ισορροπίας
- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου του 95% της θερμοκρασίας ισορροπίας

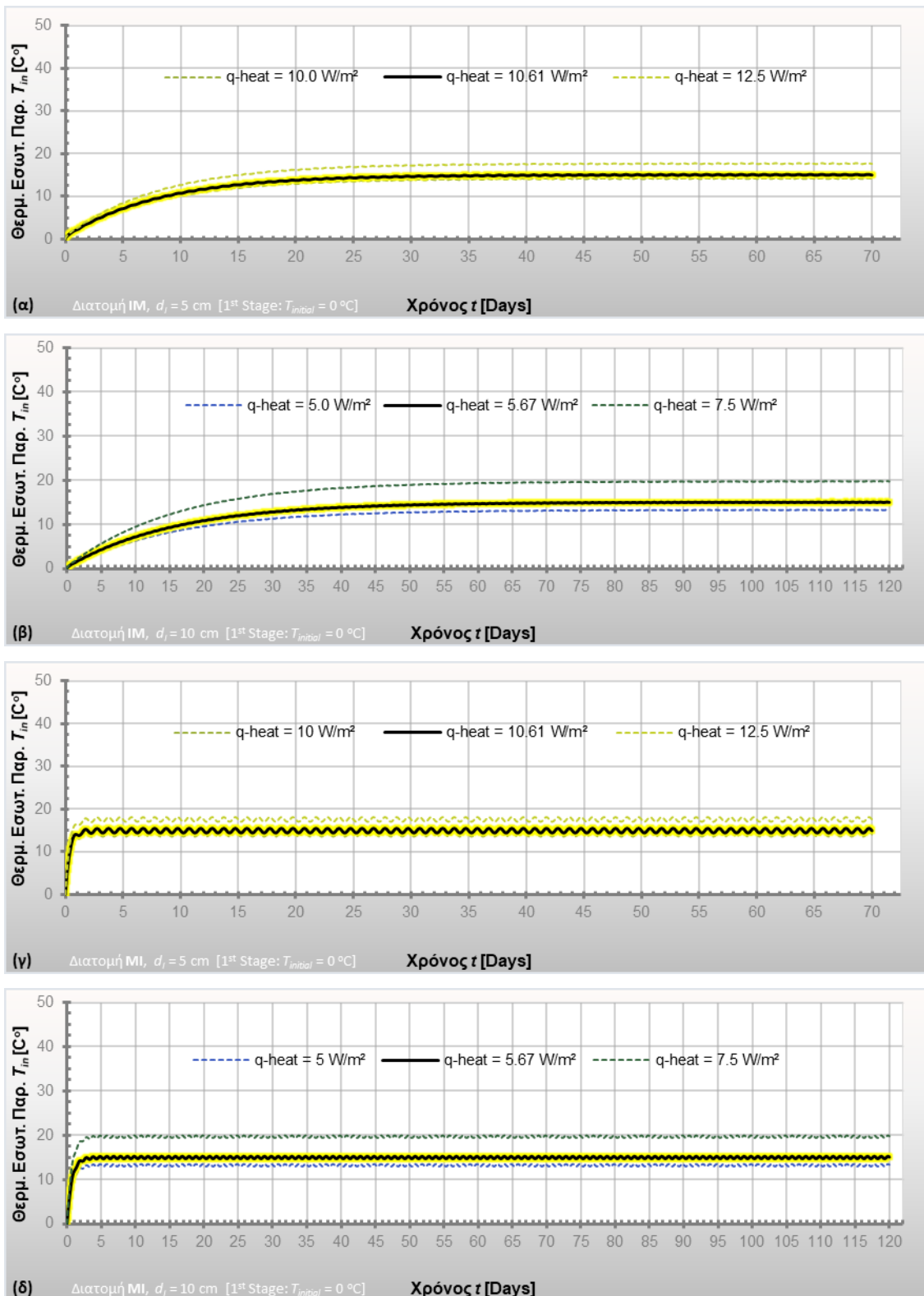


Σχήμα 5-4: Θερμοκρασία εσωτ. παρείας T_{in} , συναρτήσει του χρόνου, για διάφορες τιμές q_{heat} , $d_i=10$ cm, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=10$ cm για IM & MI, δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=10$ cm για IM & MI

5.2.1.5 Επίτευξη επιθυμητής θερμοκρασίας ισορροπίας 15°C

Με βάση τις πολυάριθμες αναλύσεις που προηγήθηκαν, έχουμε τη δυνατότητα να εντοπίσουμε τις τιμές της ροής θερμότητας που οδηγούν στη θερμοκρασία ισορροπίας των 15°C, που είναι και το ζητούμενο της πρώτης φάσης της ανάλυσης. Μπορούμε με σχετική ακρίβεια με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής να προβλέψουμε την τιμή της ροής θερμότητας που θα μας οδηγήσει σε θερμοκρασία ισορροπίας 15°C.

Οι τιμές αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 5-5, στα διαγράμματα α) IM, $d_i=5\text{cm}$, β) IM, $d_i=10\text{cm}$ γ) MI, $d_i=5\text{cm}$ και δ) MI, $d_i=10\text{cm}$ και όπως είναι αναμενόμενο, το q_{heat} είναι ίδιο για τις διατομές με το ίδιο πάχος θερμομόνωσης και παίρνει τιμές 10.61 W/m² για IM & MI $d_i=5\text{cm}$ και 5.67 W/m² για IM & MI $d_i=10\text{cm}$.



Σχήμα 5-5: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσεως του χρόνου, για τις συγκεκριμένες q_{heat} , προς επίτευξη θερμικής ισορροπίας σε μέση θερμοκρασία 15°C α) διατομής IM, για $d_i=5$ cm, β) διατομής IM, για $d_i=10$ cm, γ) διατομής MI, για $d_i=5$ cm, δ) διατομής MI, για $d_i=10$ cm

5.2.2 Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial} = 10^\circ\text{C}$

5.2.2.1 Διατομή IM

Στο σχήμα 5-6 απεικονίζεται το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρείας T_{in} συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 10^\circ\text{C}$, για διατομή IM και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης.

Στο σχήμα 5-6 α) απεικονίζονται τα ημιτονοειδή διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_t = 5\text{cm}$.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας ισορροπίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$	$T_{in,min}$
5.0 W/m ²	17.095 °C	16.926 °C
7.5 W/m ²	20.558 °C	20.389 °C
10.0 W/m ²	23.998 °C	23.829 °C
12.5 W/m ²	27.414 °C	27.245 °C
15.0 W/m ²	30.806 °C	30.637 °C
17.5 W/m ²	34.176 °C	34.007 °C
20.0 W/m ²	37.523 °C	37.354 °C
22.5 W/m ²	40.848 °C	40.680 °C
25.0 W/m ²	44.153 °C	43.984 °C

Στο σχήμα 5-6 β) απεικονίζονται τα ημιτονοειδή διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_t = 10\text{cm}$.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας ισορροπίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$	$T_{in,min}$
5.0 W/m ²	23.003 °C	22.917 °C
7.5 W/m ²	29.333 °C	29.247 °C
10.0 W/m ²	35.571 °C	35.485 °C
12.5 W/m ²	41.720 °C	41.634 °C
15.0 W/m ²	47.778 °C	47.692 °C
17.5 W/m ²	53.742 °C	53.656 °C

20.0 W/m ²	59.615 °C	59.530 °C
22.5 W/m ²	65.405 °C	65.319 °C
25.0 W/m ²	71.113 °C	71.028 °C

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-6 α), β), γ) και δ) παρατηρούνται τα εξής:

α) το σύστημα της διατομής με $d_i=5\text{cm}$ επέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας κατά την 68^η ημέρα για όλες τις τιμές που λαμβάνει το q_{heat} , ενώ αντίστοιχα για $d_i=10\text{cm}$ την 120^η ημέρα.

β) το πλάτος κύματος του ημιτονοειδούς διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη διαφορά θερμοκρασίας ισορροπίας μεταξύ $T_{in,max}$ και $T_{in,min}$, είναι κοινό για όλες της καμπύλες που αντιστοιχούν στην ίδια διατομή, ανεξάρτητα από την τιμή q_{heat} που επιβάλλεται. Είναι δε αντιστρόφως ανάλογο του πάχους θερμομόνωσης και παίρνει τιμές της τάξεως του: 0.17 για $d_i=5\text{cm}$, 0.085 για $d_i=10\text{cm}$

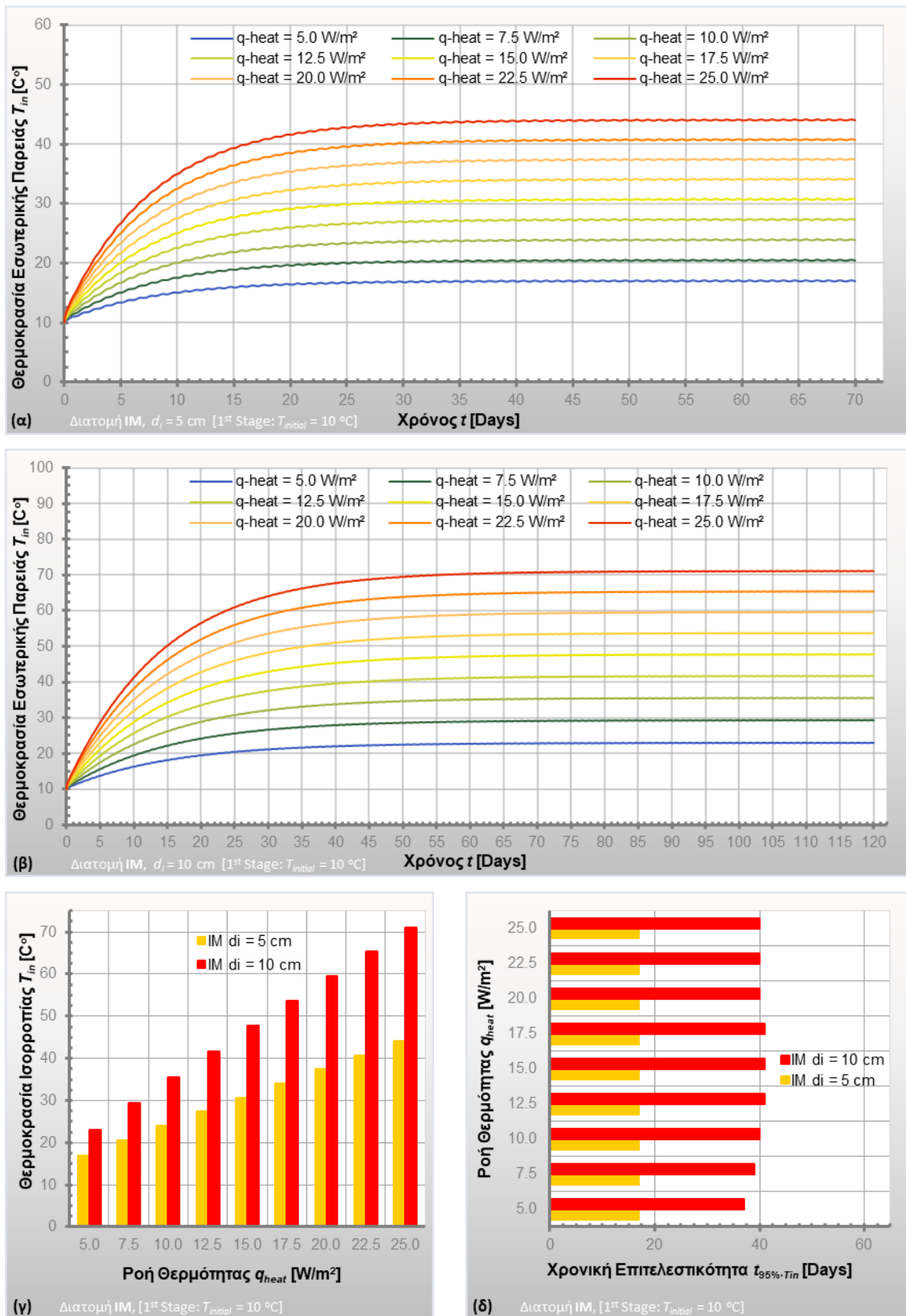
γ) η τιμή της θερμοκρασίας ισορροπίας λαμβάνει υψηλότερες τιμές για τη διατομή $d_i=10\text{cm}$ και κυμαίνεται σε θερμοκρασίες της τάξεως 23 °C - 71 °C, σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν για $d_i=5\text{cm}$ της τάξεως 17 °C – 44 °C, με εφαρμογή των αντιστοίχων q_{heat}

δ) παρατηρείται γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας ισορροπίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ισορροπίας, παίρνει τιμές της τάξεως του 1.35 για $d_i=5\text{cm}$, και 2.45 για $d_i=10\text{cm}$

ε) ο επιτελεστικός χρόνος του 95% των ανωτέρω θερμοκρασιών είναι πρακτικά κοινός για όλα τα q_{heat} που εφαρμόζονται στην ίδια διατομή και παίρνει τιμές: ~17 ημέρες για $d_i=5\text{cm}$, ~40 ημέρες για $d_i=10\text{cm}$.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i=5\text{cm}$ σε $d_i=10\text{cm}$ για διατομή IM οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασίας ισορροπίας
- υποδιπλασιασμό του πλάτους κύματος της ημιτονοειδούς διακύμανσης της θερμοκρασίας ισορροπίας. Η σχέση πλάτους κύματος – πάχους θερμομόνωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη.
- αύξηση της θερμοκρασίας ισορροπίας του συστήματος
- αύξηση του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας
- σημαντική αύξηση του επιτελεστικού χρόνου του 95% της θερμοκρασίας ισορροπίας, ανάλογη με την αύξηση του πάχους της μόνωσης



Σχήμα 5-6: Θερμοκρασία εσωτ. παρείας T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} .

5.2.2.2 Διατομή ΜΙ

Στο σχήμα 5-7 απεικονίζεται το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρείας T_{in} συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 10^\circ\text{C}$, για διατομή ΜΙ και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης.

Στο σχήμα 5-7 α) απεικονίζονται τα ημιτονοειδή διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 5\text{cm}$.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας ισορροπίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$	$T_{in,min}$
5.0 W/m ²	17.518 °C	16.445 °C
7.5 W/m ²	20.962 °C	19.891 °C
10.0 W/m ²	24.376 °C	23.306 °C
12.5 W/m ²	27.758 °C	26.690 °C
15.0 W/m ²	31.110 °C	30.043 °C
17.5 W/m ²	34.433 °C	33.366 °C
20.0 W/m ²	37.726 °C	36.661 °C
22.5 W/m ²	40.992 °C	39.928 °C
25.0 W/m ²	44.227 °C	43.165 °C

Στο σχήμα 5-7 β) απεικονίζονται τα ημιτονοειδή διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 10\text{cm}$.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας ισορροπίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$	$T_{in,min}$
5.0 W/m ²	23.195 °C	22.646 °C
7.5 W/m ²	29.490 °C	28.941 °C
10.0 W/m ²	35.678 °C	35.130 °C
12.5 W/m ²	41.765 °C	41.217 °C
15.0 W/m ²	47.744 °C	47.196 °C
17.5 W/m ²	53.615 °C	53.067 °C
20.0 W/m ²	59.384 °C	58.836 °C
22.5 W/m ²	65.056 °C	64.509 °C

25.0 W/m²

70.638 °C

70.090 °C

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-7 α), β), γ) και δ) παρατηρούνται τα εξής:

α) το σύστημα της διατομής με $d_i=5\text{cm}$ επέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας κατά την 5^η ημέρα για όλες τις τιμές που λαμβάνει το q_{heat} , ενώ αντίστοιχα για $d_i=10\text{cm}$ την 9^η ημέρα.

β) το πλάτος κύματος του ημιτονοειδούς διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη διαφορά θερμοκρασίας ισορροπίας μεταξύ $T_{in,max}$ και $T_{in,min}$, είναι κοινό για όλες της καμπύλες που αντιστοιχούν στην ίδια διατομή, ανεξάρτητα από την τιμή q_{heat} που επιβάλλεται. Είναι δε αντιστρόφως ανάλογο του πάχους θερμομόνωσης και παίρνει τιμές της τάξεως του : 1.10 για $d_i=5\text{cm}$, και 0.55 για $d_i=10\text{cm}$

γ) η τιμή της θερμοκρασίας ισορροπίας λαμβάνει υψηλότερες τιμές για τη διατομή $d_i=10\text{cm}$ και κυμαίνεται σε θερμοκρασίες της τάξεως 23 °C - 70 °C, σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν για $d_i=5\text{cm}$ της τάξεως 17 °C – 44 °C , με εφαρμογή των αντιστοίχων q_{heat} , ομοίως με τη διατομή IM

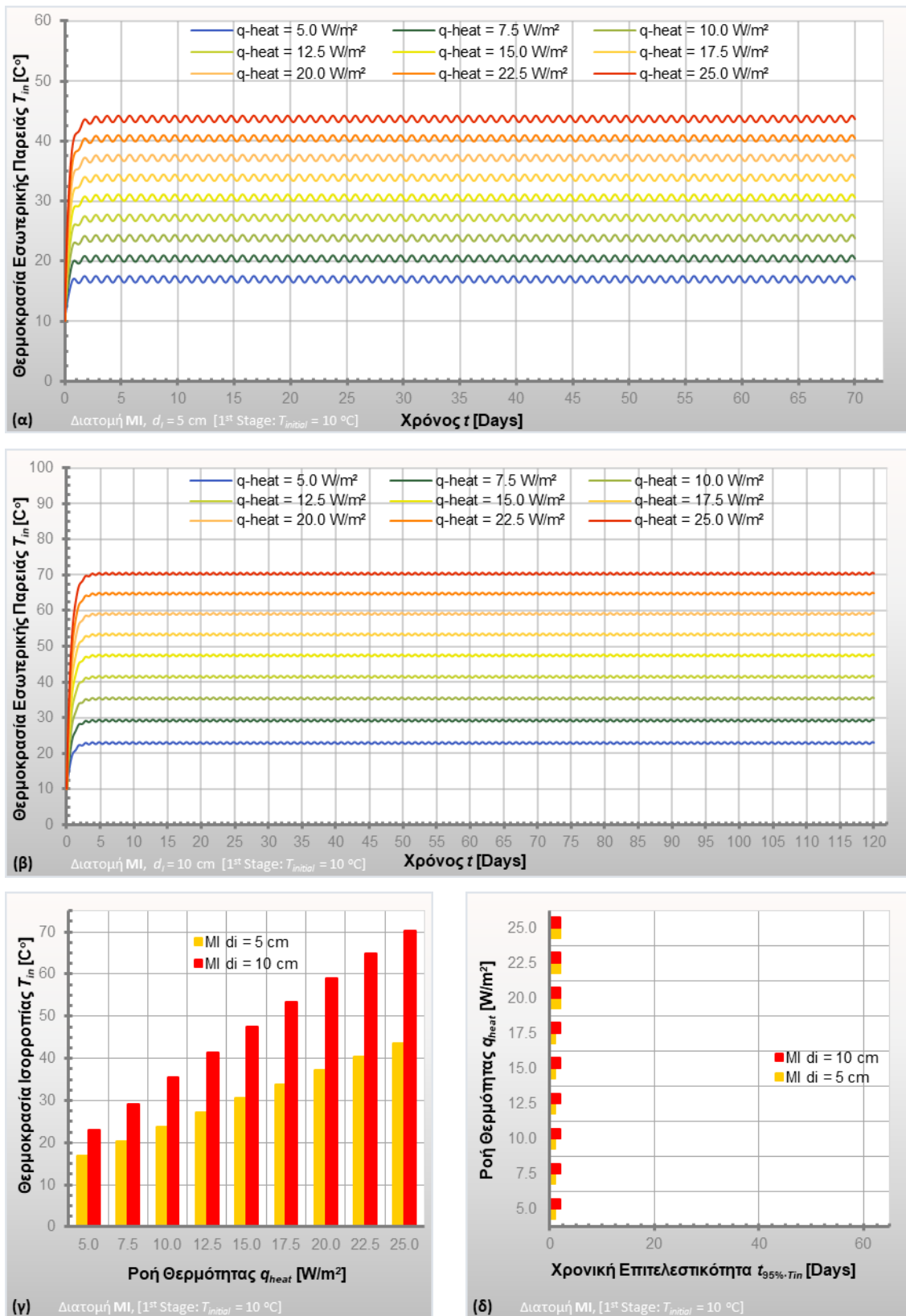
δ) παρατηρείται γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ισορροπίας, παίρνει την τιμή της τάξεως του 1.35 για $d_i=5\text{cm}$, και 2.45 για $d_i=10\text{cm}$ και είναι οι ίδιοι με όλους τους τύπους διατομών που μελετήσαμε

ε) ο επιτελεστικός χρόνος του 95% των ανωτέρω θερμοκρασιών, είναι πρακτικά κοινός για όλα τα q_{heat} που εφαρμόζονται στην ίδια διατομή και παίρνει τιμές: ~1ημέρα για $d_i=5\text{cm}$, ~2 ημέρες για $d_i=10\text{cm}$.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i=5\text{cm}$ σε $d_i=10\text{cm}$ για διατομή MI οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασίας ισορροπίας
- υποδιπλασιασμό του πλάτους κύματος της ημιτονοειδούς διακύμανσης της θερμοκρασίας ισορροπίας. Η σχέση πλάτους κύματος – πάχους θερμομόνωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη.
- αύξηση της θερμοκρασίας ισορροπίας του συστήματος
- αύξηση του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας
- αύξηση του επιτελεστικού χρόνου του 95% της θερμοκρασίας ισορροπίας, ανάλογη με την αύξηση του πάχους της μόνωσης

Παρατηρούμε ότι τα φαινόμενα είναι αντίστοιχα με αυτά της διατομής IM.



Σχήμα 5-7: Θερμοκρασία εσωτ. παρείας T_{in} , διατομής MI, συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσει του q_{heat} , δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσει του q_{heat} .

5.2.2.3 Διατομές IM-MI, $d_i=5\text{cm}$

Στο σχήμα 5-8 απεικονίζονται συγκριτικά το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσεως του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 10^\circ\text{C}$, για διατομές IM και MI για κοινό πάχος θερμομόνωσης $d_i=5\text{cm}$.

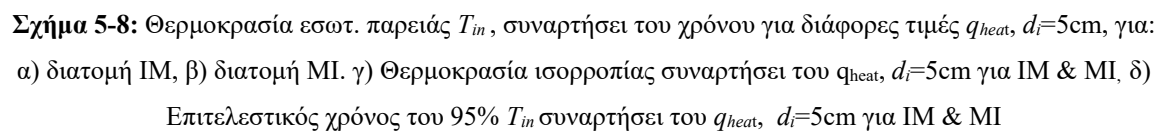
Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-8 α), β), γ) και δ) συνάγονται τα εξής:

- α) το σύστημα της διατομής IM επέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας την 68^η ημέρα για όλες τις τιμές που λαμβάνει το q_{heat} , ενώ αντίστοιχα η διατομή MI την 5^η ημέρα.
- β) το πλάτος κύματος του ημιτονοειδούς διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ $T_{in,max}$ και $T_{in,min}$, παίρνει τιμές της τάξεως του: 0.17 για IM και 1.10 για MI
- γ) οι θερμοκρασίες ισορροπίας είναι πρακτικά ίδιες και για τις δύο διατομές
- δ) ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ισορροπίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , είναι κοινός και στις δύο περιπτώσεις, της τάξεως του 1.35
- ε) ο επιτελεστικός χρόνος του 95% των ανωτέρω θερμοκρασιών ενώ για τη διατομή IM είναι 17 ημέρες, για την MI είναι 1 ημέρα

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αλλαγή στη θέση της θερμομόνωσης από IM σε MI για πάχος θερμομόνωσης $d_i=5\text{cm}$ οδηγεί σε:

- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασίας ισορροπίας
- σημαντική αύξηση του πλάτους κύματος της ημιτονοειδούς διακύμανσης της θερμοκρασίας ισορροπίας
- ίδιες θερμοκρασίες ισορροπίας του συστήματος
- ίδιο ρυθμό ανόδου θερμοκρασίας
- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου του 95% της θερμοκρασίας ισορροπίας

Παρατηρούμε ταύτιση των συμπερασμάτων με τα αντίστοιχα του θερμοκρασιακού προφίλ $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 0^\circ\text{C}$, για $d_i=5\text{cm}$



5.2.2.4 Διατομές IM-MI, $d_i=10\text{cm}$

Στο σχήμα 5-9 απεικονίζονται συγκριτικά το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσεως του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10\pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 10^\circ\text{C}$, για διατομές IM και MI για κοινό πάχος θερμομόνωσης $d_i=10\text{cm}$.

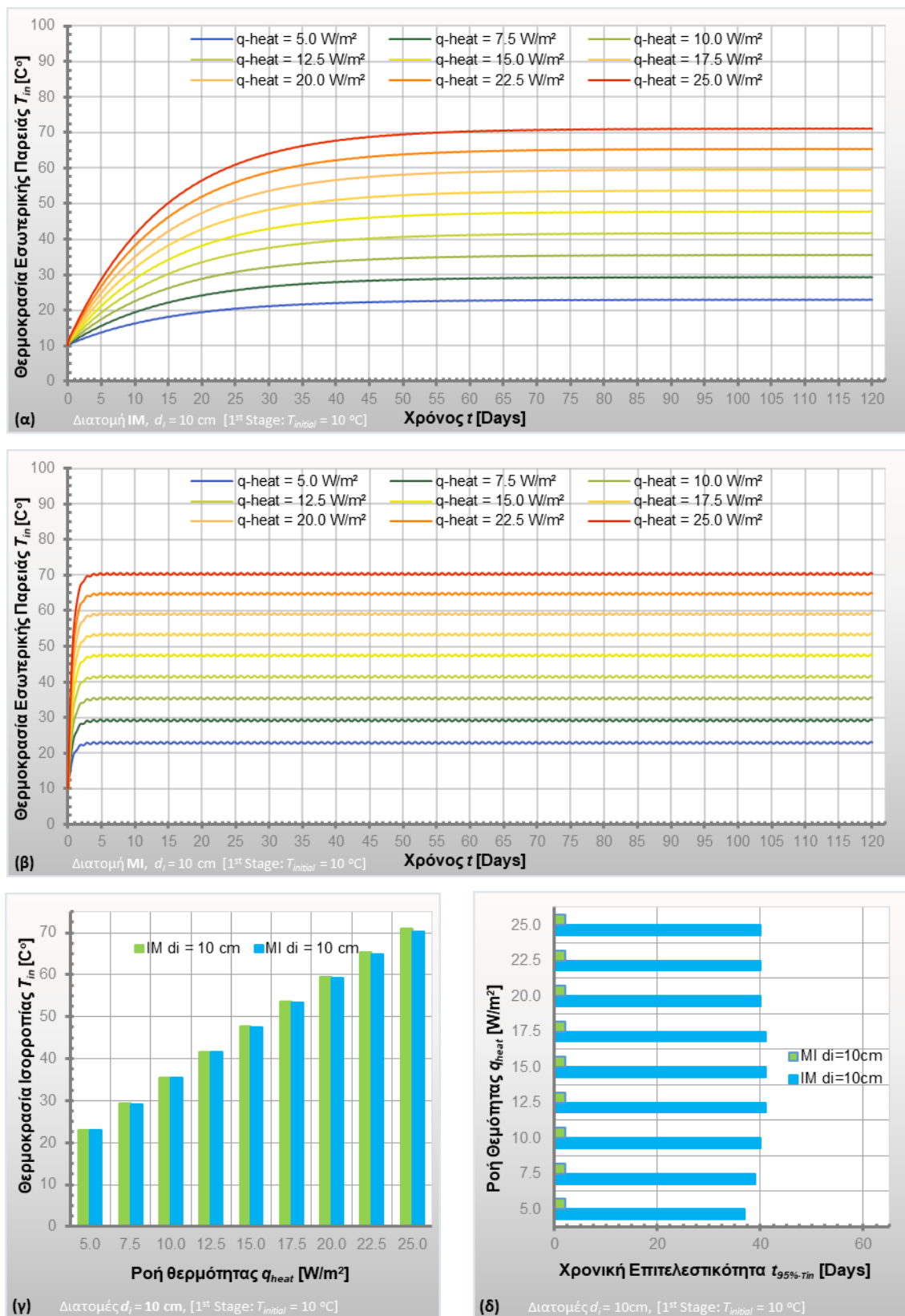
Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-9 α), β), γ) και δ) συνάγονται τα εξής:

- α) το σύστημα της διατομής IM επέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας την 113^η ημέρα για όλες τις τιμές που λαμβάνει το q_{heat} , ενώ αντίστοιχα η διατομή MI την 9^η ημέρα.
- β) το πλάτος κύματος του ημιτονοειδούς διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ $T_{in,max}$ και $T_{in,min}$, παίρνει τιμές: 0.085 για IM και 0.55 για MI
- γ) οι θερμοκρασίες ισορροπίας είναι πρακτικά ίδιες και για τις δύο διατομές
- δ) ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ισορροπίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , είναι κοινός και στις δύο περιπτώσεις, της τάξεως του 2.45
- ε) ο επιτελεστικός χρόνος του 95% των ανωτέρω θερμοκρασιών ενώ για τη διατομή IM είναι 40 ημέρες, για την MI είναι 2 ημέρες

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αλλαγή στη θέση της θερμομόνωσης από IM σε MI για πάχος θερμομόνωσης $d_i=10\text{cm}$ οδηγεί σε:

- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασίας ισορροπίας
- σημαντική αύξηση του πλάτους κύματος της ημιτονοειδούς διακύμανσης της θερμοκρασίας ισορροπίας
- ίδιες θερμοκρασίες ισορροπίας του συστήματος
- ίδιο ρυθμό ανόδου θερμοκρασίας
- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου του 95% της θερμοκρασίας ισορροπίας

Παρατηρούμε ταύτιση των συμπερασμάτων με τα αντίστοιχα του θερμοκρασιακού προφίλ $T_{out} = 0\pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 0^\circ\text{C}$, για $d_i=10\text{cm}$



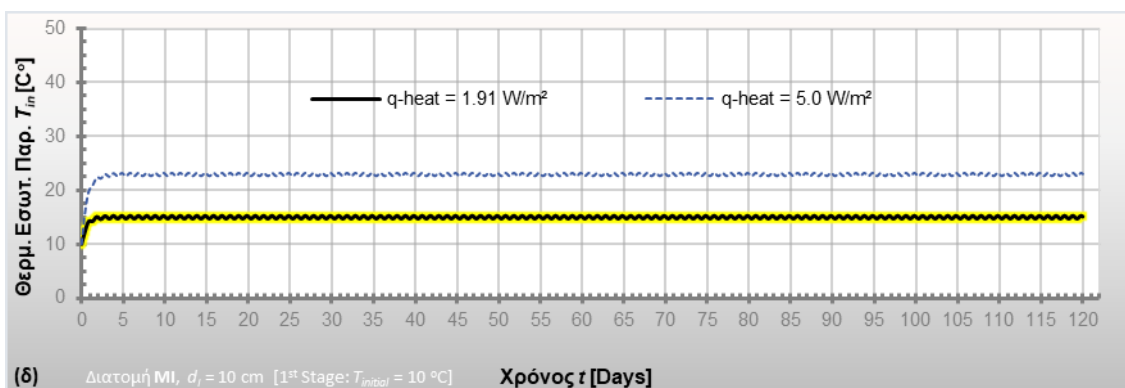
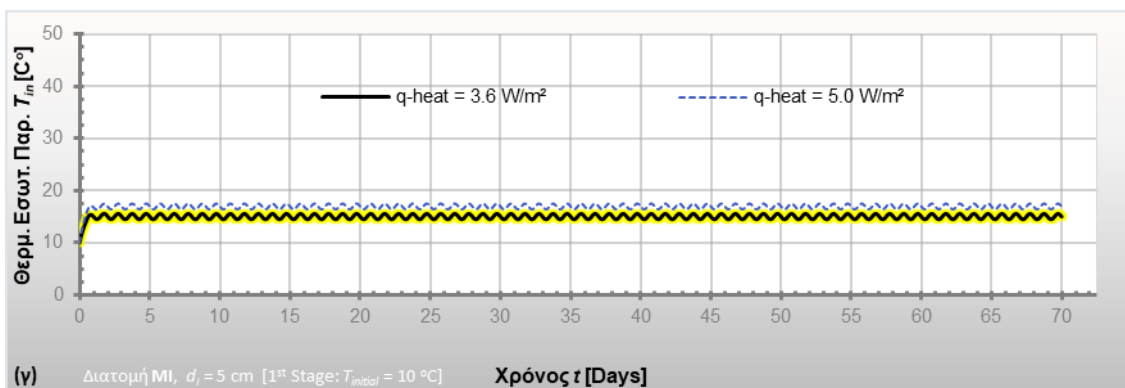
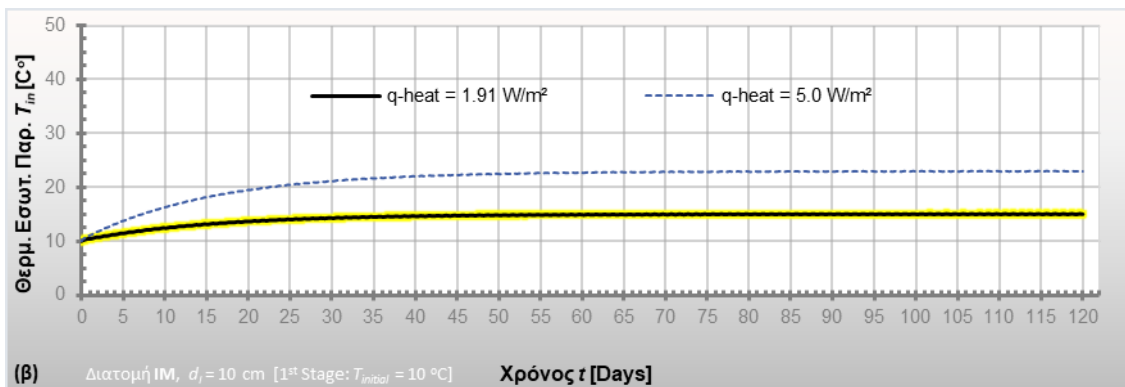
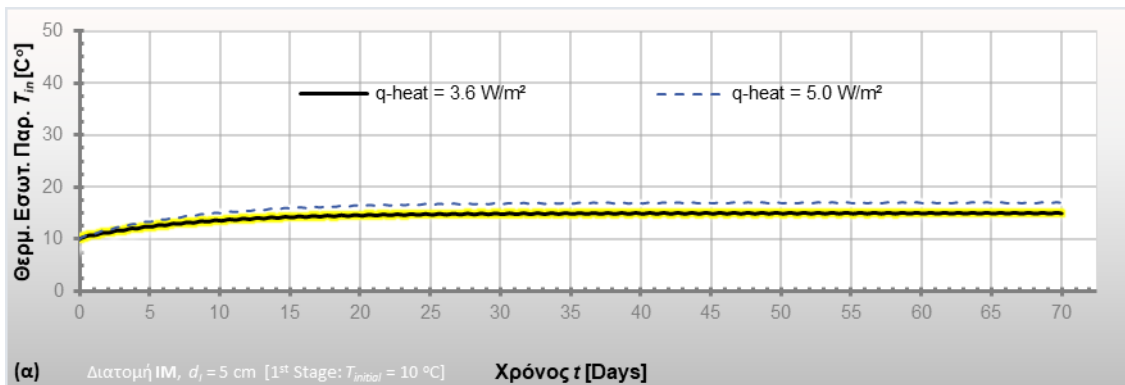
Σχήμα 5-9: Θερμοκρασία εσωτ. παρείας T_{in} , συναρτήσεως του χρόνου για διάφορες τιμές q_{heat} , $d_i=10$ cm, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Θερμοκρασία ισορροπίας συναρτήσεως του q_{heat} , $d_i=10$ cm για IM & MI, δ) Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσεως του q_{heat} , $d_i=5$ cm για IM & MI

5.2.2.5 Επίτευξη επιθυμητής θερμοκρασίας ισορροπίας 15°C

Κατ'αντιστοιχία με το θερμοκρασιακό προφίλ $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 0^\circ\text{C}$, έτσι και στο $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 10^\circ\text{C}$, θα εντοπίσουμε τις τιμές της ροής θερμότητας που οδηγούν στη θερμοκρασία ισορροπίας των 15°C , που είναι και το ζητούμενο της πρώτης φάσης της ανάλυσης. Μπορούμε με σχετική ακρίβεια με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής να προβλέψουμε την τιμή της ροής θερμότητας που θα μας οδηγήσει σε θερμοκρασία ισορροπίας 15°C .

Οι τιμές αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 5-10, στα διαγράμματα α) IM, $d_i=5\text{cm}$, β) IM, $d_i=10\text{cm}$ γ) MI, $d_i=5\text{cm}$ και δ) MI, $d_i=10\text{cm}$ και όπως είναι αναμενόμενο, το q_{heat} είναι ίδιο για τις διατομές με το ίδιο πάχος θερμομόνωσης και παίρνει τιμές 3.6 W/m^2 για IM και MI $d_i=5\text{cm}$ και 1.91 W/m^2 για IM και MI $d_i=10\text{cm}$.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνουμε την θερμοκρασιακή ισορροπία των 15°C με αριθμητικά χαμηλότερες τιμές θερμικής ροής, γεγονός αναμενόμενο, μια και η αρχική θερμοκρασία των 10°C μας επιτρέπει να φθάσουμε πιο εύκολα στο θερμοκρασιακό στόχο που έχουμε επιβάλει.



Σχήμα 5-10: Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσεως του χρόνου για τις συγκεκριμένες q_{heat} , προς επίτευξη θερμικής ισορροπίας σε μέση θερμοκρασία 15°C α) διατομής IM, για $d_i=5$ cm, β) διατομής IM, για $d_i=10$ cm, γ) διατομής MI, για $d_i=5$ cm, δ) διατομής MI, για $d_i=10$ cm

5.3 Φάση 2 (2nd Stage)

Στη δεύτερη φάση της ανάλυσης, λαμβάνουμε τις τιμές της διακύμανσης των θερμοκρασιών σε σημείο που βρίσκεται στην εσωτερική παρειά του μοντέλου, σε συνάρτηση με το χρόνο, για διάφορες τιμές q_{heat} , για χρονικό διάστημα δύο ημερών. Αφού το μοντέλο έχει ισορροπήσει στους 15°C με τη διαδικασία που περιγράφηκε αναλυτικά στο 4.6, επιβάλλεται σταθερή θερμική ροή, ισχύος μεγαλύτερης από αυτή της ισορροπίας, η οποία μεταβάλλεται παραμετρικά και παίρνει τιμές από 5.0 W/m² έως 60.0 W/m² (ανάλογα με την περίπτωση) με βήμα 5.0 W/m², ώστε να επιτευχθούν οι θερμοκρασίες στόχευσης 18 °C, 20 °C, 22 °C. Το εύρος των τιμών q_{heat} που θα επιβληθεί σε κάθε τύπο εξεταζόμενης διατομής, εξαρτάται από τις τιμές ροής θερμότητας που οδήγησαν στο initial value των 15°C. Κάθε διατομή θα εξετασθεί για δέκα (10) τιμές θερμικής ροής, με τη χαμηλότερη από αυτές να προσεγγίζει τη θερμική ροή ισορροπίας.

Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζεται το εύρος των επιβαλλόμενων θερμικών ροών ανά μελετώμενη διατομή, σε σχέση με τη θερμική ροή ισορροπίας.

T_{out}	ΔΙΑΤΟΜΗ	ΠΑΧΟΣ ΜΟΝΩΣΗΣ			
		$d_i = 5cm$		$d_i = 10cm$	
		$q_{heat_15^{\circ}C}$ (W/m ²)	q_{heat_2days} (W/m ²)	$q_{heat_15^{\circ}C}$ (W/m ²)	q_{heat_2days} (W/m ²)
0±5 °C	IM	10.61	15-60	5.67	10-55
	MI	10.61	15-60	5.67	10-55
10±5 °C	IM	3.60	10-55	1.91	5-50
	MI	3.60	10-55	1.91	5-50

Πίνακας 5- 1: Εύρος των τιμών θερμικής ροής που θα επιβληθεί σε κάθε τύπο εξεταζόμενης διατομής (q_{heat_2days}), σε σχέση με τις τιμές ροής θερμότητας που οδήγησαν στο initial value των 15°C ($q_{heat_15^{\circ}C}$).

Τα αποτελέσματα αφορούν σε δύο διαφορετικές θερμοκρασιακές φορτίσεις εξωτερικού περιβάλλοντος, $T_{out}=0\pm5^{\circ}C$ και $T_{out}=10\pm5^{\circ}C$, δύο διαφορετικές διατομές όπως αναφέρθηκαν ήδη αναλυτικά και δύο πάχη θερμομόνωσης **5cm** και **10cm**.

5.3.1 Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{initial} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$

5.3.1.1 Διατομή IM

Στο σχήμα 5-11 απεικονίζεται το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσει του χρόνου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και $T_{initial} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, για διατομή IM και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης.

Στο σχήμα 5-11 α) απεικονίζονται τα διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 5 \text{ cm}$.

Οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} σε χρονικό διάστημα 2 ημερών, είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$
15.0 W/m ²	16.467 °C
20.0 W/m ²	18.188 °C
25.0 W/m ²	19.909 °C
30.0 W/m ²	21.631 °C
35.0 W/m ²	23.353 °C
40.0 W/m ²	25.076 °C
45.0 W/m ²	26.799 °C
50.0 W/m ²	28.523 °C
55.0 W/m ²	30.247 °C
60.0 W/m ²	31.972 °C

Στο σχήμα 5-11 β) απεικονίζονται τα διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 10 \text{ cm}$.

Οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} σε χρονικό διάστημα 2 ημερών, είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$
10.0 W/m ²	16.534 °C
15.0 W/m ²	18.314 °C
20.0 W/m ²	20.095 °C
25.0 W/m ²	21.887 °C
30.0 W/m ²	23.659 °C

35.0 W/m ²	25.442 °C
40.0 W/m ²	27.225 °C
45.0 W/m ²	29.010 °C
50.0 W/m ²	30.794 °C
55.0 W/m ²	32.580 °C

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-11 α), β), γ) και δ) παρατηρούνται τα εξής:

α) οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για το σύστημα της διατομής με $d_i=5\text{cm}$ είναι χαμηλότερες από αυτές για $d_i=10\text{cm}$

β) παρατηρείται γραμμική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ο ρυθμός ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας, παίρνει την τιμή της τάξεως του 0.35 και είναι κοινός και για τα δύο πάχη μόνωσης

γ) ο επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης 18 °C, 20 °C, 22 °C, είναι αντιστρόφως ανάλογος των τιμών που λαμβάνει το q_{heat} όπως είναι αναμενόμενο, μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της τιμής της ροής θερμότητας, λαμβάνει δε μεγαλύτερες τιμές για $d_i=5\text{cm}$ και λίγο μικρότερες για $d_i=10\text{cm}$.

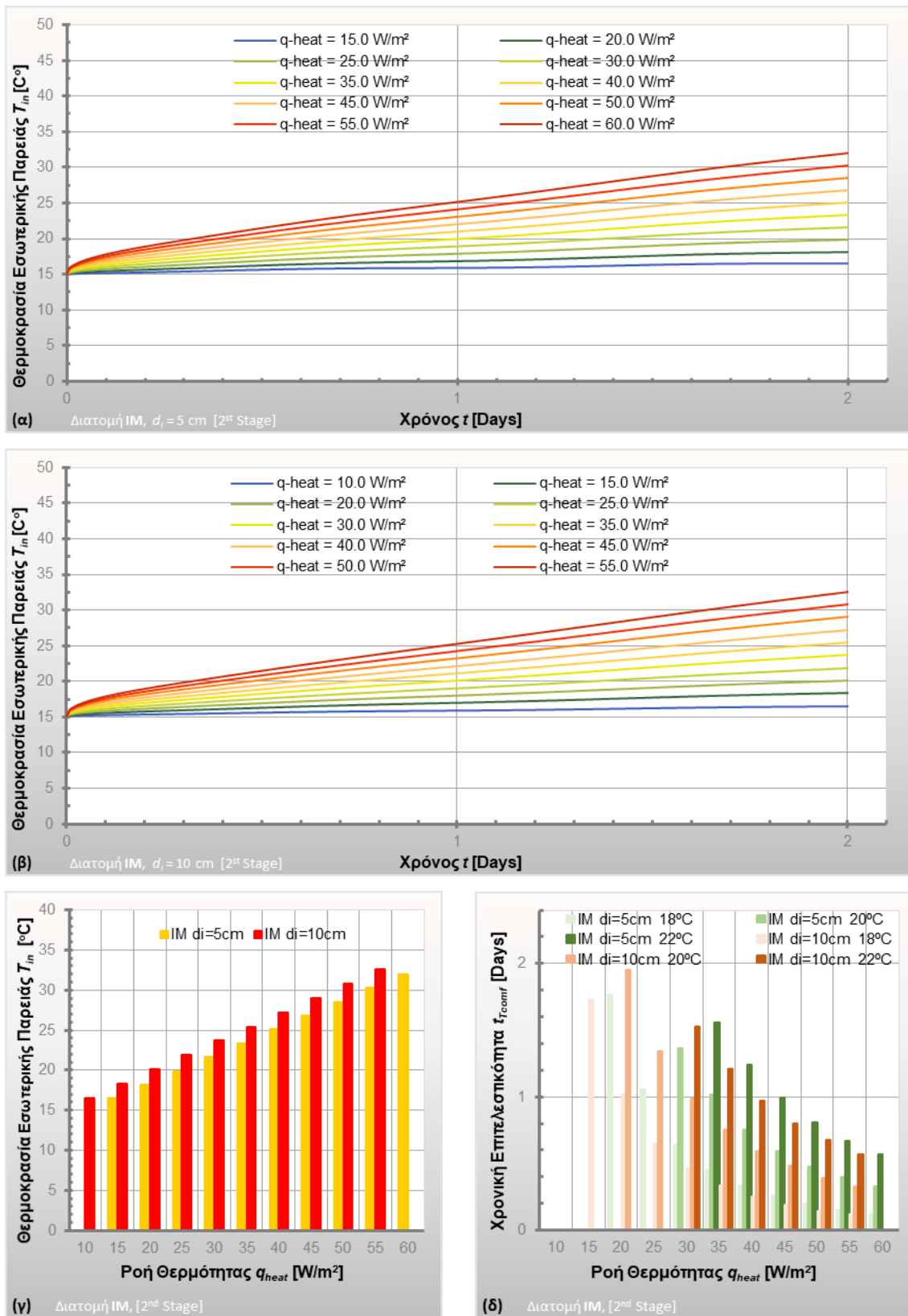
δ) η διατομή $d_i=5\text{cm}$ για χαμηλές τιμές του q_{heat} (10-15 W/m²) δεν φτάνει σε επίπεδο των επιθυμητών θερμοκρασιών, μέσα στο επιβαλλόμενο χρονικό διάστημα των 2 ημερών, ενώ όσο αυξάνεται η τιμή του q_{heat} , σταδιακά, και για μεγάλες τιμές του επιτελεστικού χρόνου (~2 ημέρες) φτάνει αρχικά σε θερμοκρασία 18°C. Για τιμή $q_{heat} = 30 \text{ W/m}^2$ η θερμοκρασία φθάνει στους 20 °C σε ~1.5 ημέρες και στη συνέχεια με μεγαλύτερη ισχύ θερμικής ροής (20-30 W/m²) επιτυγχάνονται οι απαιτούμενες θερμοκρασίες σε χρόνο που μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της τιμής θερμικής ροής. Για τη μέγιστη τιμή θερμικής ροής 60 W/m², το σύστημα επιτυγχάνει τις απαιτούμενες θερμοκρασίες σε χρόνους της τάξεως 3-14 ώρες.

ε) η διατομή $d_i=10\text{cm}$ για χαμηλές τιμές του q_{heat} (10W/m²) δεν φτάνει σε επίπεδο θερμικής άνεσης μέσα στο επιβαλλόμενο χρονικό διάστημα των 2 ημερών. Για τιμή $q_{heat} = 15 \text{ W/m}^2$ η θερμοκρασία φτάνει στους 18 °C, με μεγάλη τιμή του επιτελεστικού χρόνου (~2 ημέρες). Με $q_{heat} = 20 \text{ W/m}^2$ η θερμοκρασία φθάνει στους 20 °C σε 2 ημέρες και στη συνέχεια με μεγαλύτερη ισχύ θερμικής ροής (>30 W/m²) επιτυγχάνονται οι απαιτούμενες θερμοκρασίες σε χρόνο που μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της τιμής θερμικής ροής. Για τη μέγιστη τιμή θερμικής ροής 55 W/m², το σύστημα επιτυγχάνει τις απαιτούμενες θερμοκρασίες σε χρόνους της τάξεως 3-14 ώρες.

στ) Σε κάθε περίπτωση παρατηρείται ότι οι δύο διατομές επιτυγχάνουν τους ίδιους επιτελεστικούς χρόνους, για διαφορετικές όμως τιμές ροής θερμότητας, π.χ. για $d_i=5\text{cm}$ με θερμική ροή 50 W/m^2 , ο επιτελεστικός χρόνος είναι ίδιος με αυτόν για $d_i=10\text{cm}$ με θερμική ροή 45 W/m^2 . Ομοίως και για τις τιμές της μέγιστης θερμοκρασίας.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i=5\text{cm}$ σε $d_i=10\text{cm}$ για διατομή IM οδηγεί σε:

- μικρή αύξηση των μέγιστων τιμών θερμοκρασίας ανά τιμή q_{heat}
- αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας και κοινή τιμή ρυθμού ανόδου μέγιστης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το q_{heat}
- εκθετική μείωση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασιών θερμικής άνεσης, με την αύξηση των τιμών του q_{heat}



Σχήμα 5-11: $T_{out}=0 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρείας T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του χρόνου για τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5$ cm και β) για $d_i=10$ cm. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρείας και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} για $d_i=5$ cm & $d_i=10$ cm.

5.3.1.2 Διατομή ΜΙ

Στο σχήμα 5-12 απεικονίζεται το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσει του χρόνου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5$ °C και $T_{initial} = 15$ °C, για διατομή ΜΙ και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης.

Στο σχήμα 5-12 α) απεικονίζονται τα διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 5$ cm.

Οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} σε χρονικό διάστημα 2 ημερών, είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$
15.0 W/m ²	21.403 °C
20.0 W/m ²	28.012 °C
25.0 W/m ²	34.513 °C
30.0 W/m ²	40.912 °C
35.0 W/m ²	47.204 °C
40.0 W/m ²	53.387 °C
45.0 W/m ²	59.463 °C
50.0 W/m ²	65.439 °C
55.0 W/m ²	71.320 °C
60.0 W/m ²	77.108 °C

Στο σχήμα 5-12 β) απεικονίζονται τα διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 10$ cm.

Οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} σε χρονικό διάστημα 2 ημερών, είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$
10.0 W/m ²	25.440 °C
15.0 W/m ²	37.077 °C
20.0 W/m ²	48.450 °C
25.0 W/m ²	59.516 °C
30.0 W/m ²	70.292 °C
35.0 W/m ²	80.797 °C
40.0 W/m ²	91.046 °C

45.0 W/m ²	101.054 °C
50.0 W/m ²	110.918 °C
55.0 W/m ²	120.756 °C

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-12 α), β), γ) και δ) παρατηρούνται τα εξής:

α) οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για το σύστημα της διατομής με $d_i=5\text{cm}$ είναι χαμηλότερες από αυτές για $d_i=10\text{cm}$

β) παρατηρείται γραμμική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ο ρυθμός ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας, παίρνει την τιμή της τάξεως του 1.24 για $d_i=5\text{cm}$ και 2.12 για $d_i=10\text{cm}$

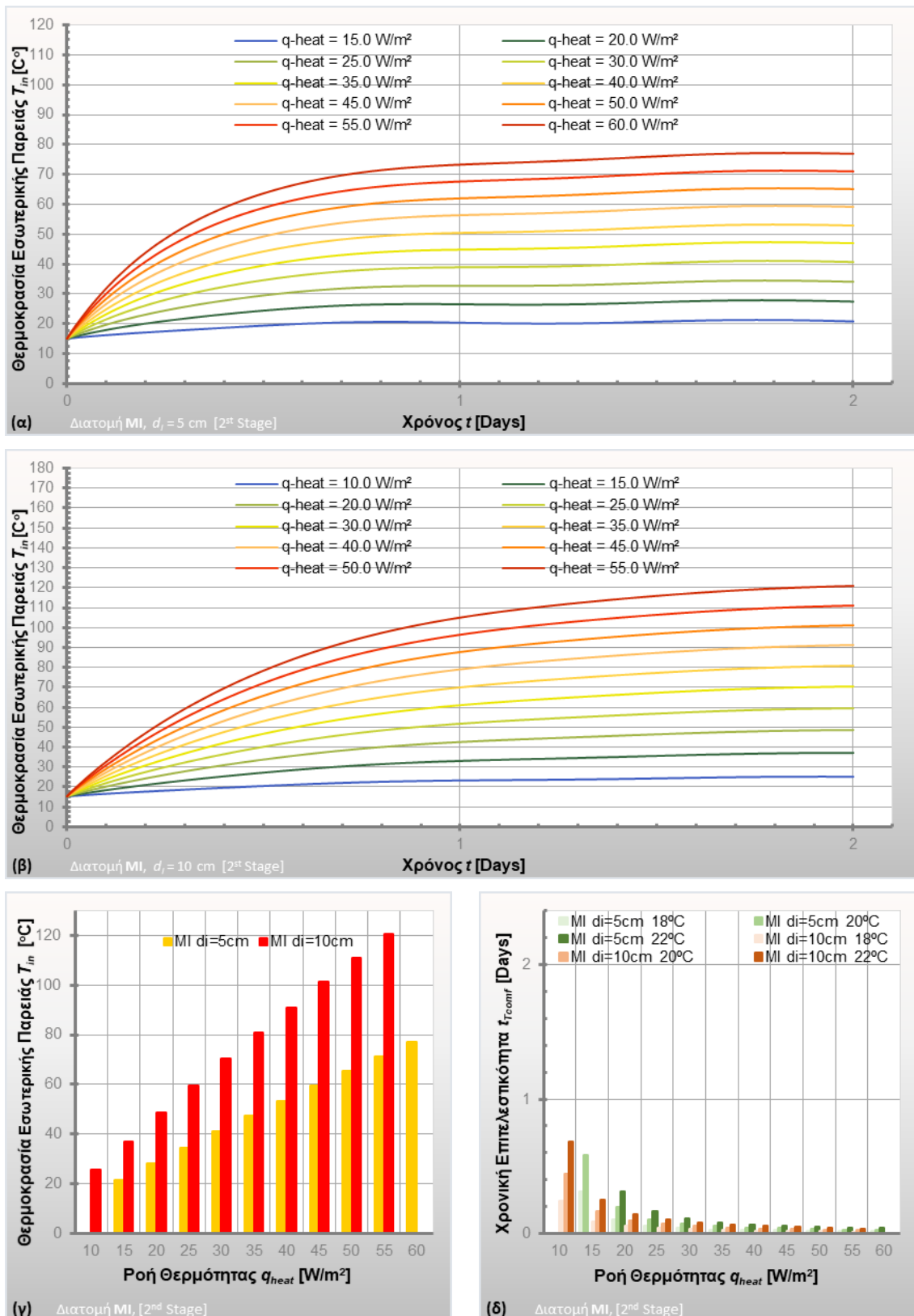
γ) ο επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης 18 °C, 20 °C, 22 °C, είναι αντιστρόφως ανάλογος των τιμών που λαμβάνει το q_{heat} όπως είναι αναμενόμενο, μειώνεται εκθετικά, λαμβάνει δε μεγαλύτερες τιμές για $d_i=5\text{cm}$ και λίγο μικρότερες για $d_i=10\text{cm}$.

δ) η διατομή $d_i=5\text{cm}$, για χαμηλές τιμές του q_{heat} (15 W/m²) φτάνει στους 18 °C σε ~7 ώρες και τους 20 °C σε ~14 ώρες, ενώ δεν φτάνει τους 22 °C. Όσο αυξάνεται η τιμή του q_{heat} , σταδιακά, και με μικρότερες τιμές του επιτελεστικού χρόνου, <7 ώρες επιτυγχάνει τις επιθυμητές θερμοκρασίες, και καταλήγει, με μεγαλύτερες τιμές ισχύος θερμικής ροής (60 W/m²), να φθάνει στις θερμοκρασίες στόχευσης σε χρόνο μικρότερο της 1 ώρας.

ε) η διατομή $d_i=10\text{cm}$, για χαμηλές τιμές του q_{heat} (10 W/m²) φτάνει τις θερμοκρασίες στόχευσης σε 6-16 ώρες, ενώ αυξανόμενης της τιμής θερμικής ροής, ο επιτελεστικός χρόνος μειώνεται εκθετικά και καταλήγει, με μεγαλύτερες τιμές ισχύος θερμικής ροής (55 W/m²), να φθάνει στις θερμοκρασίες στόχευσης σε χρόνο μικρότερο της 1 ώρας.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i=5\text{cm}$ σε $d_i=10\text{cm}$ για διατομή IM οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση των μέγιστων τιμών θερμοκρασίας ανά τιμή q_{heat}
- αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας καθώς και αύξηση του ρυθμού ανόδου μέγιστης θερμοκρασίας
- μείωση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασιών θερμικής άνεσης



Σχήμα 5-12: $T_{out}=0\pm5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρείας T_{in} , διατομής MI, συναρτήσει του χρόνου για τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5$ cm και β) για $d_i=10$ cm. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρείας και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} για $d_i=5$ cm & $d_i=10$ cm.

5.3.1.3 Διατομές IM-MI, $d_i=5\text{cm}$

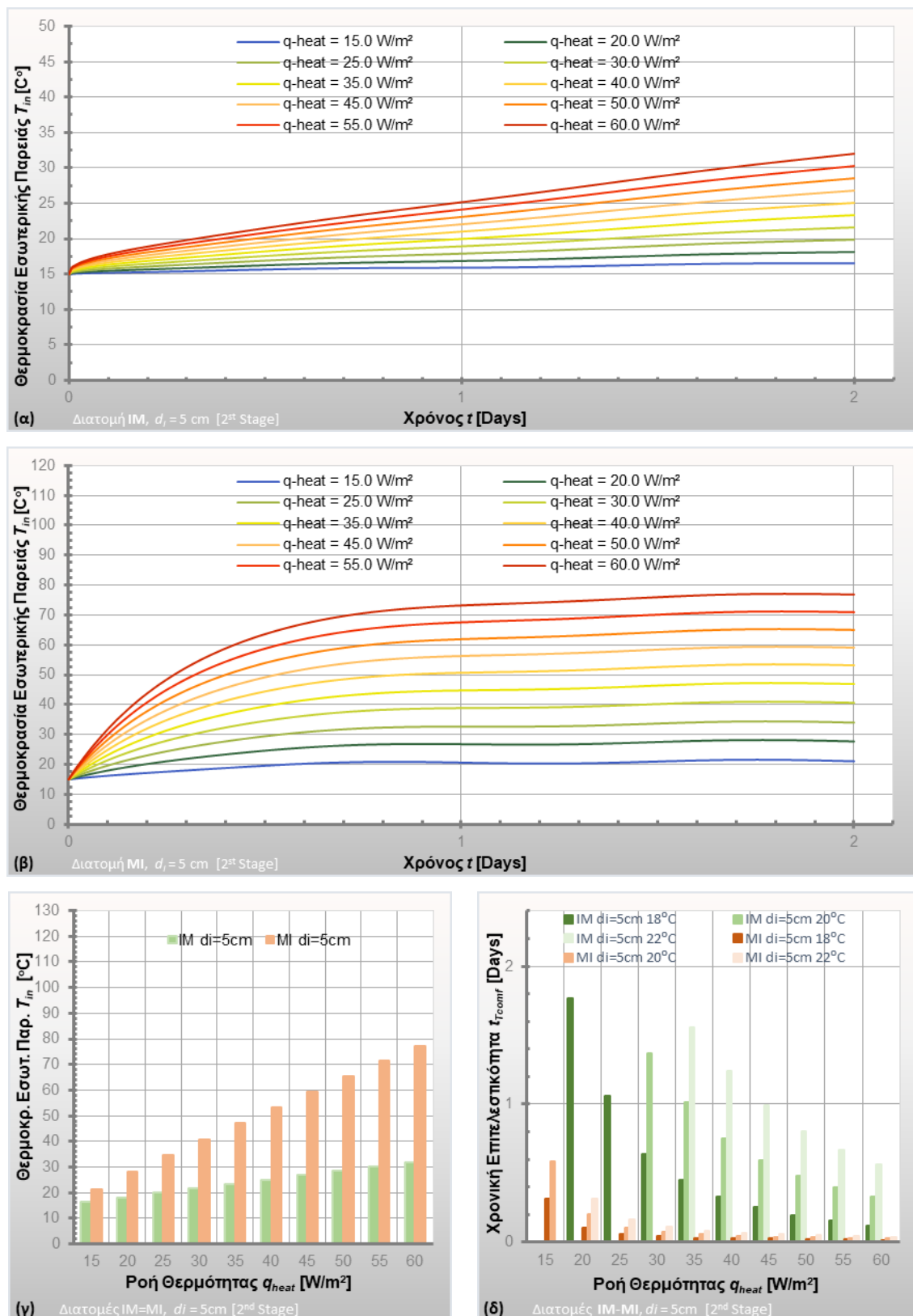
Στο σχήμα 5-13 απεικονίζονται συγκριτικά το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρείας T_{in} συναρτήσεως του χρόνου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out}=0\pm5^\circ\text{C}$ και $T_{initial}=15^\circ\text{C}$, για διατομές IM και MI με κοινό πάχος θερμομόνωσης $d_i=5\text{cm}$.

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-13 α), β), γ) και δ) συνάγονται τα εξής:

- α) οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας που επιτυγχάνονται για το σύστημα της διατομής IM είναι χαμηλότερες από αυτές για MI
- β) παρατηρείται και για τις δύο διατομές γραμμική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ο ρυθμός ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας, παίρνει την τιμή της τάξεως του 0.35 για IM και 1.24 για MI
- γ) ο επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών θερμικής άνεσης 18°C , 20°C , 22°C , για τις δύο διατομές είναι αντιστρόφως ανάλογος των τιμών που λαμβάνει το q_{heat} όπως είναι αναμενόμενο, μειώνεται εκθετικά, για τη διατομή IM λαμβάνει μεγάλες τιμές και αρκετά μικρότερες για διατομή MI. Η διατομή IM, φτάνει και στις τρεις θερμοκρασίες στόχευσης για ισχύ θερμικής ροής $>30\text{ W/m}^2$, ενώ η MI επιτελεί το στόχο και για μικρές τιμές ισχύος.
- δ) η διατομή IM στις μεγάλες τιμές q_{heat} , καταλήγει στις θερμοκρασίες στόχευσης σε 3-14 ώρες ενώ η διατομή MI το επιτυγχάνει αυτό από λίγα λεπτά έως μία ώρα.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αλλαγή στη θέση της θερμομόνωσης από IM σε MI για πάχος θερμομόνωσης $d_i=5\text{cm}$ οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας
- σημαντική αύξηση του ρυθμού ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας
- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου των θερμοκρασιών στόχευσης



Σχήμα 5-13: $T_{\text{out}}=0\pm 5^\circ\text{C}$, $T_{\text{initial}}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου για τιμές q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$ για IM & MI.

5.3.1.4 Διατομές IM-MI, $d_i=10\text{cm}$

Στο σχήμα 5-14 απεικονίζονται συγκριτικά το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσεως του χρόνου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out}=0\pm5^\circ\text{C}$ και $T_{initial}=15^\circ\text{C}$, για διατομές IM και MI με κοινό πάχος θερμομόνωσης $d_i=10\text{cm}$.

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-14 α), β), γ) και δ) συνάγονται τα εξής:

α) οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας που επιτυγχάνονται για το σύστημα της διατομής IM είναι σημαντικά χαμηλότερες από αυτές για MI. Οι τιμές για τη διατομή MI είναι της τάξεως $17\text{-}33^\circ\text{C}$, για τιμές q_{heat} , $10\text{-}55\text{ W/m}^2$. Για τη διατομή MI οι τιμές των μεγίστων θερμοκρασιών κυμαίνονται από $26\text{-}120^\circ\text{C}$ για τις αντίστοιχες τιμές q_{heat} .

β) παρατηρείται και για τις δύο διατομές γραμμική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ο ρυθμός ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας, παίρνει την τιμή της τάξεως του 0.35 για IM και 2.12 για MI

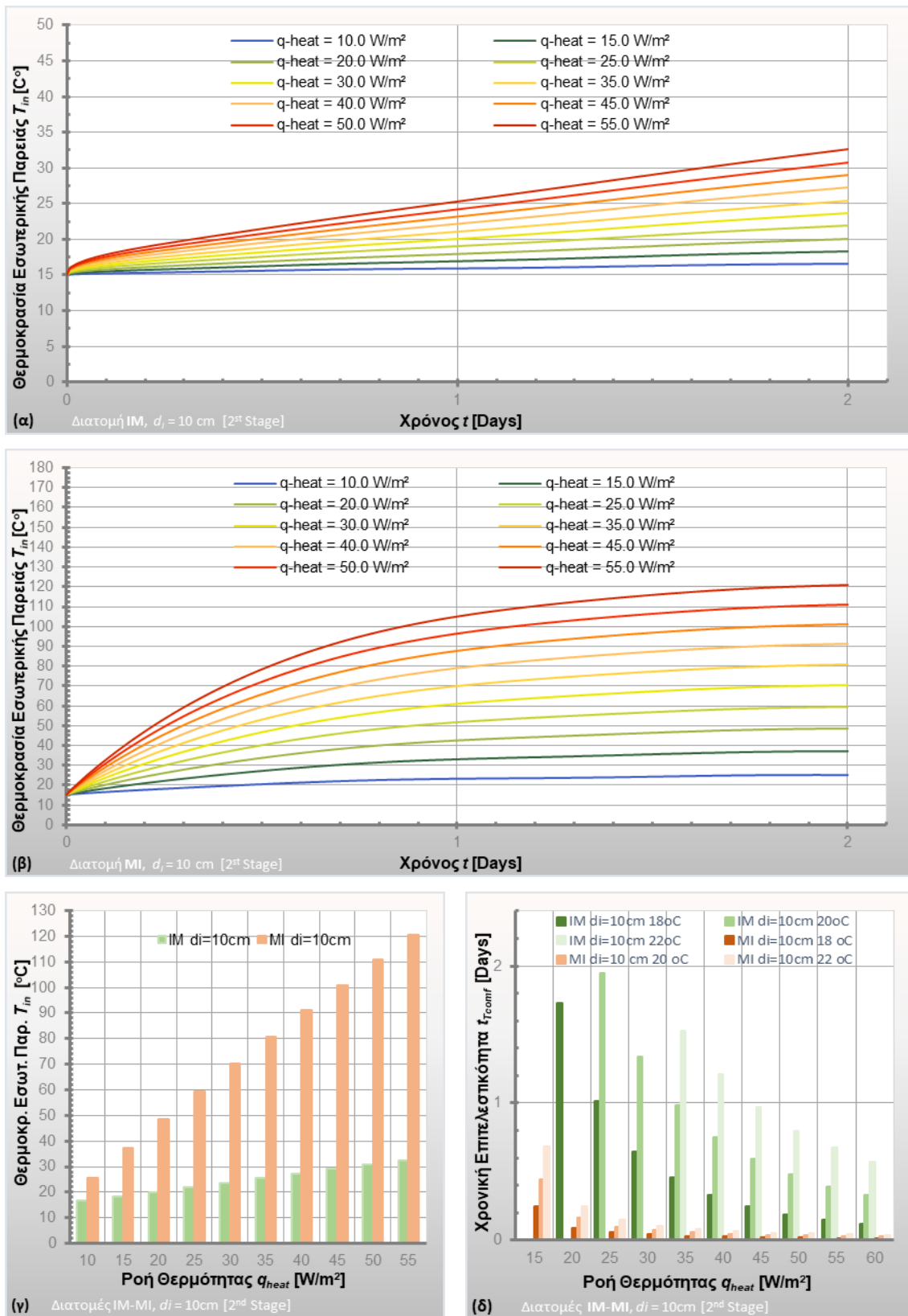
γ) ο επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης 18°C , 20°C , 22°C , για τις δύο διατομές είναι αντιστρόφως ανάλογος των τιμών που λαμβάνει το q_{heat} όπως είναι αναμενόμενο, μειώνεται εκθετικά, για τη διατομή IM λαμβάνει μεγάλες τιμές, ενώ για διατομή MI αρκετά μικρότερες. Η διατομή IM, φτάνει και στις τρεις θερμοκρασίες στόχευσης για ισχύ θερμικής ροής $>35\text{ W/m}^2$, ενώ η MI επιτελεί το στόχο από την αρχική τιμή ισχύος που μελετάμε (15 W/m^2)

δ) η διατομή IM στις μεγάλες τιμές q_{heat} , καταλήγει στις θερμοκρασίες στόχευσης σε 3-12 ώρες ενώ η διατομή MI το επιτυγχάνει αυτό από λίγα λεπτά έως μία ώρα.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αλλαγή στη θέση της θερμομόνωσης από IM σε MI για πάχος θερμομόνωσης $d_i=10\text{cm}$ οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας
- σημαντική αύξηση του ρυθμού ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας
- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου των θερμοκρασιών στόχευσης

Παρατηρούμε αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτά των διατομών IM-MI $d_i=5\text{cm}$



Σχήμα 5-14: $T_{\text{out}}=0\pm 5^\circ\text{C}$, $T_{\text{initial}}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_m , συναρτήσει του χρόνου, για τιμές q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$ για IM & MI.

5.3.1.5 Επιτελεστική θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους – Διατομή IM

Στο σχήμα 5-15 απεικονίζονται οι θερμοκρασίες εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσει της ροής θερμότητας q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$, για διατομή IM και πάχη θερμομόνωσης $d_i = 5\text{cm}$ και $d_i = 10\text{cm}$, όπως μελετώνται σε καθορισμένους χρόνους: 1, 2, 3, 6, 12 και 24 ώρες.

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-14 α), β) και γ) συνάγονται τα εξής:

α) παρατηρείται και για τις δύο διατομές γραμμική αύξηση της επιτελεστικής θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους, σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} . Μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει η διατομή $d_i = 10\text{cm}$ σε σχέση με τη διατομή $d_i = 5\text{cm}$, ενώ ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας 24ώρου σε συνάρτηση με το q_{heat} είναι κοινός για τα δύο πάχη και παίρνει τιμή 0.20

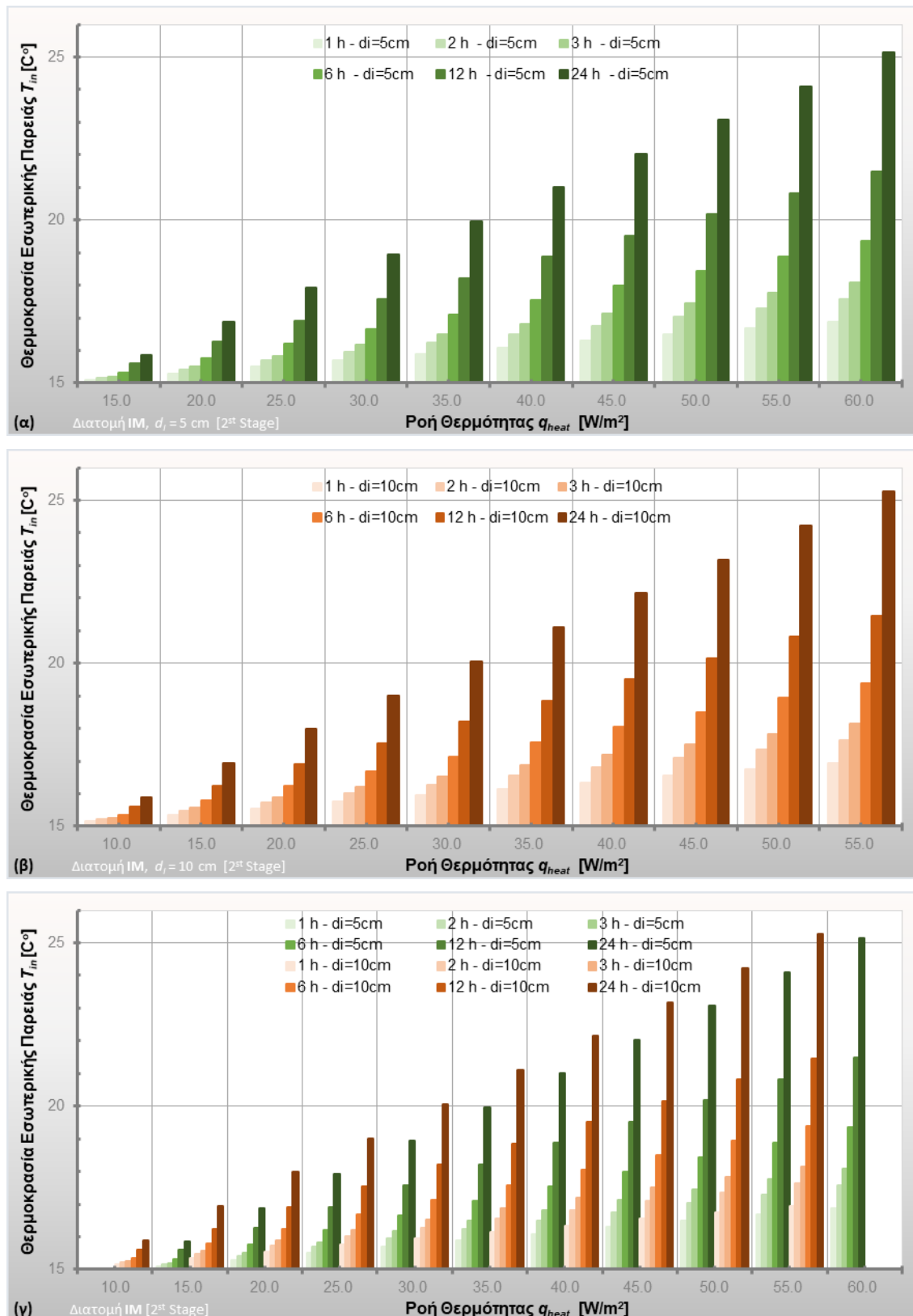
β) η διατομή $d_i = 5\text{cm}$ για τιμές q_{heat} 15-20 W/m^2 δεν επιτυγχάνει θερμοκρασίες στόχευσης στο πρώτο 24ωρο. Από την τιμή των 25 W/m^2 φθάνει στους 18°C σχεδόν σε 18 ώρες, ενώ με ισχύ πάνω από 40 W/m^2 επιτυγχάνονται όλες οι θερμοκρασίες στόχευσης στο διάστημα του 24ώρου. Στη μέγιστη ισχύ των 60 W/m^2 σε χρονικό διάστημα 2 ωρών μπορεί να επιτευχθεί η πρώτη θερμοκρασία στόχευσης των 18°C , ενώ σε διάστημα 24ώρου η θερμοκρασία θα λάβει τιμή της τάξης των 25.2°C

γ) η διατομή $d_i = 10\text{cm}$ για τιμές q_{heat} 10-15 W/m^2 δεν επιτυγχάνει θερμοκρασίες στόχευσης στο πρώτο 24ωρο. Από την τιμή των 20 W/m^2 φθάνει στους 18°C σχεδόν σε 18 ώρες, ενώ με ισχύ πάνω από 35 W/m^2 επιτυγχάνονται όλες οι θερμοκρασίες στόχευσης στο διάστημα του 24ώρου. Στη μέγιστη ισχύ των 55 W/m^2 σε χρονικό διάστημα 2 ωρών μπορεί να επιτευχθεί η πρώτη θερμοκρασία στόχευσης των 18°C , ενώ σε διάστημα 24ώρου η θερμοκρασία θα λάβει τιμή της τάξης των 25.2°C

δ) Σε κάθε περίπτωση παρατηρείται ότι οι δύο διατομές επιτυγχάνουν τις ίδιες τιμές θερμοκρασίας, στους ίδιους επιτελεστικούς χρόνους, για διαφορετικές όμως τιμές ροής θερμότητας, π.χ. για $d_i = 5\text{cm}$ με θερμική ροή 50 W/m^2 , η επιτελεστική θερμοκρασία είναι ίδια με αυτή για $d_i = 10\text{cm}$ με θερμική ροή 45 W/m^2 , όπως παρατηρήθηκε και στο 5.3.1.1.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i = 5\text{cm}$ σε $d_i = 10\text{cm}$ για διατομή IM οδηγεί σε:

- αύξηση της επιτελεστικής θερμοκρασίας σε καθορισμένους χρόνους
- κοινό ρυθμό ανόδου της θερμοκρασίας



Σχήμα 5-15: $T_{out}=0\pm5^{\circ}\text{C}$, $T_{initial}=15^{\circ}\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του q_{heat} , σε καθορισμένους χρόνους, για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$, γ) συγκριτικά και για τα δύο πάχη μόνωσης.

5.3.1.6 Επιτελεστική θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους – Διατομή ΜΙ

Στο σχήμα 5-16 απεικονίζονται οι θερμοκρασίες εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσει της ροής θερμότητας q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$, για διατομή ΜΙ και πάχη θερμομόνωσης $d_i = 5\text{cm}$ και $d_i = 10\text{cm}$, όπως μελετώνται σε καθορισμένους χρόνους: 1, 2, 3, 6, 12 και 24 ώρες.

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-14 α), β) και γ) συνάγονται τα εξής:

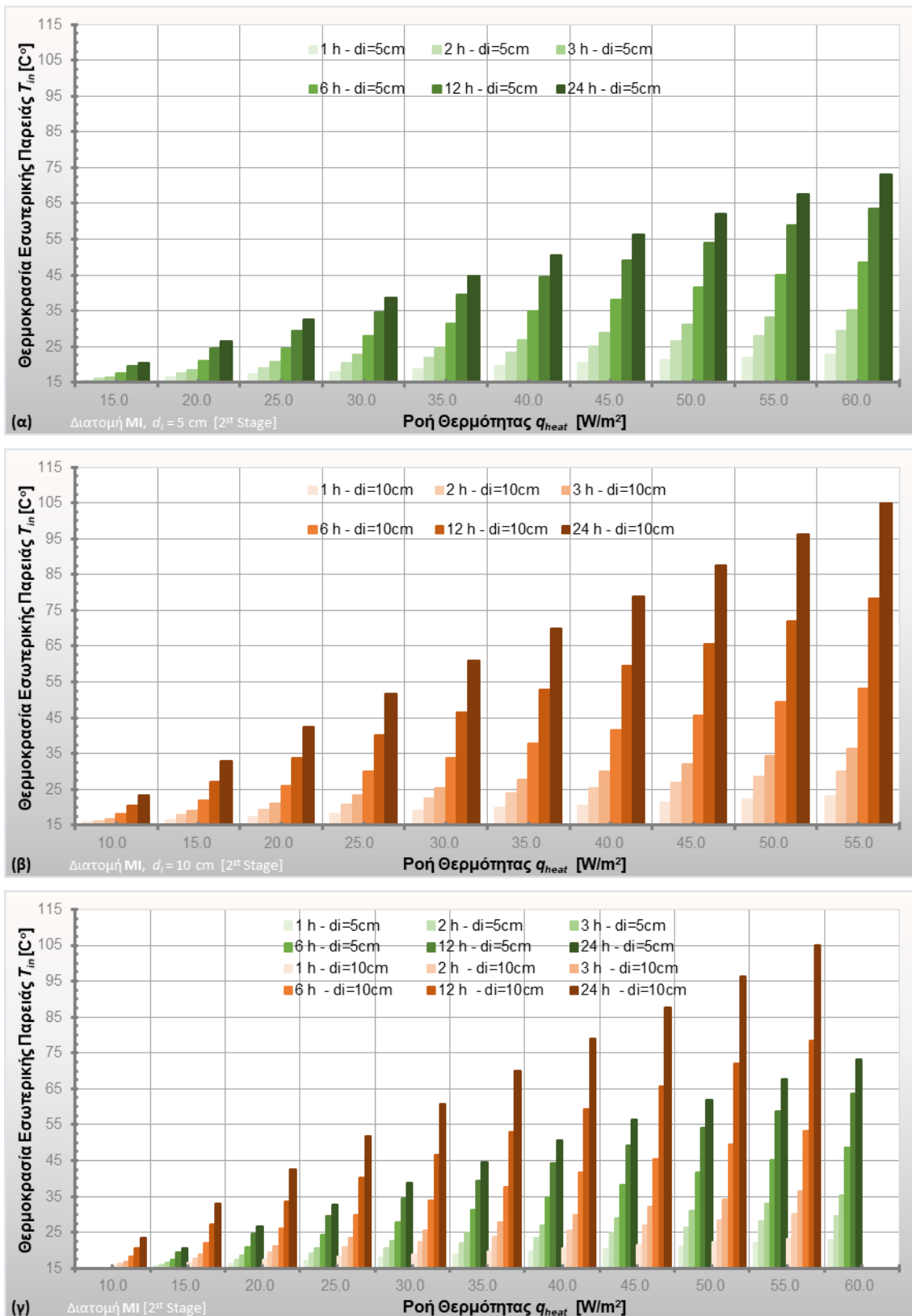
α) παρατηρείται και για τις δύο διατομές γραμμική αύξηση της επιτελεστικής θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους, σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} . Η διατομή $d_i = 10\text{cm}$ λαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη διατομή $d_i = 5\text{cm}$, ενώ ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας 24ώρου σε συνάρτηση με το q_{heat} , για $d_i = 5\text{cm}$ παίρνει τιμή 1.17, ενώ για $d_i = 10\text{cm}$ την τιμή 1.80

β) η διατομή $d_i = 5\text{cm}$ για τιμή $q_{heat} 15\text{W/m}^2$ φθάνει στους 18°C σχεδόν σε 7 ώρες, ενώ σε 24 ώρες καταλήγει σε θερμοκρασία της τάξεως των 20°C . Αυξανόμενης της τιμής θερμικής ροής, οι θερμοκρασίες στόχευσης επιτυγχάνονται σε ολοένα και μικρότερους χρόνους. Στη μέγιστη ισχύ των 60W/m^2 μέσα στην πρώτη κιόλας ώρα επιτυγχάνεται θερμοκρασία της τάξης των 23°C , ενώ σε διάστημα 24ώρου η θερμοκρασία θα λάβει τιμή της τάξης των 73°C

γ) η διατομή $d_i = 10\text{cm}$ για τιμή $q_{heat} 10\text{W/m}^2$ φθάνει στους 18°C σχεδόν σε 6 ώρες, ενώ σε 24 ώρες καταλήγει σε θερμοκρασία της τάξεως των 24°C . Αυξανόμενης της τιμής θερμικής ροής, οι θερμοκρασίες στόχευσης επιτυγχάνονται σε ολοένα και μικρότερους χρόνους. Στη μέγιστη ισχύ των 55W/m^2 μέσα στην πρώτη κιόλας ώρα επιτυγχάνεται θερμοκρασία της τάξης των 23°C , ενώ σε διάστημα 24ώρου η θερμοκρασία θα λάβει τιμή της τάξης των 105°C

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i = 5\text{cm}$ σε $d_i = 10\text{cm}$ για διατομή ΜΙ οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση της επιτελεστικής θερμοκρασίας σε καθορισμένους χρόνους
- αύξηση του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας



Σχήμα 5-16: $T_{out}=0\pm5^{\circ}\text{C}$, $T_{initial}=15^{\circ}\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} , διατομής ΜΙ, συναρτήσει του q_{heat} , σε καθορισμένους χρόνους, για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$, γ) συγκριτικά και για τα δύο πάχη μόνωσης.

5.3.2 Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$

5.3.2.1 Διατομή IM

Στο σχήμα 5-17 απεικονίζεται το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσει του χρόνου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$, για διατομή IM και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης.

Στο σχήμα 5-17 α) απεικονίζονται τα διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 5\text{cm}$.

Οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} σε χρονικό διάστημα 2 ημερών, είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$
10.0 W/m ²	17.162 °C
15.0 W/m ²	18.882 °C
20.0 W/m ²	20.602 °C
25.0 W/m ²	22.323 °C
30.0 W/m ²	24.045 °C
35.0 W/m ²	25.767 °C
40.0 W/m ²	27.489 °C
45.0 W/m ²	29.213 °C
50.0 W/m ²	30.937 °C
55.0 W/m ²	32.661 °C

Στο σχήμα 5-17 β) απεικονίζονται τα διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 10\text{cm}$.

Οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} σε χρονικό διάστημα 2 ημερών, είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$
5.0 W/m ²	16.086 °C
10.0 W/m ²	17.865 °C
15.0 W/m ²	19.646 °C
20.0 W/m ²	21.427 °C
25.0 W/m ²	23.208 °C

30.0 W/m ²	24.991 °C
35.0 W/m ²	26.774 °C
40.0 W/m ²	28.557 °C
45.0 W/m ²	30.342 °C
50.0 W/m ²	32.126 °C

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-17 α), β), γ) και δ) παρατηρούνται τα εξής:

α) οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για το σύστημα της διατομής με $d_i=5\text{cm}$ είναι χαμηλότερες από αυτές για $d_i=10\text{cm}$ για τις ίδιες τιμές q_{heat}

β) παρατηρείται γραμμική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ο ρυθμός ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας, παίρνει την τιμή της τάξεως του 0.35 και είναι κοινός και για τα δύο πάχη μόνωσης, όπως παρατηρήθηκε και στην αντίστοιχη περίπτωση με $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$

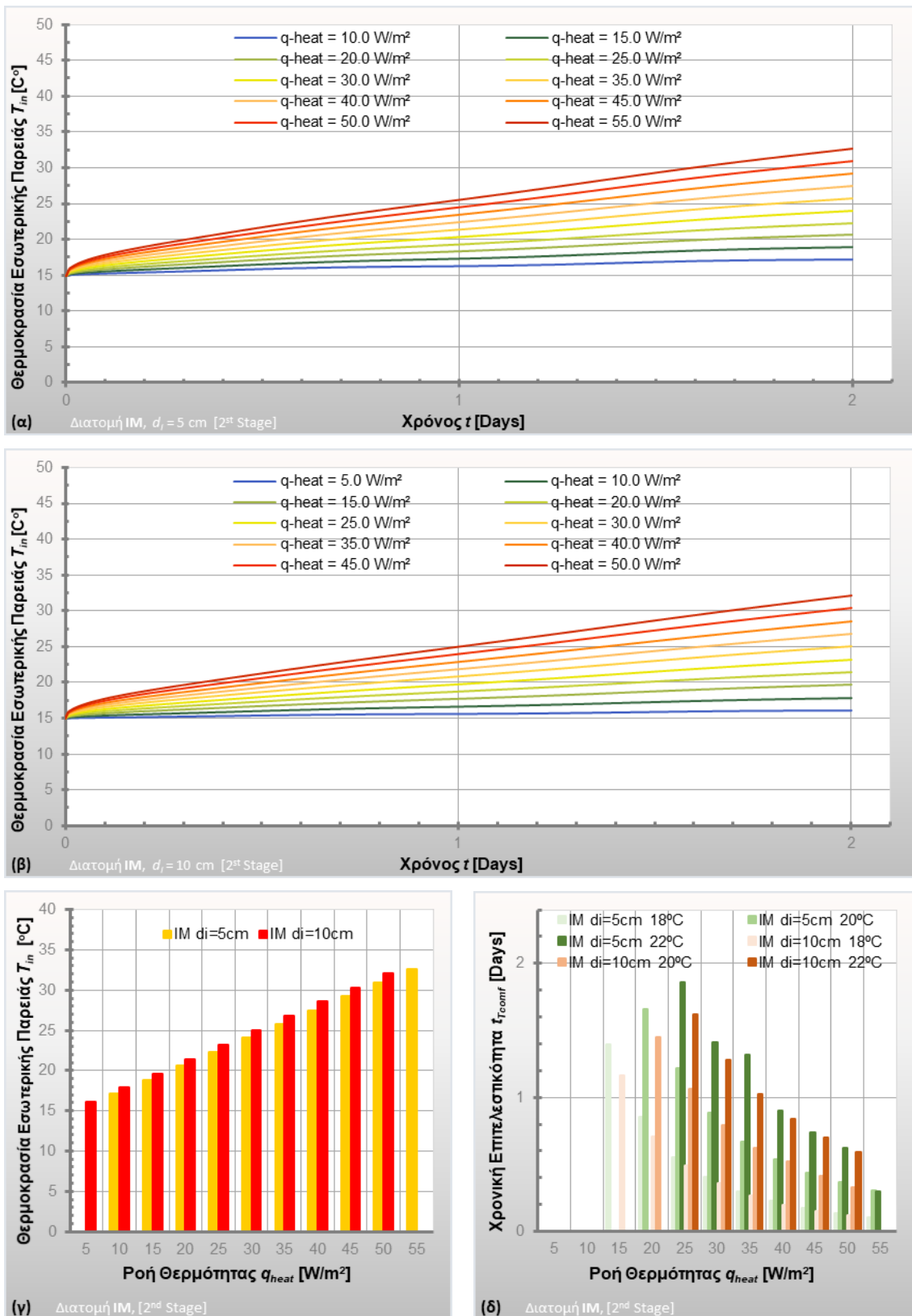
γ) ο επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης 18 °C, 20 °C, 22 °C, είναι αντιστρόφως ανάλογος των τιμών που λαμβάνει το q_{heat} όπως είναι αναμενόμενο, μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της τιμής της ροής θερμότητας, λαμβάνει δε μεγαλύτερες τιμές για $d_i=5\text{cm}$ και λίγο μικρότερες για $d_i=10\text{cm}$.

δ) η διατομή $d_i=5\text{cm}$ για τιμή του $q_{heat} = 10 \text{ W/m}^2$ δεν φτάνει σε επίπεδο των επιθυμητών θερμοκρασιών, μέσα στο επιβαλλόμενο χρονικό διάστημα των 2 ημερών, ενώ για τιμή του $q_{heat} = 15 \text{ W/m}^2$ φτάνει στους 18 °C κατά τη 2^η ημέρα. Για $q_{heat} = 25 \text{ W/m}^2$ επιτυγχάνονται όλες οι θερμοκρασίες στόχευσης, σε μεγάλους επιτελεστικούς χρόνους (22 °C, σε 2 ημέρες) και στη συνέχεια με μεγαλύτερη ισχύ θερμικής ροής επιτυγχάνονται οι απαιτούμενες θερμοκρασίες σε χρόνο που μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της τιμής θερμικής ροής. Για τη μέγιστη τιμή θερμικής ροής 55 W/m², το σύστημα επιτυγχάνει τις απαιτούμενες θερμοκρασίες σε χρόνους της τάξεως 2.5-7 ώρες.

ε) η διατομή $d_i=10\text{cm}$ για χαμηλές τιμές του q_{heat} (5-10 W/m²) δεν φτάνει στις θερμοκρασίες στόχευσης μέσα στο επιβαλλόμενο χρονικό διάστημα των 2 ημερών. Για τιμή $q_{heat} = 15 \text{ W/m}^2$ η θερμοκρασία φτάνει στους 18 °C, στις αρχές της δεύτερης ημέρας. Με $q_{heat} = 20 \text{ W/m}^2$ η θερμοκρασία φθάνει στους 20 °C τη δεύτερη ημέρα και στη συνέχεια με μεγαλύτερη ισχύ θερμικής ροής (>25 W/m²) επιτυγχάνονται οι απαιτούμενες θερμοκρασίες σε χρόνο που μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της τιμής θερμικής ροής. Για τη μέγιστη τιμή θερμικής ροής 50 W/m², το σύστημα επιτυγχάνει τις απαιτούμενες θερμοκρασίες σε χρόνους της τάξεως 3-14 ώρες.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i=5\text{cm}$ σε $d_i=10\text{cm}$ για διατομή ΙΜ οδηγεί σε:

- μικρή αύξηση των μέγιστων τιμών θερμοκρασίας ανά τιμή q_{heat}
- αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας και κοινή τιμή ρυθμού ανόδου μέγιστης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το q_{heat}
- εκθετική μείωση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασιών θερμικής άνεσης, με την αύξηση των τιμών του q_{heat}



Σχήμα 5-17: $T_{out}=10 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του χρόνου για τιμές του q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} για $d_i=5\text{cm}$ & $d_i=10\text{cm}$.

5.3.2.2 Διατομή ΜΙ

Στο σχήμα 5-18 απεικονίζεται το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσει του χρόνου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5$ °C και $T_{initial} = 15$ °C, για διατομή ΜΙ και για τα δύο πάχη θερμομόνωσης.

Στο σχήμα 5-18 α) απεικονίζονται τα διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 5$ cm.

Οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} σε χρονικό διάστημα 2 ημερών, είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$
10.0 W/m ²	24.158 °C
15.0 W/m ²	30.740 °C
20.0 W/m ²	37.217 °C
25.0 W/m ²	43.590 °C
30.0 W/m ²	49.853 °C
35.0 W/m ²	56.008 °C
40.0 W/m ²	62.059 °C
45.0 W/m ²	68.011 °C
50.0 W/m ²	73.869 °C
55.0 W/m ²	79.638 °C

Στο σχήμα 5-18 β) απεικονίζονται τα διαγράμματα του εύρους των τιμών θερμοκρασίας T_{in} για πάχος θερμομόνωσης $d_i = 10$ cm.

Οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για τις διάφορες τιμές q_{heat} σε χρονικό διάστημα 2 ημερών, είναι οι εξής:

q_{heat}	$T_{in,max}$
5.0 W/m ²	22.566 °C
10.0 W/m ²	34.263 °C
15.0 W/m ²	45.725 °C
20.0 W/m ²	56.880 °C
25.0 W/m ²	67.739 °C
30.0 W/m ²	78.322 °C
35.0 W/m ²	88.646 °C

40.0 W/m ²	98.728 °C
45.0 W/m ²	108.627 °C
50.0 W/m ²	118.482 °C

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-18 α), β), γ) και δ) παρατηρούνται τα εξής:

α) οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για το σύστημα της διατομής με $d_i=5\text{cm}$ είναι χαμηλότερες από αυτές για $d_i=10\text{cm}$

β) παρατηρείται γραμμική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ο ρυθμός ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας, παίρνει την τιμή της τάξεως του 1.24 για $d_i=5\text{cm}$ και 2.12 για $d_i=10\text{cm}$, αντίστοιχα με τη διατομή ΜΙ, με $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$

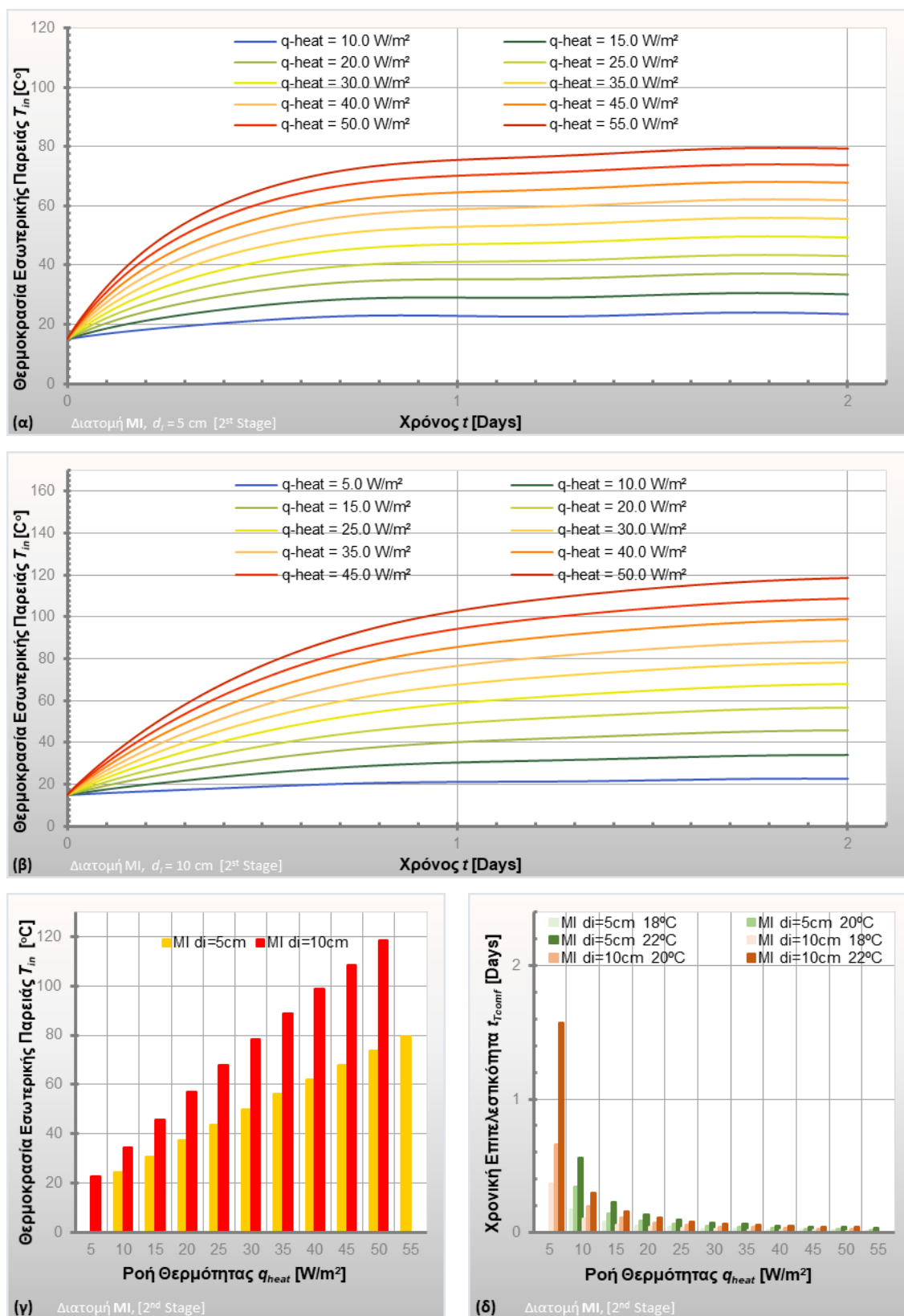
γ) ο επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης 18 °C, 20 °C, 22 °C, είναι αντιστρόφως ανάλογος των τιμών που λαμβάνει το q_{heat} όπως είναι αναμενόμενο, μειώνεται εκθετικά, λαμβάνει δε μεγαλύτερες τιμές για $d_i=5\text{cm}$ και λίγο μικρότερες για $d_i=10\text{cm}$.

δ) η διατομή $d_i=5\text{cm}$, για χαμηλές τιμές του q_{heat} (10 W/m²) φτάνει στους 18 °C σε ~4 ώρες και τους 22 °C σε ~13 ώρες. Όσο αυξάνεται η τιμή του q_{heat} , σταδιακά, και με μικρότερες τιμές του επιτελεστικού χρόνου, <7 ώρες επιτυγχάνει τις επιθυμητές θερμοκρασίες, και καταλήγει, με μεγαλύτερες τιμές ισχύος θερμικής ροής (55 W/m²), να φθάνει στις θερμοκρασίες στόχευσης σε χρόνο μικρότερο της 1 ώρας.

ε) η διατομή $d_i=10\text{cm}$, για χαμηλές τιμές του q_{heat} (5 W/m²) φτάνει τις θερμοκρασίες στόχευσης σε 9-38 ώρες, ενώ αυξανόμενης της τιμής θερμικής ροής, ο επιτελεστικός χρόνος μειώνεται εκθετικά και καταλήγει, με μεγαλύτερες τιμές ισχύος θερμικής ροής (50 W/m²), να φθάνει στις θερμοκρασίες στόχευσης σε χρόνο μικρότερο της 1 ώρας.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i=5\text{cm}$ σε $d_i=10\text{cm}$ για διατομή ΙΜ οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση των μέγιστων τιμών θερμοκρασίας ανά τιμή q_{heat}
- αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας καθώς και αύξηση του ρυθμού ανόδου μέγιστης θερμοκρασίας
- μείωση του επιτελεστικού χρόνου θερμοκρασιών θερμικής άνεσης



Σχήμα 5-18: $T_{out}=10 \pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , διατομής MI, συναρτήσει του χρόνου, για τιμές q_{heat} για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} για $d_i=5\text{cm}$ & $d_i=10\text{cm}$.

5.3.2.3 Διατομές IM-MI, $d_i=5\text{cm}$

Στο σχήμα 5-19 απεικονίζονται συγκριτικά το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσεως του χρόνου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$, για διατομές IM και MI με κοινό πάχος θερμομόνωσης $d_i=5\text{cm}$.

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-19 α), β), γ) και δ) συνάγονται τα εξής:

α) οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας που επιτυγχάνονται για το σύστημα της διατομής IM είναι χαμηλότερες από αυτές για MI. Οι τιμές για τη διατομή IM είναι της τάξεως $17-33^\circ\text{C}$, για τιμές q_{heat} , $10-55 \text{ W/m}^2$. Για τη διατομή MI οι τιμές των μεγίστων θερμοκρασιών κυμαίνονται από $24-80^\circ\text{C}$ για τις αντίστοιχες τιμές q_{heat} .

β) παρατηρείται και για τις δύο διατομές γραμμική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ο ρυθμός ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας, παίρνει την τιμή της τάξεως του 0.35 για IM και 1.24 για MI

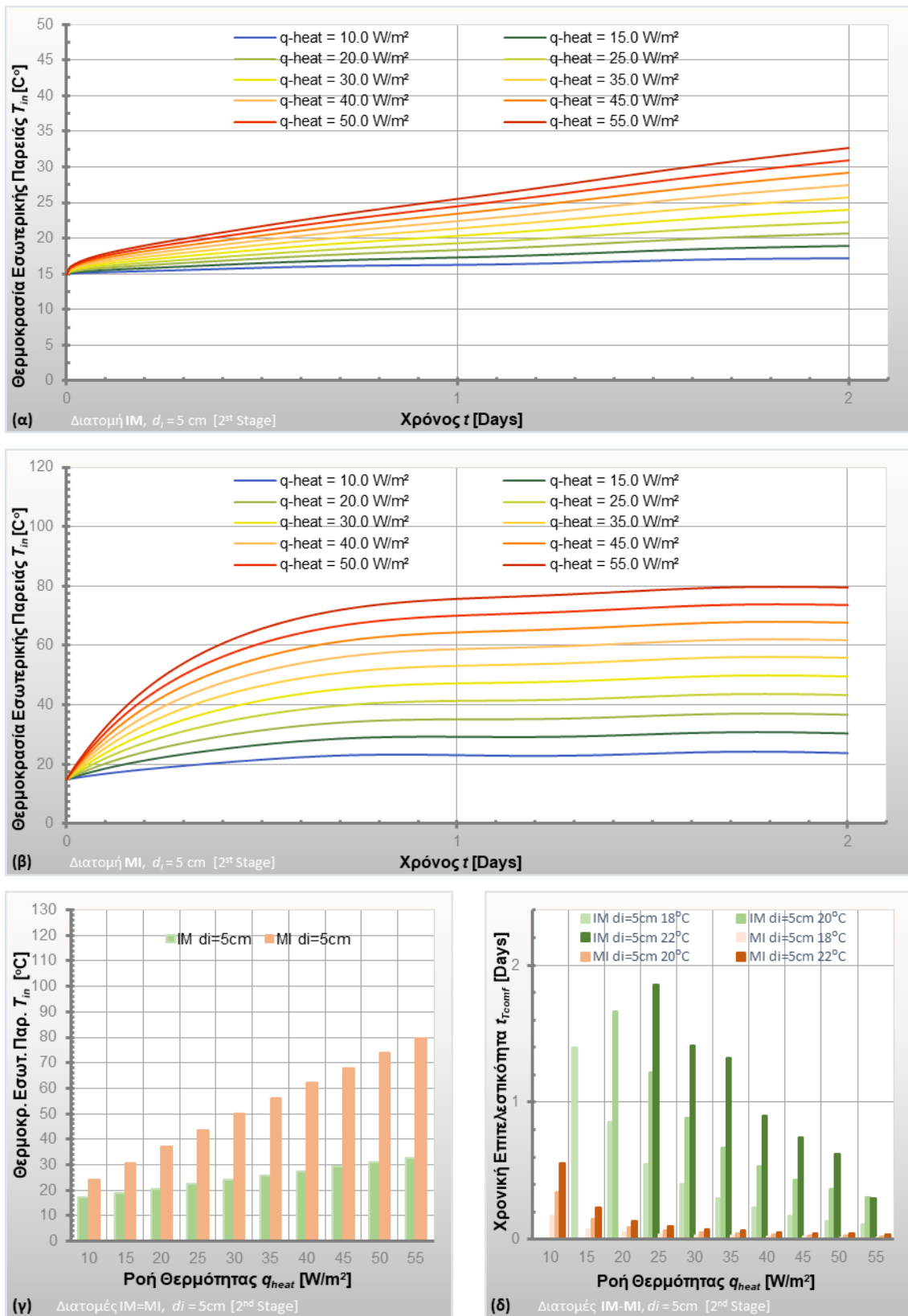
γ) ο επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης 18°C , 20°C , 22°C , για τις δύο διατομές είναι αντιστρόφως ανάλογος των τιμών που λαμβάνει το q_{heat} όπως είναι αναμενόμενο, μειώνεται εκθετικά, για τη διατομή IM λαμβάνει μεγάλες τιμές και αρκετά μικρότερες για διατομή MI. Η διατομή IM, φτάνει και στις τρεις θερμοκρασίες στόχευσης για ισχύ θερμικής ροής $>25 \text{ W/m}^2$, ενώ η MI επιτελεί το στόχο και για μικρές τιμές ισχύος.

δ) η διατομή IM στις μεγάλες τιμές q_{heat} , καταλήγει στις θερμοκρασίες στόχευσης σε 3-7 ώρες ενώ η διατομή MI το επιτυγχάνει αυτό από λίγα λεπτά έως μία ώρα.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αλλαγή στη θέση της θερμομόνωσης από IM σε MI για πάχος θερμομόνωσης $d_i=5\text{cm}$ οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας
- σημαντική αύξηση του ρυθμού ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας
- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου των θερμοκρασιών στόχευσης

Παρατηρούμε αντίστοιχα συμπεράσματα με τα αυτά των διατομών IM-MI $d_i=5\text{cm}$ για θερμοκρασία $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$



Σχήμα 5-19: $T_{out}=10\pm 5^\circ\text{C}$, $T_{initial}=15^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , συναρτήσει του χρόνου, για τιμές q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχενσης, συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$ για IM & MI.

5.3.2.4 Διατομές IM-MI, $d_i=10\text{cm}$

Στο σχήμα 5-20 απεικονίζονται συγκριτικά το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσεως του χρόνου, για τις διάφορες τιμές q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$, για διατομές IM και MI με κοινό πάχος θερμομόνωσης $d_i=10\text{cm}$.

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-20 α), β), γ) και δ) συνάγονται τα εξής:

α) οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας που επιτυγχάνονται για το σύστημα της διατομής IM είναι σημαντικά χαμηλότερες από αυτές για MI. Οι τιμές για τη διατομή IM είναι της τάξεως $16\text{-}32^\circ\text{C}$, για τιμές q_{heat} , $5\text{-}50\text{ W/m}^2$. Για τη διατομή MI οι τιμές των μεγίστων θερμοκρασιών κυμαίνονται από $23\text{-}119^\circ\text{C}$ για τις αντίστοιχες τιμές q_{heat} .

β) παρατηρείται και για τις δύο διατομές γραμμική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} , ενώ ο ρυθμός ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας, παίρνει την τιμή της τάξεως του 0.35 για IM και 2.12 για MI

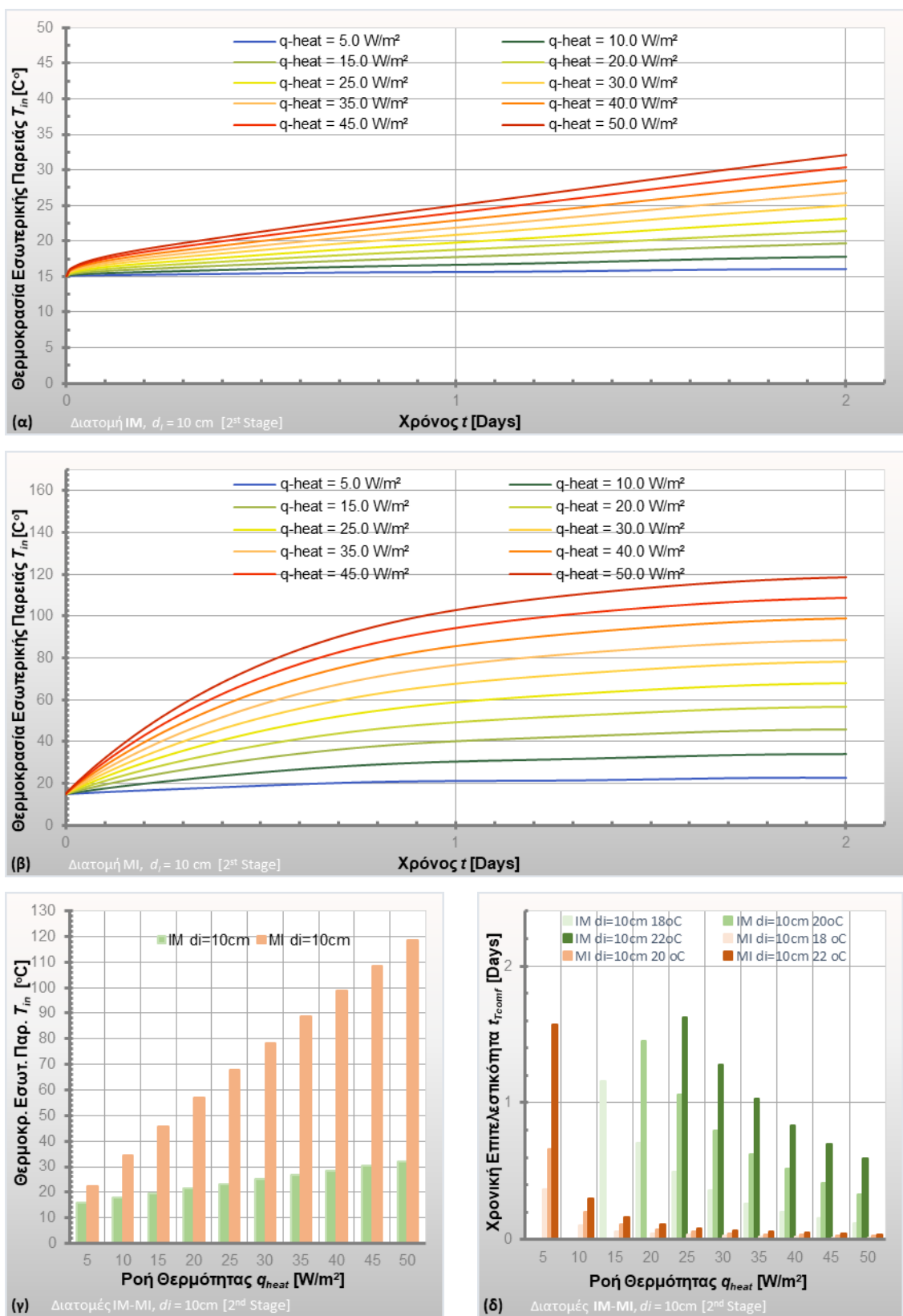
γ) ο επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης 18°C , 20°C , 22°C , για τις δύο διατομές είναι αντιστρόφως ανάλογος των τιμών που λαμβάνει το q_{heat} όπως είναι αναμενόμενο, μειώνεται εκθετικά, για τη διατομή IM λαμβάνει μεγάλες τιμές, ενώ για διατομή MI αρκετά μικρότερες. Η διατομή IM, φτάνει και στις τρεις θερμοκρασίες στόχευσης για ισχύ θερμικής ροής $>25\text{ W/m}^2$, ενώ η MI επιτελεί το στόχο από την αρχική τιμή ισχύος που μελετάμε (5 W/m^2)

δ) η διατομή IM στις μεγάλες τιμές q_{heat} , καταλήγει στις θερμοκρασίες στόχευσης σε $3\text{-}7$ ώρες ενώ η διατομή MI το επιτυγχάνει αυτό από λίγα λεπτά έως μία ώρα.

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αλλαγή στη θέση της θερμομόνωσης από IM σε MI για πάχος θερμομόνωσης $d_i=10\text{cm}$ οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας
- σημαντική αύξηση του ρυθμού ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας
- σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου των θερμοκρασιών στόχευσης

Παρατηρούμε αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτά των διατομών IM-MI $d_i=10\text{cm}$, για $T_{out} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$



Σχήμα 5-20: $T_{out}=10\pm5^{\circ}\text{C}$, $T_{initial}=15^{\circ}\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτ. παρείας T_{in} , συναρτήσει του χρόνου για τιμές q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$, για: α) διατομή IM, β) διατομή MI. γ) Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρείας και δ) Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών θερμικής άνεσης, συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$ για IM & MI.

5.3.2.5 Επιτελεστική θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους – Διατομή IM

Στο σχήμα 5-21 απεικονίζονται οι θερμοκρασίες εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσει της ροής θερμότητας q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$, για διατομή IM και πάχη θερμομόνωσης $d_i = 5\text{cm}$ και $d_i = 10\text{cm}$, όπως μελετώνται σε καθορισμένους χρόνους: 1, 2, 3, 6, 12 και 24 ώρες.

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-21 α), β) και γ) συνάγονται τα εξής:

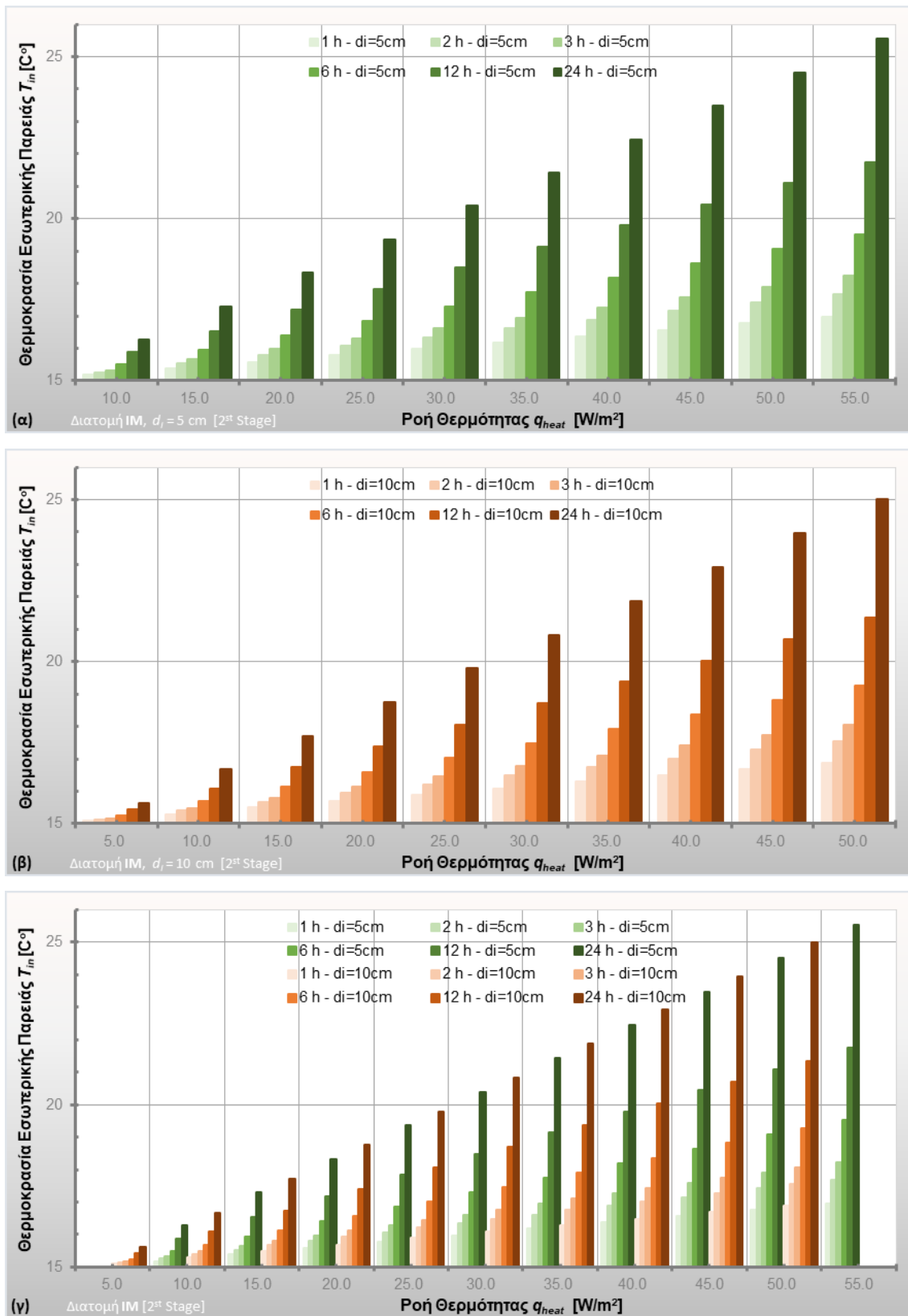
α) παρατηρείται και για τις δύο διατομές γραμμική αύξηση της επιτελεστικής θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους, σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} . Μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει η διατομή $d_i = 10\text{cm}$ σε σχέση με τη διατομή $d_i = 5\text{cm}$, ενώ ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας 24ώρου σε συνάρτηση με το q_{heat} είναι κοινός για τα δύο πάχη και παίρνει τιμή 0.39

β) η διατομή $d_i = 5\text{cm}$ για τιμές q_{heat} 10-15 W/m^2 δεν επιτυγχάνει θερμοκρασίες στόχευσης στο πρώτο 24ωρο. Από την τιμή των 20 W/m^2 φθάνει στους 18°C σχεδόν σε 19 ώρες, ενώ με ισχύ πάνω από 35 W/m^2 επιτυγχάνονται όλες οι θερμοκρασίες στόχευσης στο διάστημα του 24ώρου. Στη μέγιστη ισχύ των 55 W/m^2 σε χρονικό διάστημα 2 ωρών μπορεί να επιτευχθεί η πρώτη θερμοκρασία στόχευσης των 18°C , ενώ σε διάστημα 24ώρου η θερμοκρασία θα λάβει τιμή της τάξης των 25.55°C

γ) η διατομή $d_i = 10\text{cm}$ για τιμές $q_{heat} = 5-15 \text{ W/m}^2$ δεν επιτυγχάνει θερμοκρασίες στόχευσης στο πρώτο 24ωρο. Από την τιμή των 20 W/m^2 φθάνει στους 18°C σχεδόν σε 18 ώρες, ενώ με ισχύ πάνω από 35 W/m^2 επιτυγχάνονται όλες οι θερμοκρασίες στόχευσης στο διάστημα του 24ώρου. Στη μέγιστη ισχύ των 50 W/m^2 σε χρονικό διάστημα 3 ωρών μπορεί να επιτευχθεί η πρώτη θερμοκρασία στόχευσης των 18°C , ενώ σε διάστημα 24ώρου η θερμοκρασία θα λάβει τιμή της τάξης των 25°C

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i = 5\text{cm}$ σε $d_i = 10\text{cm}$ για διατομή IM οδηγεί σε:

- αύξηση της επιτελεστικής θερμοκρασίας σε καθορισμένους χρόνους
- κοινό ρυθμό ανόδου της θερμοκρασίας



Σχήμα 5-21: $T_{out}=10\pm5^{\circ}\text{C}$, $T_{initial}=15^{\circ}\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} , διατομής IM, συναρτήσει του q_{heat} , σε καθορισμένους χρόνους, για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$, γ) συγκριτικά και για τα δύο πάχη μόνωσης.

5.3.2.6 Επιτελεστική θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους – Διατομή ΜΙ

Στο σχήμα 5-22 απεικονίζονται οι θερμοκρασίες εσωτερικής παρειάς T_{in} συναρτήσει της ροής θερμότητας q_{heat} , για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ και $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$, για διατομή ΜΙ και πάχη θερμομόνωσης $d_i = 5\text{cm}$ και $d_i = 10\text{cm}$, όπως μελετώνται σε καθορισμένους χρόνους: 1, 2, 3, 6, 12 και 24 ώρες.

Βάσει των ανωτέρω και από τα σχήματα 5-14 α), β) και γ) συνάγονται τα εξής:

α) παρατηρείται και για τις δύο διατομές γραμμική αύξηση της επιτελεστικής θερμοκρασίας εσωτερικής παρειάς σε καθορισμένους χρόνους, σε συνάρτηση με την αύξηση του q_{heat} . Η διατομή $d_i = 10\text{cm}$ λαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη διατομή $d_i = 5\text{cm}$, ενώ ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας 24ώρου σε συνάρτηση με το q_{heat} , για $d_i = 5\text{cm}$ παίρνει τιμή της τάξεως 1.17, ενώ για $d_i = 10\text{cm}$ την τιμή της τάξεως 1.80

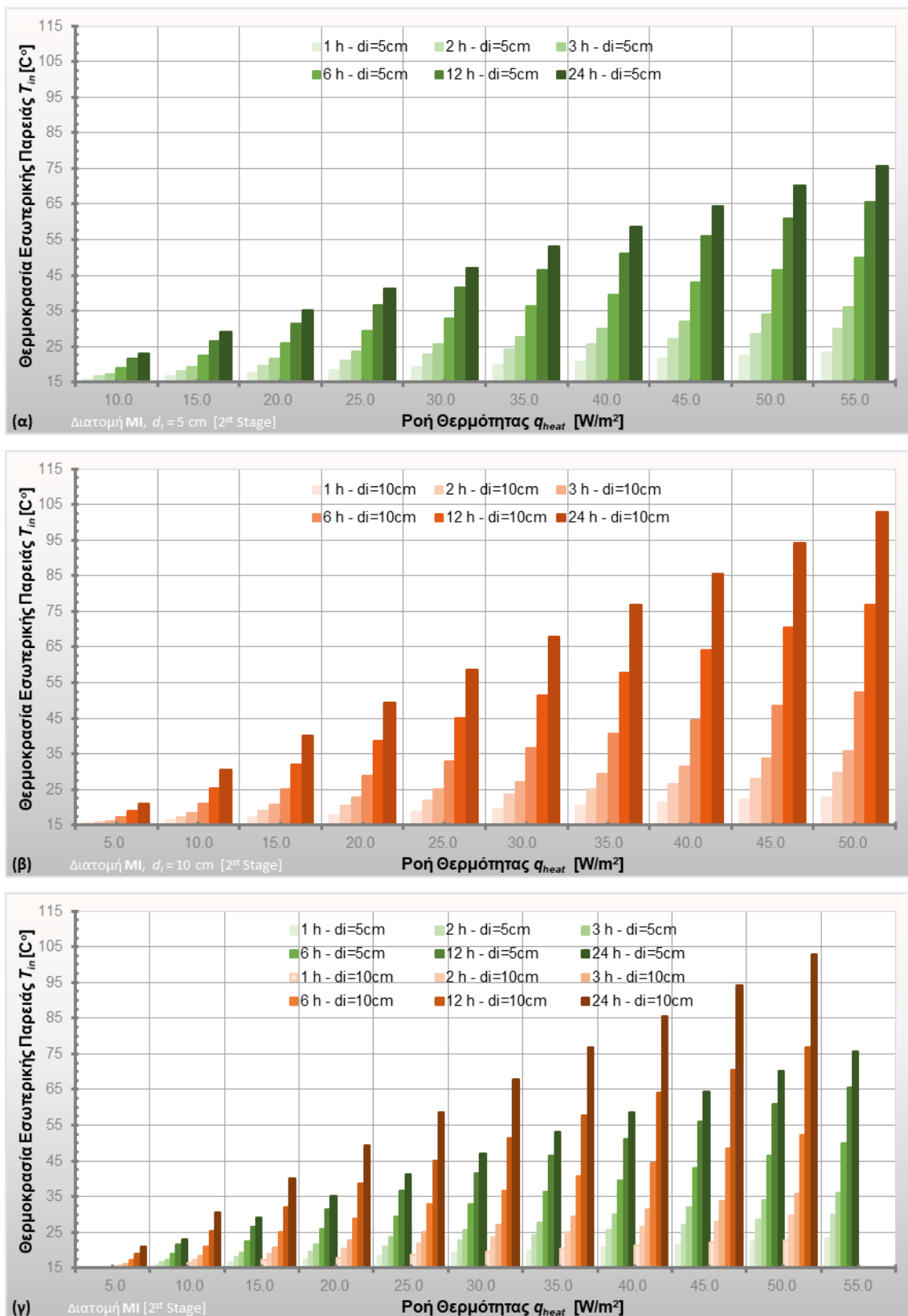
β) η διατομή $d_i = 5\text{cm}$ για τιμή $q_{heat} = 10\text{W/m}^2$ φθάνει στους 18°C σχεδόν σε 5 ώρες, στους 20°C σε 8 ώρες, στους 22°C σε 16 ώρες, ενώ σε 24 ώρες καταλήγει σε θερμοκρασία της τάξεως των 23°C . Αυξανόμενης της τιμής θερμικής ροής, οι θερμοκρασίες στόχευσης επιτυγχάνονται σε ολοένα και μικρότερους χρόνους. Στη μέγιστη ισχύ των 55W/m^2 μέσα στην πρώτη κιόλας ώρα επιτυγχάνεται θερμοκρασία της τάξης των 23°C , ενώ σε διάστημα 24ώρου η θερμοκρασία θα λάβει τιμή της τάξης των 75°C

γ) η διατομή $d_i = 10\text{cm}$ για τιμή $q_{heat} = 5\text{W/m}^2$ φθάνει στους 18°C σχεδόν σε 9 ώρες, στους 20°C σε 18 ώρες, ενώ σε 24 ώρες καταλήγει σε θερμοκρασία της τάξεως των 21°C . Αυξανόμενης της τιμής θερμικής ροής, οι θερμοκρασίες στόχευσης επιτυγχάνονται σε ολοένα και μικρότερους χρόνους. Στη μέγιστη ισχύ των 50W/m^2 μέσα στην πρώτη κιόλας ώρα επιτυγχάνεται θερμοκρασία της τάξης των 23°C , ενώ σε διάστημα 24ώρου η θερμοκρασία θα λάβει τιμή της τάξης των 103°C

Από την ανάλυση συνάγεται ότι η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης από $d_i = 5\text{cm}$ σε $d_i = 10\text{cm}$ για διατομή ΜΙ οδηγεί σε:

- σημαντική αύξηση της επιτελεστικής θερμοκρασίας σε καθορισμένους χρόνους
- αύξηση του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας

Παρατηρούμε αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτά των διατομών ΜΙ για $T_{out} = 10 \pm 5^\circ\text{C}$



Σχήμα 5-22: $T_{out}=10\pm5^{\circ}\text{C}$, $T_{initial}=15^{\circ}\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} , διατομής ΜΙ, συναρτήσει του q_{heat} , σε καθορισμένους χρόνους, για: α) για $d_i=5\text{cm}$ και β) για $d_i=10\text{cm}$, γ) συγκριτικά και για τα δύο πάχη μόνωσης.

6. Συμπεράσματα και δυνατότητες μελλοντικής έρευνας

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται σύντομη ανακεφαλαίωση, παρατίθενται αναλυτικά συμπεράσματα, ενώ αξιολογούνται τα εξαγόμενα της παρούσας έρευνας, όπως αυτά αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Τέλος προτείνονται πεδία για περεταίρω μελλοντική έρευνα.

6.1 Ανακεφαλαίωση διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η θερμική απόκριση συμβατικών κατασκευαστικών διατάξεων, οι οποίες εκτίθενται εξωτερικά σε περιοδικές θερμοκρασιακές φορτίσεις δύο διαφορετικών ημερών του χειμώνα, ενώ εσωτερικά επιβάλλεται καθορισμένη ροή θερμότητας. Η μελέτη διενεργήθηκε σε δύο φάσεις και σε αυτές διερευνήθηκε η συμβολή της ροής θερμότητας που επιβλήθηκε σε εσωτερικό χώρο, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την κατασκευαστική διάταξη και το πάχος θερμομόνωσης, προκειμένου στη δεύτερη φάση να επιτευχθούν τρεις θερμοκρασιακοί στόχοι, στο εύρος της θερμικής άνεσης.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν αφορούν στις τιμές των θερμοκρασιών της εσωτερικής παρείας των διατομών που μελετήθηκαν.

6.2 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων θερμικής ανάλυσης

Σε αυτή την παράγραφο παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης και αναλύεται η επιρροή όλων των επιμέρους παραμέτρων που διαμόρφωσαν τη θερμική συμπεριφορά του εξεταζόμενου συστήματος.

6.2.1 Επιρροή αύξησης πάχους μόνωσης

Φάση 1 (1st Stage)

Η αύξηση του πάχους της θερμομονωτικής στρώσης από $d_i=5cm$ σε $d_i=10cm$, για συγκεκριμένη κατασκευαστική διάταξη (IM-MI), σταθερή θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος T_{out} και $T_{initial}$, στο οποίο επιβάλλονται καθορισμένες τιμές q_{heat} έχει ως αποτέλεσμα:

- Σχετικά με τον επιτελεστικό χρόνο θερμικής ισορροπίας, η αύξηση του πάχους d οδηγεί σε σημαντική αύξηση του επιτελεστικού χρόνου ισορροπίας, σε ποσοστό 74% για διάταξη IM, ενώ φτάνει το 200% για διάταξη MI.
- Όσον αφορά στο πλάτος κύματος του ημιτονοειδούς διαγράμματος στην κατάσταση ισορροπίας, η αύξηση πάχους θερμομόνωσης προκαλεί μείωση του πλάτους κύματος και κατά συνέπεια της θερμοκρασιακής διακύμανσης ελαχίστου-μεγίστου κατά το ήμισυ.
- Σε σχέση με τη θερμοκρασία ισορροπίας του συστήματος, η αύξηση του πάχους θερμομόνωσης, οδηγεί σε σημαντική αύξηση των τιμών ισορροπίας του συστήματος, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος. Εμφανίζει δε ποσοστό αύξησης μέχρι και 77% για $T_{out} = 0 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ για $T_{out} = 10 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ η αύξηση φτάνει μέχρι και 59%.
- Αναφορικά με το ρυθμό ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας ισορροπίας, παρατηρείται αύξηση, κατά την αύξηση πάχους της μονωτικής στρώσης.
- Ως προς τον επιτελεστικό χρόνο του 95% της θερμοκρασίας ισορροπίας T_{in} , η αύξηση πάχους του μονωτικού υλικού προκαλεί σημαντική αύξηση του χρόνου αυτού σχεδόν στο διπλάσιο.
- Επί προσθέτως, η αύξηση του πάχους d , προκαλεί μείωση σχεδόν κατά το ήμισυ, της τιμής της απαιτούμενης q_{heat} που οδηγεί τις διατομές σε θερμοκρασία ισορροπίας $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Φάση 2 (2nd Stage)

Η αύξηση του πάχους της θερμομονωτικής στρώσης από $d_i=5\text{cm}$ σε $d_i=10\text{cm}$, για συγκεκριμένη κατασκευαστική διάταξη (IM-MI), σταθερή θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος T_{out} και $T_{initial}$, στο οποίο επιβάλλονται καθορισμένες τιμές q_{heat} έχει ως αποτέλεσμα:

- Σχετικά με τη μέγιστη θερμοκρασία ανά q_{heat} που επιτυγχάνεται στο δεδομένο διάστημα των δύο ημερών, η αύξηση πάχους της θερμομόνωσης, επηρεάζει διαφορετικά τις διαφορετικές κατασκευαστικές διατάξεις, οδηγεί δε, σε μικρή αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας ανά τιμή q_{heat} , της τάξεως των $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ στις διατομές IM, ενώ στις διατομές MI προκαλεί αύξηση των μέγιστων θερμοκρασιών της τάξεως των $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και στα δύο θερμοκρασιακά προφίλ.
- Όσον αφορά το ρυθμό ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας ανά q_{heat} , αύξηση του πάχους d_i επηρεάζει διαφορετικά τις διαφορετικές κατασκευαστικές διατάξεις, δεν επηρεάζει

το ρυθμό ανόδου στη διάταξη IM, οδηγεί δε σε σημαντική αύξηση στις τιμές του ρυθμού ανόδου, στη διάταξη MI.

- Αναφορικά με τη ροή θερμότητας, σε σχέση με τις θερμοκρασίες στόχευσης, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του πάχους μονωτικής στρώσης, οδηγεί στην επίτευξη των θερμοκρασιών στόχευσης για χαμηλότερες τιμές q_{heat} .
- Ως προς τον επιτελεστικό χρόνο των θερμοκρασιών στόχευσης, για τις μέγιστες τιμές q_{heat} , η αύξηση του πάχους d επηρεάζει διαφορετικά τις διαφορετικές κατασκευαστικές διατάξεις. Στη διατομή IM, παρατηρείται σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου, της τάξεως των 7h, ενώ στη διατομή MI, οι διαφορές είναι ελάχιστες, αφού για τις τιμές της θερμικής ροής που μελετάμε, οι επιτελεστικοί χρόνοι είναι μικρότεροι της μίας ώρας.
- Οι μέγιστες επιτελεστικές θερμοκρασίες σε συγκεκριμένους χρόνους 1h, 2h, 3h, 6h, 12h, και 24h, αυξάνονται με την αύξηση του πάχους θερμομόνωσης, η μεταβολή αυτή δε, εξαρτάται από την κατασκευαστική διάταξη. Έτσι, για τη διάταξη IM, οι εσωτερικές θερμοκρασιακές μεταβολές είναι της τάξεως των 1.2 °C και για τα δύο θερμοκρασιακά προφίλ, ενώ για τη διάταξη MI, είναι της τάξεως των 30 °C.

6.2.2 Επιρροή κατασκευαστικής διάταξης

Φάση 1 (1st Stage)

Η αλλαγή στη θέση της θερμομόνωσης από εξωτερική (IM), σε εσωτερική (MI), με σταθερό πάχος (d_i), σταθερή θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος T_{out} και $T_{initial}$, στο οποίο επιβάλλονται καθορισμένες τιμές q_{heat} έχει ως αποτέλεσμα:

- Σχετικά με τον επιτελεστικό χρόνο θερμικής ισορροπίας, η αλλαγή της κατασκευαστικής διάταξης οδηγεί σε σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου ισορροπίας, σε ποσοστό που αγγίζει σχεδόν το 95%.
- Όσον αφορά στο πλάτος κύματος του ημιτονοειδούς διαγράμματος στην κατάσταση ισορροπίας, η αλλαγή της θέσης θερμομόνωσης προκαλεί αύξηση του πλάτους κύματος και κατά συνέπεια της θερμοκρασιακής διακύμανσης ελαχίστου-μεγίστου κατά περίπου 6.5 φορές.
- Σε σχέση με τη θερμοκρασία ισορροπίας του συστήματος, δεν παρατηρείται καμία μεταβολή κατά την αλλαγή θέσης θερμομόνωσης.

- Αναφορικά με το ρυθμό ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας ισορροπίας, δεν παρατηρείται καμία μεταβολή κατά την αλλαγή θέσης θερμομόνωσης.
- Ως προς τον επιτελεστικό χρόνο του 95% της θερμοκρασίας ισορροπίας T_{in} , η αλλαγή της κατασκευαστικής διάταξης προκαλεί σημαντική μείωση του χρόνου αυτού κατά 87% για πάχος μόνωσης $di=5cm$, ενώ για $di=10cm$, 93%.
- Επί προσθέτως, η αλλαγή της κατασκευαστικής διάταξης, δεν επηρεάζει την τιμή της απαιτούμενης q_{heat} που οδηγεί τις διατομές σε θερμοκρασία ισορροπίας 15 °C.

Φάση 2 (2nd Stage)

Η αλλαγή στη θέση της θερμομόνωσης από εξωτερική (IM), σε εσωτερική (MI), με σταθερό πάχος (di), σταθερή θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος T_{out} και $T_{initial}$, στο οποίο επιβάλλονται καθορισμένες τιμές q_{heat} έχει ως αποτέλεσμα:

- Σχετικά με τη μέγιστη θερμοκρασία ανά q_{heat} που επιτυγχάνεται στο δεδομένο διάστημα των δύο ημερών, η αλλαγή διάταξης, επηρεάζει διαφορετικά τα διαφορετικά πάχη θερμομόνωσης, οδηγεί δε, σε αύξηση θερμοκρασίας σε ποσοστό 29-268% (μέγιστη-ελάχιστη θερμοκρασία) για πάχος μόνωσης $di=5cm$. Για $di=10cm$ προκαλεί αύξηση των θερμοκρασιών σε ποσοστό 49-365% (μέγιστη-ελάχιστη θερμοκρασία)
- Όσον αφορά το ρυθμό ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας ανά q_{heat} , η αλλαγή διάταξης προκαλεί σημαντική αύξηση στις τιμές του ρυθμού ανόδου.
- Αναφορικά με τη ροή θερμότητας σε σχέση με τις θερμοκρασίες στόχευσης, παρατηρήθηκε μείωση των απαιτούμενων τιμών του q_{heat} που οδηγεί στην επίτευξη των θερμοκρασιών στόχευσης, με την αλλαγή θέσης θερμομόνωσης.
- Ως προς τον επιτελεστικό χρόνο των θερμοκρασιών στόχευσης, για τις μέγιστες τιμές q_{heat} , η αλλαγή διάταξης οδηγεί σε σημαντική μείωση του επιτελεστικού χρόνου. Η μείωση που παρατηρείται εξαρτάται από την εξωτερική θερμοκρασία και το πάχος της θερμομόνωσης. Η μεταβολή είναι σημαντική της τάξεως των 3-14h για τις διατομές $T_{out} = 0\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ για $T_{out} = 10\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, οι μεταβολές είναι της τάξεως των 2.5-7h για $di=5cm$, , ενώ είναι ελάχιστες για $di=10cm$, αφού για τιμές της θερμικής ροής που μελετάμε, οι επιτελεστικοί χρόνοι είναι μικρότεροι της μίας ώρας.
- Οι μέγιστες επιτελεστικές θερμοκρασίες σε συγκεκριμένους χρόνους 1h, 2h, 3h, 6h, 12h, και 24h αυξάνονται με την αλλαγή της κατασκευαστικής διάταξης, η μεταβολή αυτή δε, εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης. Έτσι για πάχος μόνωσης $di=5cm$ οι εσωτερικές θερμοκρασιακές μεταβολές είναι της τάξεως των 50 °C και για τις δύο

κατασκευαστικές διατάξεις, ενώ για πάχος μόνωσης $di=10\text{cm}$, είναι της τάξεως των 80 °C.

6.2.3 Επιρροή θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Φάση 1 (1st Stage)

Η άνοδος της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος από $T_{out} = 0 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{initial} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, σε $T_{out} = 10 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{initial} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, για συγκεκριμένη κατασκευαστική διάταξη (IM-MI), με δεδομένο πάχος θερμομόνωσης (di), στο οποίο επιβάλλονται καθορισμένες τιμές q_{heat} έχει ως αποτέλεσμα:

- Σχετικά με τον επιτελεστικό χρόνο θερμικής ισορροπίας, δηλαδή τον απαραίτητο χρόνο ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες σφαλμάτων λόγω αρχικών συνθηκών, ενώ οι μέγιστες και ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες, να εμφανίζουν αντίστοιχα, ημερήσια απόκλιση της τάξεως του 0.005 °C. Μεταβολή της θερμοκρασίας T_{out} και $T_{initial}$, δεν ασκεί επιρροή στον επιτελεστικό χρόνο ισορροπίας.
- Όσον αφορά στο πλάτος κύματος του ημιτονοειδούς διαγράμματος στην κατάσταση ισορροπίας, αυτό παραμένει σταθερό, όταν μεταβάλλεται η εξωτερική θερμοκρασία.
- Σε σχέση με τη θερμοκρασία ισορροπίας του συστήματος, όταν μεταβάλλεται η εξωτερική θερμοκρασία κατά 10 °C έχει ως αποτέλεσμα την ισάριθμη άνοδο της θερμοκρασίας ισορροπίας.
- Αναφορικά με το ρυθμό ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας ισορροπίας, δε σημειώνεται καμία μεταβολή, με την άνοδο της θερμοκρασίας.
- Ως προς τον επιτελεστικό χρόνο του 95% της θερμοκρασίας ισορροπίας T_{in} , η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μία μικρή μείωση του χρόνου αυτού.
- Επί προσθέτως, αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας κατά 10 °C, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση κατά 66% της απαιτούμενης q_{heat} που οδηγεί τις διατομές σε θερμοκρασία ισορροπίας 15 °C.

Φάση 2 (2nd Stage)

Η άνοδος της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος από $T_{out} = 0 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{initial} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, σε $T_{out} = 10 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{initial} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, για συγκεκριμένη κατασκευαστική διάταξη (IM-MI), με δεδομένο πάχος θερμομόνωσης (di), στο οποίο επιβάλλονται καθορισμένες τιμές q_{heat} έχει ως αποτέλεσμα:

- Σχετικά με τη μέγιστη θερμοκρασία ανά q_{heat} που επιτυγχάνεται στο δεδομένο διάστημα των δύο ημερών, η αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας, επηρεάζει διαφορετικά τις διαφορετικές κατασκευαστικές διατάξεις, οδηγεί δε, σε αύξηση θερμοκρασίας της τάξεως του $1\text{-}1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ στις διατομές IM, ενώ στις διατομές MI προκαλεί αύξηση των μέγιστων θερμοκρασιών της τάξεως των $8\text{-}9 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Όσον αφορά το ρυθμό ανόδου της μέγιστης θερμοκρασίας ανά q_{heat} , η αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας δεν προκαλεί μεταβολές στις τιμές του ρυθμού ανόδου.
- Αναφορικά με τη ροή θερμότητας σε σχέση με τις θερμοκρασίες στόχευσης, παρατηρήθηκε μείωση των απαιτούμενων τιμών του q_{heat} που οδηγεί στην επίτευξη των θερμοκρασιών στόχευσης.
- Ως προς τον επιτελεστικό χρόνο των θερμοκρασιών στόχευσης, για τις μέγιστες τιμές q_{heat} , η αύξηση της θερμοκρασίας, οδηγεί σε μείωση του επιτελεστικού χρόνου. Η μείωση αυτή εξαρτάται από την κατασκευαστική διάταξη και το πάχος της θερμομόνωσης. Η μεταβολή είναι μεγάλη για τις διατομές IM, με μικρότερη μεταβολή, της τάξεως της 1h για $di=5\text{cm}$, της τάξεως των 6 h για $di=10\text{cm}$, ενώ για διατομές MI οι μεταβολές είναι μικρότερες, αφού για τιμές της θερμικής ροής που μελετάμε, οι επιτελεστικοί χρόνοι είναι μικρότεροι της μίας ώρας.
- Οι μέγιστες επιτελεστικές θερμοκρασίες σε συγκεκριμένους χρόνους 1h, 2h, 3h, 6h, 12h, και 24h αυξάνονται με τη αύξηση της θερμοκρασίας, η αύξηση αυτή δε, εξαρτάται από την κατασκευαστική διάταξη της διατομής. Έτσι για την κατασκευαστική διάταξη IM, οι εσωτερικές θερμοκρασιακές αυξήσεις είναι της τάξεως του $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και για τα δύο πάχη μόνωσης, ενώ για τη διάταξη MI, είναι της τάξεως των $8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.3 Ερμηνεία αποτελεσμάτων θερμικής ανάλυσης

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προηγήθηκαν, προκύπτουν τα εξής:

- Η αύξηση του πάχους d_i του μονωτικού υλικού, με συνέπεια την αύξηση της θερμικής αντίστασης και ως εκ τούτου, τη μείωση των φορτίων μετάδοσης, συντελεί στην αύξηση των θερμοκρασιών ισορροπίας καθώς και του χρόνου επίτευξης θερμικής ισορροπίας. Επιπροσθέτως, μειώνονται οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και βελτιώνονται οι συνθήκες στο εσωτερικό. Παράλληλα οδηγεί στη μείωση της τιμής του απαιτούμενου q_{heat} για την επίτευξη καθορισμένης θερμοκρασίας. Όσον αφορά στη δεύτερη φάση της ανάλυσης, η αύξηση του πάχους μονωτικής στρώσης, οδηγεί σε αύξηση τελικών θερμοκρασιών, ενώ είναι πιο αποτελεσματική για προφίλ εσωτερικής θερμομόνωσης, αφού επιτυγχάνει υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας, σε χαμηλότερο επιτελεστικό χρόνο και με μικρότερες τιμές q_{heat} .
- Η αλλαγή στη θέση της μονωτικής στρώσης, από την εξωτερική (IM) σε εσωτερική (MI), οδηγεί στη μείωση του επιτελεστικού χρόνου θερμικής ισορροπίας, όπως αυτό είναι αναμενόμενο, λόγω της άμεσης επίδρασης με τη θερμομονωτική στρώση. Άμεση επίπτωση είναι η αύξηση της θερμοκρασιακής διακύμανσης του χώρου. Σχετικά με τη δεύτερη φάση της μελέτης, η αλλαγή της θέσης θερμομόνωσης, οδηγεί σε αύξηση των μέγιστων θερμοκρασιών, με καλύτερα αποτελέσματα στα μεγαλύτερα πάχη μόνωσης και μείωση των απαιτήσεων ροής θερμότητας, προς επίτευξη των θερμοκρασιών στόχευσης. Παράλληλα, έχει μεγάλη επιρροή στον επιτελεστικό χρόνο των θερμοκρασιών στόχευσης, προκαλώντας μείωση ιδιαίτερα στο χαμηλό θερμοκρασιακό προφίλ εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ δεν παρατηρείται μεγάλη μεταβολή στους ήδη εξαιρετικά χαμηλούς επιτελεστικούς χρόνους στις υψηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες. Τέλος, για συγκεκριμένους χρόνους, επιτυγχάνεται αύξηση των επιτελεστικών θερμοκρασιών, με ευμενέστερες συνθήκες στις υψηλότερες θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος.
- Η άνοδος της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος, συντελεί στην άνοδο της θερμοκρασίας ισορροπίας του συστήματος με ταυτόχρονη μείωση των τιμών του απαιτούμενου q_{heat} για την επίτευξη των θερμοκρασιών. Για τη δεύτερη φάση, η επιρροή της αύξησης εξωτερικής θερμοκρασίας ποικίλει ανάλογα με το είδος της κατασκευαστικής διάταξης, με καλύτερα αποτελέσματα στη διάταξη MI. Παράλληλα

δημιουργεί μικρότερες απαιτήσεις q_{heat} , όπως επίσης και μείωση του επιτελεστικού χρόνου, για την επίτευξη των θερμοκρασιών στόχευσης. Τέλος επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα στις μέγιστες επιτελεστικές θερμοκρασίες για συγκεκριμένους χρόνους.

6.4 Δυνατότητες μελλοντικής έρευνας

Κατόπιν λεπτομερούς ανάλυσης των αποτελεσμάτων, εντοπίζονται κάποια θέματα που επιδέχονται περεταίρω διερεύνησης. Διαμορφώνονται έτσι κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- Επέκταση της μελέτης, με διερεύνηση των θερμοκρασιών εξωτερικής παρειάς.
- Εφαρμογή αντίστοιχης μεθοδολογίας προσέγγισης για τη μελέτη επιρροής σε διαφορετικές κτιριακές δομές.
- Εφαρμογή μελέτης σε διαφορετικά κλιματικά προφίλ και διερεύνηση της επιρροής φορτίων ψύξης για την επίτευξη θερμοκρασιών στόχευσης στο εύρος της θερμικής άνεσης.
- Οικονομοτεχνική μελέτη και αποτίμηση της καταναλισκόμενης ενέργειας, προς επίτευξη των στοχεύσεων.
- Μελέτη της επιρροής στις παραμέτρους της θερμικής αδράνειας της κατασκευής.

Βιβλιογραφία

Al-Sanea S.A. (1999), Evaluation of Heat Transfer Characteristics of Building Wall Elements, J. King Saud Univ., Vol. 12, Eng. Sci. (2), (1999) 285-313 (1420/2000), [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30720-7](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30720-7)

Al-Sanea S.A., Zedan M.F. (2001), Effect of Insulation Location on Initial Transient Thermal Response of Building Walls, Journal of Thermal ENV. &BLDG. SCI. Vol. 24-April 2001, <https://doi-org.proxy.eap.gr/10.1106/07E7-FGCJ-MFF7-974W>

Al-Sanea S.A., Zedan M.F. (2011), “Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass”, Applied Energy 88 (2011), 3113-3124, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.036>

Al-Sanea S.A., Zedan M.F., Al-Hussain S.N. (2012), “Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential”, Applied Energy 102 (2012), 10430-442, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.009>

Al-Sanea S.A., Zedan M.F., Al-Hussain S.N. (2013), “Effect of masonry material and surface absorptivity on critical thermal mass in insulated building walls”, Applied Energy 102 (2013), 1063-1070, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.016>

Asan H. (1998), Effects of Wall’s insulation thickness and position on time lag and decrement factor, Energy and Building 28 (1998) 299-305, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00030-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00030-9)

Asan H. (2000), “Investigation of wall’s optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view”, Energy and Buildings 32 (2000) 197-203, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00044-X)

Asan H., Sancaktar Y.S. (1998), Effects Of Wall’s thermophysical properties of time lag and decrement factor, Energy and Buildings 28 (1998) 159-166, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00007-3)

Cengel Y.A. (2002) “Heat Transfer, A Practical Approach”, second edition 2002
EN1992-1-2 (2004) Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-2 : General Rules -Structural Fire Design, European Standard

Georgiadis-Filiras K. (2015), “Behavior of thermal insulation materials under fire conditions with reference to their position within building envelopes, Ph.D. Thesis (2015), Aristotle University of Thessaloniki, Greece, ND: 35980 [in Greek].

Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. (2007), “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, JOHN WILEY & SONS, sixth edition 2007

Jin X. , Zhang X., Cao Y., Wang G. (2012) , Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor, Energy and Buildings 47 (2012) 369-374, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.010>

Kontoleon K.J., Bikas D.K. (2007), The effect of south wall’s outdoor absorption coefficient on time lag, decrement factor and temperature variations, Science Direct, Energy and Buildings 39 (2007) 1011-1018, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.11.006>

Kontoleon K.J., Eumorfopoulou E.A. (2008), The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region, Renewable Energy 33 (2008) 1652-1664, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.008>

Kontoleon K.J., .Theodosiou Th.G, Tsikaloudaki K.G. (2013), “The influence of concrete density and conductivity on walls’ thermal inertia parameters under a variety of masonry and insulation placements”, Applied Energy 112 (2013) 325-337, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.029>

Mavromatidis L.E. , El Mankibi M., Michel P., Santamouris M. (2012), “Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climating zones”, Applied Energy 92 (2012) 480-491, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.007>

Ozel M. (2011), Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials, Applied Thermal Engineering 31 (2011) 3854-3863, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.07.033>

Ozel M. (2012), The influence of exterior surface solar absorptivity on thermal characteristics and optimum insulation thickness, Renewable Energy 39 (2012) 347-355, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.039>

Ozel M. (2014), “Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness”, Energy and Buildings 72 (2014) 288-295, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.015>

Sjöström J. , Jansson R. (2012), Measuring thermal material properties for structural fire engineering, in: 15th Int. Conf. Exp. Mech., Porto 2012

Tsilingiris P.T. (2003) , Thermal flywheel effects on the time varying conduction heat transfer through structural walls, Energy and Buildings 35 (2003) 1037-1047

Tsilingiris P.T. (2006) , The influence of heat capacity and its spatial distribution on the transient wall thermal behavior under the effect of harmonically time-varying driving forces, Building and Environment 41 (2006) 590-601, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00053-7)

Ulgen K. (2002), Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, Energy and Buildings 34 (2002) 273-278, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00087-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00087-1)

Αξαρχλή Κ., Γιαννας Σ., Ευαγγελινός Ε., Ζαχαρόπουλος Η., Μάρδα Ν. (2001) , «Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου», Τόμος Α, ΕΑΠ (2001)

Κατσαπρακάκης Δ., Μονιάκης Μ. (2015), «ΘΕΡΜΑΝΣΗ -ΨΥΞΗ-ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ», Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας & Σύνθεσης Ενεργειακών Συστημάτων Τ.Ε.Ι. Κρήτης, ΣΕΑΒ 2015

Κοντολέων Κ.Ν. «Μοντελοποίηση Διάδοσης Θερμότητας με θερμικό κυκλωματικό μοντέλο προς ανάλυση θερμικής αδράνειας και συμπεριφοράς διατομών τοιχοποιίας και ζωνών κτιρίου», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 2006

Νικολός Ι.Κ., «Σημειώσεις μαθήματος μετάδοση θερμότητας», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά 2007

Παπαδάκης Ε.Γ. (2017), «Εισαγωγή στα Φαινόμενα & τις Διεργασίες Μεταφοράς», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, Αγρίνιο 2017

ΤΕΕ (2011), «ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΠΙΘΕΩΡΗΤΩΝ, ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ», Α' ΕΚΔΟΣΗ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2011

Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017 (2017) ,ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ, (2017)

Διαδικτυακές πηγές

“ COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual”

https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf,

retrieved 14/07/2022

COMSOL DOCUMENTATION doc.comsol.com,

<https://doc.comsol.com/6.0/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>

retrieved 14/07/2022

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.

ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΣΗ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΑΡΕΙΑΣ, ΣΥΝΑΦΩΝ ΜΕ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΗ ΡΟΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Περσεφόνη Ψυλλάκη¹, Κάρολος-Νικόλαος Κοντολέων²

¹Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο,
Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα

²Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστημιούπολη ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη

email:¹ std048610@ac.eap.gr, ² kontoleon@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η θερμική απόκριση κατακόρυφων διατομών κτιριακού κελύφους, οι οποίες εκτίθενται εξωτερικά σε περιοδικές θερμοκρασιακές φορτίσεις, για δύο θερμοκρασιακά διαφορετικές χειμερινές ημέρες, ενώ εσωτερικά επιβάλλεται καθορισμένη ροή θερμότητας. Η θερμική ανάλυση διενεργήθηκε με τη χρήση του λογισμικού COMSOL Multiphysics, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων – διαφορών. Τα εξαγόμενα των προσομοιώσεων αφορούν στις τιμές θερμοκρασίας στην εσωτερική παρειά της διατομής. Αναλύεται η επιρροή της επιβαλλόμενης ροής θερμότητας, συναρτήσει των δυναμικά μεταβαλλόμενων εξωτερικών συνθηκών, της κατασκευαστικής διάταξης και του πάχους θερμομόνωσης. Στην πρώτη φάση διερευνήθηκε η συμβολή της επιβαλλόμενης ροής θερμότητας, στην επίτευξη καθορισμένης μέσης θερμοκρασίας ισορροπίας. Στη δεύτερη φάση, αναζητείται το εύρος τιμών της ροής θερμότητας που θα πρέπει να επιβληθεί, ώστε με αφετηρία τη θερμοκρασία ισορροπίας, να επιτευχθούν οι επιλεγμένες θερμοκρασίες στόχευσης, στο εύρος της θερμικής άνεσης, στο μικρότερο δυνατό επιτελεστικό χρόνο. Ερευνάται επίσης η επιτελεστική θερμοκρασία, σε καθορισμένους χρόνους.

Λέξεις κλειδιά: Ροή θερμότητας, Επιτελεστικός χρόνος, Αρχική τιμή θερμοκρασίας (initial value), Μεταβολή θερμοκρασίας, Πάχος θερμομόνωσης

ABSTRACT

The present thesis analyzes the thermal response of vertical construction sections of a building shell, which are externally exposed to periodic temperature loadings, for two temperature-different winter days, while a defined heat flow is imposed internally. The thermal analysis was performed using the COMSOL Multiphysics software, with the finite element-differences method. The simulations outputs refer to the cross-sections' inner face temperature values. The influence of the imposed heat flow, as a function of the dynamically changing external conditions, the construction arrangement and thermal insulation thickness, is analyzed. In the first phase, the contribution of the imposed heat flow has been investigated, in order to reach a defined average balance temperature. In the second phase, the range of the heat flow values that should be imposed is sought, in order to reach the selected target temperatures, in the thermal comfort range, in the shortest possible effective time, starting from the balance temperature. The effective temperature at specified times, is also investigated.

Key words: Heat flow, Effective time, Initial value, Temperature variations, Thermal insulation thickness

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται συνεχώς ως αποτέλεσμα της αύξησης του πληθυσμού και της ανόδου του βιοτικού επιπέδου. Μεγάλο μέρος της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται για την ψύξη και θέρμανση των χώρων κυρίως σε κτίρια κατοικιών. Το γεγονός οφείλεται στη μετάδοση θερμότητας μέσω του κελύφους του κτιρίου, λόγω των ακραίων εξωτερικών συνθηκών που επικρατούν. Ο σωστός σχεδιασμός του κελύφους ενός κτιρίου και των στοιχείων του είναι ένα μέσο για την αποτελεσματική μείωση των απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης-ψύξης. Η θερμομόνωση είναι ένας από τους πιο σημαντικούς τρόπους για την επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια. Στα παθητικά συστήματα, οι θερμικές μάζες στους τοίχους και τις στέγες κτιρίων λειτουργούν ως στοιχεία θερμικής αποθήκευσης που συμβάλλουν στη μείωση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια (Al-Sanea *et al.*, 2013, Al-Sanea *et al.*, 2011, Ozel, 2014)

Η διαφορά θερμοκρασίας μέσα σε ένα σώμα ή μεταξύ διαφορετικών σωμάτων που βρίσκονται σε αλληλεπίδραση έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά ενέργειας (θερμότητας στην περίπτωση μας). Η μεταφορά θερμότητας οδηγεί στην αλλαγή θερμοκρασιών και την απώλεια θερμότητας μέχρι το σύστημα να ισορροπήσει. Η μεταφορά θερμότητας είναι ο κύριος μηχανισμός εκδήλωσης των περιβαλλοντικών μεταβολών στο εσωτερικό των κτηρίων. (Cengel, 2002)

Στη διατομή του εξωτερικού κελύφους ενός κτιρίου, υπάρχουν πολλές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις σε κάθε στιγμή της ημέρας. Αυτές οι διακυμάνσεις εξαρτώνται από την εσωτερική θερμοκρασία, της εξωτερική θερμοκρασία και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του τοίχου. Το φαινόμενο της περιοδικής αλλαγής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, οδηγεί στη δημιουργία νέων

θερμοκρασιακών προφίλ κατά τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου. Ο ρυθμός πρόσληψης ή απομάκρυνσης θερμότητας ενός δομικού στοιχείου, ονομάζεται θερμική αδράνεια και συναρτάται από το πάχος d , τη θερμική αντίσταση R και τη θερμική μάζα C των υλικών του κελύφους. Ο λεπτομερής καθορισμός της θερμικής αδράνειας ενός κελύφους κτιρίου μπορεί να οδηγήσει σε έναν ολιστικό βιοκλιματικό σχεδιασμό, για το λόγο ότι ο υπολογισμός των παραμέτρων της, παρέχει έναν έμμεσο δείκτη των συνθηκών θερμικής άνεσης εσωτερικού χώρου. Παράλληλα προσφέρει τη δυνατότητα σύλληψης στρατηγικών για τη μείωση των απαιτήσεων σε ενεργειακό φορτίο και κατά συνέπεια στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Επιπλέον, είναι ευρέως γνωστό ότι το πάχος της θερμομόνωσης, η επιλογή δομικών υλικών και το πρότυπο κατασκευής επηρεάζουν την ικανότητα ενός κτιρίου να διατηρεί τη θερμότητα, προς μείωση της συμβατικής κατανάλωσης ενέργειας το χειμώνα και αποφυγή υπερθέρμανσης το καλοκαίρι. (Mavromatidis *et al.*, 2012)

Στην παρούσα μελέτη θα εξεταστεί η θερμική απόκριση $T(t)$, διατομών εξωτερικής τοιχοποιίας οι οποίες εκτίθενται εξωτερικά σε περιοδικές θερμοκρασιακές φορτίσεις, ενώ εσωτερικά επιβάλλεται καθορισμένη ροή θερμότητας. Η μελέτη θα εστιάσει στη συμβολή της ροής θερμότητας που θα επιβληθεί στο εσωτερικό, για την επίτευξη θερμοκρασιών που ανήκουν στο εύρος της θερμικής άνεσης, σε σύντομο χρονικό διάστημα στον υπό μελέτη χώρο, λαμβάνοντας υπόψιν τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν και τα χαρακτηριστικά των διατομών.

2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

2.1. Κατασκευαστικές διατομές και υλικά

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας εξετάστηκαν διαφορετικές συνθέσεις

τοιχοποιίας κτιριακού κελύφους (Σχήμα 1), με θερμομόνωση. Τα υλικά δόμησης είναι: α) υλικό πλήρωσης (οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 25cm), β) υλικό θερμομόνωσης (πετροβάμβακας μεταβλητού πάχους), γ) επίχρισμα (συνθετικό κονίαμα πάχους 1 cm).

Ειδικότερα, ο πετροβάμβακας μελετήθηκε για δύο πάχη (5cm και 10cm), για να δοθεί έμφαση στην επίδραση της μεταβολής του πάχους της θερμομόνωσης στο χρόνο ανόδου της εσωτερικής θερμοκρασίας του συστήματος μελέτης. Τα ανωτέρω υλικά θεωρούνται δε ομογενή και ισότροπα.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών, απεικονίζονται στον Πίνακα 1 και Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Υλικά και θερμοφυσικές τους ιδιότητες

ΔΟΜΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	d (cm)	λ (W/(m*K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/(kg*K))
Οπλισμένο Σκυρόδεμα ¹	25	μεταβλητό	2300	900
Πετροβάμβακας ^{2,3}	5 10	μεταβλητό	120	800
Συνθετικό κονίαμα ⁴	1	0.87	1800	1100

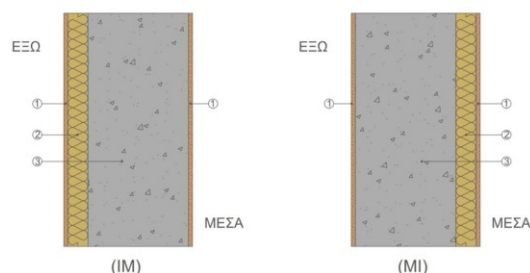
Πίνακας 2. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υλικών πλήρωσης και θερμομόνωσης

Θερμοκρ. (°C)	-20	-10	0	10	20	30	40	100
λ (W/(m*K)) οπλ. Σκυρ. ⁵	2.049	2.025	2.000	1.976	1.951	1.927	1.904	1.766
λ (W/(m*K)) πετροβ. ^{6,7}	0.0379	0.0389	0.040	0.041	0.0421	0.0433	0.0445	0.053

2.2. Συνθήκες εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για τις εξής συνθήκες:

- Ορεινή τοποθεσία της Ελλάδας
- Χειμερινοί μήνες με πολύ χαμηλές και χαμηλές θερμοκρασίες
- Δύο πάχη θερμομονωτικού υλικού



Σχήμα 1. Χαρακτηριστικές διατάξεις εξωτερικής τοιχοποιίας μελέτης.

Συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος

Οι χαρακτηριστικές διατάξεις εξωτερικής τοιχοποιίας που εξετάζονται, υποβάλλονται σε δύο διαφορετικές θερμοκρασιακές φορτίσεις εξωτερικού περιβάλλοντος, μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας, για δύο «φαινομενικά» αντιπροσωπευτικές ημέρες του χειμώνα. Η πρώτη περίπτωση αφορά σε συνθήκες κρύας χειμερινής ημέρας με χαμηλότερη θερμοκρασία $T_{min} = -5^{\circ}\text{C}$ και υψηλότερη $T_{max} = 5^{\circ}\text{C}$, μέσο όρο ημερήσιας θερμοκρασίας $T_{out_mean} = 0^{\circ}\text{C}$, ενώ στη δεύτερη περίπτωση μελετάμε τις διατομές επίσης σε συνθήκες χειμερινής ημέρας με χαμηλότερη θερμοκρασία $T_{min} = 5^{\circ}\text{C}$ και υψηλότερη $T_{max} = 15^{\circ}\text{C}$, με μέσο όρο ημερήσιας θερμοκρασίας $T_{out_mean} = 10^{\circ}\text{C}$, σε μία οποιαδήποτε ορεινή περιοχή της Ελλάδας.

Πιο αναλυτικά, οι διατομές υποβάλλονται σε περιοδικές εξωτερικές διεγέρσεις, οι οποίες αποδίδονται από τη θερμοκρασία ήλιου-αέρα T_{sa} , που περιλαμβάνει τις επιπτώσεις της ηλιακής ακτινοβολίας συνδυασμένη με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα και αλλάζει περιοδικά. Αυτή η θερμοκρασία θεωρείται ότι δείχνει ημιτονοειδείς μεταβολές κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου. Αφού η χρονική καθυστέρηση και ο συντελεστής μείωσης εξαρτώνται μόνο από το υλικό του τοίχου και όχι από κλιματολογικά δεδομένα, η εξίσωση που μας δίνει τη θερμοκρασία ηλίου-αέρα δίνεται ως εξής (Asan, 2000):

¹ EN1992-1-2 (2004) Eurocode 2

² Georgiadis-Filiras, 2015

³ Sjöström et al., 2012

⁴ T.O.T.E.E. 20701-2/2017, 2017

⁵ EN1992-1-2 (2004) Eurocode 2

⁶ Georgiadis-Filiras, 2015

⁷ Sjöström et al., 2012

$$T_{sa(t)} = \frac{|T_{\max} - T_{\min}|}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{p}t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{|T_{\max} - T_{\min}|}{2} \quad (1)$$

Συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος

Όσον αφορά στις εσωτερικές θερμοκρασιακές συνθήκες, στην πρώτη φάση της ανάλυσης, στον εσωτερικό χώρο τη χρονική στιγμή $t=0$, επικρατεί θερμοκρασία T_{in} ίση με τη μέση τιμή εξωτερικής θερμοκρασίας και το σύστημα ισορροπεί. Στη συνέχεια επιβάλλεται συνεχόμενη ροή θερμότητας q_{heat} , καθορισμένης ισχύος, που μεταβάλλεται παραμετρικά και παίρνει τιμές από 5.0 W/m^2 έως 25.0 W/m^2 με βήμα 2.5 W/m^2 , ώστε να επιτευχθεί ισορροπία. Σε αυτή τη φάση, τα αποτελέσματα θα αποκαλύψουν τη ζητούμενη τιμή ροής θερμότητας q_{heat} , η οποία οδηγεί το σύστημα σε ισορροπία με μέσο όρο εσωτερικής θερμοκρασίας 15°C .

Στη δεύτερη φάση της ανάλυσης, θα ξανατρέξουμε τους υπολογισμούς, επιβάλλοντας τη ζητούμενη ροή θερμότητας q_{heat} , η οποία προέκυψε από το προηγούμενο βήμα, για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα ώστε το σύστημα να ισορροπήσει στην ασφαλή θερμοκρασία (safe temperature) των 15°C . Την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή, επιβάλλεται ροή θερμότητας μεγαλύτερης ισχύος, για χρονικό διάστημα 2 ημερών, η οποία μεταβάλλεται παραμετρικά και παίρνει τιμές από 5.0 W/m^2 έως 60.0 W/m^2 με βήμα 5.0 W/m^2 , ώστε να επιτευχθούν οι θερμοκρασίες στόχευσης 18°C , 20°C , 22°C .

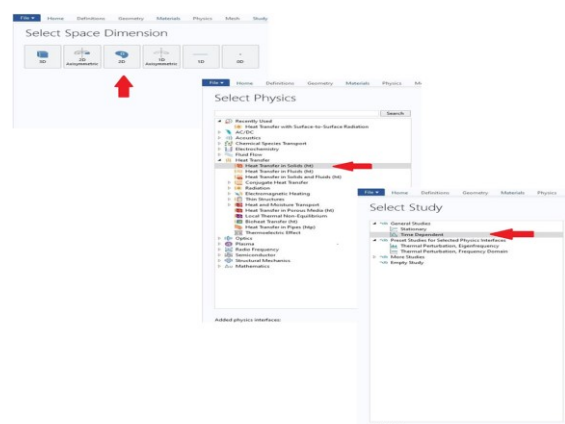
2.3. Το λογισμικό COMSOL Multiphysics

Το COMSOL Multiphysics αποτελεί ένα σημαντικό διαδραστικό περιβάλλον προσομοίωσης, το οποίο πραγματοποιεί μοντελοποιήσεις και επιλύσεις κάθε φύσης επιστημονικών και τεχνικών προβλημάτων. Διαθέτει ενσωματωμένο ένα ισχυρό περιβάλλον εργασίας με τη δυνατότητα Κατασκευής Μοντέλου (Model Builder) που παρέχει εκτενή επισκόπηση του μοντέλου και πρόσβαση σε όλες τις λειτουργίες. Το λογισμικό προσφέρεται για την εύκολη

επέκταση συμβατικών μοντέλων ενός τύπου φυσικής σε πολλαπλά μοντέλα όπου επιλύουν ταυτόχρονα συζευγμένα φυσικά φαινόμενα. Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων ορίζοντας τα σχετικά φυσικά μεγέθη, όπως ιδιότητες υλικού, φορτία, περιορισμούς, πηγές και ροές, αντί να ορίζει τις υποκείμενες εξισώσεις. Το λογισμικό δημιουργεί ακολουθίες για να καταγραφούν όλες οι διαδικασίες από τις οποίες προκύπτουν η γεωμετρία, το πλέγμα, η φυσική, οι μελέτες και οι ρυθμίσεις επίλυσης, όπως και η προβολή και η απόδοση των αποτελεσμάτων. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η παραμετροποίηση οποιουδήποτε μέρους του μοντέλου. Ο χρήστης μπορεί να διαμορφώσει διαδοχικά το μοντέλο μέσα από το πρόγραμμα, συναρτήσει των παραμέτρων που έχει θέσει αρχικά. (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)

Το περιβάλλον μοντελοποίησης του COMSOL Multiphysics

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος, επιλέγονται αρχικά οι γεωμετρικές διαστάσεις, οι τύποι της φυσικής και τέλος οι τύποι της μελέτης.



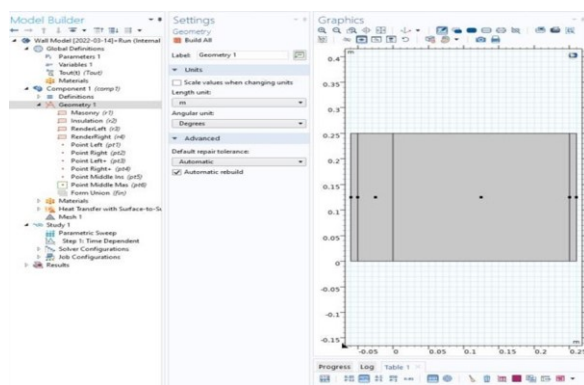
Εικόνα 1. : Εκκίνηση προγράμματος COMSOL Multiphysics. επιλογή: (α) Γεωμετρία 2 διαστάσεων, (β) Μετάδοση θερμότητας σε στερεά, (γ) Μελέτη εξαρτώμενη από το χρόνο

Στην Εικόνα 1 απεικονίζονται οι επιλογές για την παρούσα εργασία:

- (α) Γεωμετρία δύο διαστάσεων (2D)
- (β) Μετάδοση θερμότητας σε στερεά (*Heat transfer with Surface-to-Surface Radiation*)
- (γ) Μελέτη εξαρτώμενη από το χρόνο (*Time Dependent*)

Γεωμετρία (Geometry)

Για τη μοντελοποίηση της διατομής μελέτης χρησιμοποιήθηκε γεωμετρία 2 διαστάσεων (2D) (Εικόνα 2). Ορίστηκαν οι μονάδες μέτρησης και σχεδιάστηκαν σε δύο διαστάσεις οι διατομές που αναφέρονται αναλυτικά στο 2.1. Σε κάθε περίπτωση στο σημείο μηδέν των αξόνων αντιστοιχίστηκε το αριστερό άκρο του οπλισμένου σκυροδέματος, ενώ κατά περίπτωση επιλέχθηκε η εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας.



Εικόνα 2. : Μοντελοποίηση διατομής τοιχοποιίας σε 2D

Ροή θερμότητας με συναγωγή

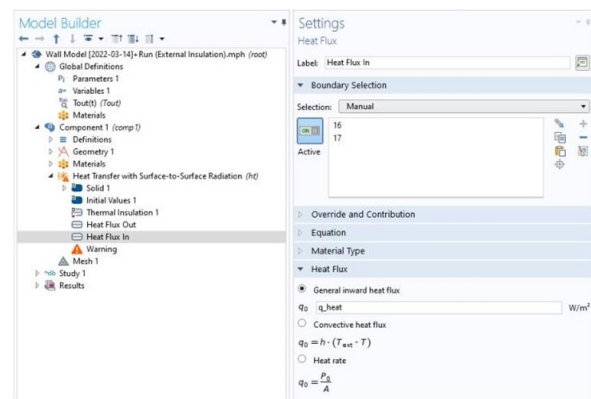
Η ροή θερμότητας με συναγωγή, ως οριακή συνθήκη σε ένα θερμαινόμενο σώμα, στην εκτεθειμένη προς τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες παρειά, υπολογίζεται με βάση το συντελεστή θερμικής μετάβασης και τη διαφορά θερμοκρασίας και δίνεται από τον τύπο: (COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual)(Εικόνα 3)

$$q = h * (T_{ext} - T) \quad (2)$$

Ελήφθησαν συντελεστής θερμικής μετάβασης για την εξωτερική επιφάνεια $h = 25 \text{ W/(m}^2/\text{K)}$ για χειμερινές συνθήκες, ενώ

για τη θερμοκρασία T_{ext} η εξίσωση (1) που αποδίδει την τιμή T_{out} .

Στην εσωτερική πλευρά επιβάλλεται συνεχόμενη ροή θερμότητας q_{heat} , σταθερής ισχύος, που στην 1^η φάση, παίρνει τις τιμές από 5.0 W/m^2 έως 25.0 W/m^2 με βήμα 2.5 W/m^2 (9 τιμές), ενώ στη 2^η φάση της ανάλυσης, επιβάλλεται ροή θερμότητας για χρονικό διάστημα ώστε το σύστημα να ισορροπήσει στους 15°C (safe temperature). Την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή, επιβάλλεται ροή θερμότητας μεγαλύτερης ισχύος, για χρονικό διάστημα 2 ημερών, η οποία μεταβάλλεται παραμετρικά και παίρνει τιμές από 5.0 W/m^2 έως 60.0 W/m^2 με βήμα 5.0 W/m^2 , ώστε να επιτευχθούν οι θερμοκρασίες στόχευσης 18°C , 20°C , 22°C .



Εικόνα 3. : Ορισμός της τιμής σταθερής ροής θερμότητας q_{heat} του εσωτερικού περιβάλλοντος

Μεθοδολογία διερεύνησης

Η διεξαγωγή της παρούσας μελέτης διακρίνεται σε δύο φάσεις:

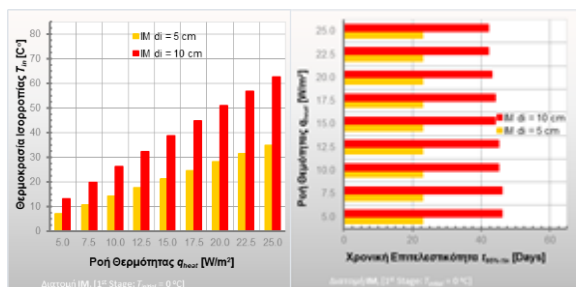
α) στην πρώτη φάση, αναζητείται η τιμή της ροής θερμότητας, η οποία οδηγεί, κατά περίπτωση, σε ισορροπία με μέσο όρο εσωτερικής θερμοκρασίας 15°C .

β) στη δεύτερη φάση της ανάλυσης, αναζητείται το εύρος των τιμών του q_{heat} , που με το χαμηλότερο επιτελεστικό χρόνο θα οδηγήσει στις θερμοκρασίες στόχευσης. Συνολικά διερευνήθηκαν 312 περιπτώσεις.

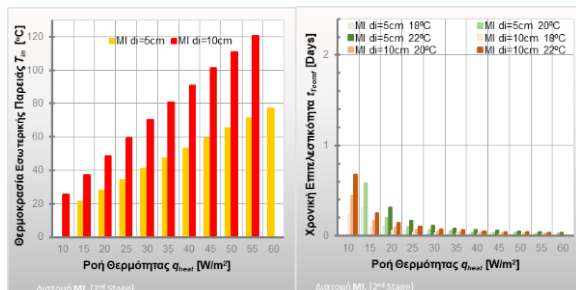
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Επιρροή αύξησης πάχους μόνωσης

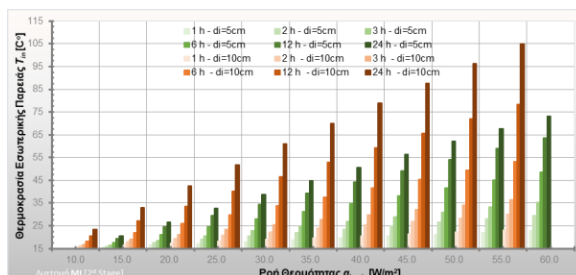
Η αύξηση του πάχους d_i του μονωτικού υλικού, με συνέπεια την αύξηση της θερμικής αντίστασης και, τη μείωση των φορτίων μετάδοσης, συντελεί στην αύξηση των θερμοκρασιών ισορροπίας καθώς και του χρόνου επίτευξης θερμικής ισορροπίας. (Σχήμα 2). Επιπροσθέτως, μειώνονται οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και βελτιώνονται οι συνθήκες στο εσωτερικό. Παρατηρείται μείωση της τιμής του q_{heat} για την επίτευξη καθορισμένης θερμοκρασίας.



Σχήμα 2: 1^η φάση, $T_{out}=0\pm5^\circ\text{C}$, Θερμοκρασία ισορροπίας T_{in} , διατομής IM, συναρτήσε του q_{heat} , και Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσε του q_{heat} , για $d_i=5\text{cm}$ και $d_i=10\text{cm}$.



Σχήμα 3: 2^η φάση, $T_{out}=0\pm5^\circ\text{C}$. Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , διατομής MI, συναρτήσε του q_{heat} και Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσε του q_{heat} για $d_i=5\text{cm}$ & $d_i=10\text{cm}$.

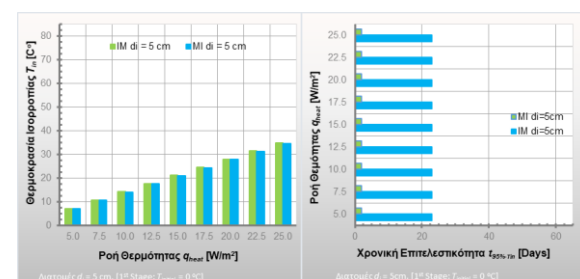


Σχήμα 4: 2^η φάση, $T_{out}=0\pm5^\circ\text{C}$. Θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} , διατομής MI, συναρτήσε του q_{heat} , σε καθορισμένους χρόνους, για $d_i=5\text{cm}$ και $d_i=10\text{cm}$.

Όσον αφορά στη δεύτερη φάση της ανάλυσης, η αύξηση του πάχους μονωτικής στρώσης, οδηγεί σε αύξηση των τελικών θερμοκρασιών, ενώ είναι πιο αποτελεσματική για προφίλ εσωτερικής θερμομόνωσης (MI) (Σχήμα 3 & 4), αφού επιτυγχάνει υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας, σε χαμηλότερο επιτελεστικό χρόνο και με μικρότερες τιμές q_{heat} .

3.2. Επιρροή κατασκευαστικής διάταξης

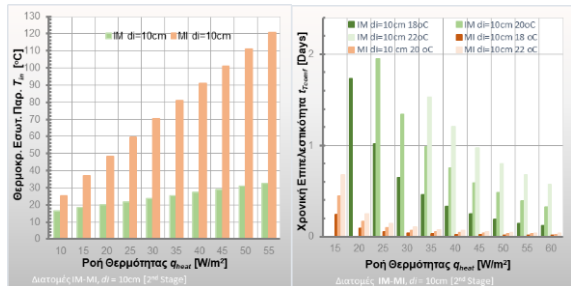
Η αλλαγή στη θέση της μονωτικής στρώσης, από την εξωτερική (IM) σε εσωτερική (MI), οδηγεί στη μείωση του επιτελεστικού χρόνου θερμικής ισορροπίας (Σχήμα 5), όπως αυτό είναι αναμενόμενο, λόγω της άμεσης επίδρασης με τη θερμομονωτική στρώση. Άμεση επίπτωση είναι η αύξηση της θερμοκρασιακής διακύμανσης του χώρου.



Σχήμα 5: 1^η φάση, $T_{out}=0\pm5^\circ\text{C}$, Θερμοκρασία ισορροπίας T_{in} συναρτήσε του q_{heat} και Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} συναρτήσε του q_{heat} , $d_i=5\text{cm}$ για IM & MI

Σχετικά με τη δεύτερη φάση της μελέτης, η αλλαγή της θέσης θερμομόνωσης, οδηγεί σε αύξηση των μέγιστων θερμοκρασιών, με καλύτερα αποτελέσματα στα μεγαλύτερα πάχη μόνωσης (Σχήμα 6) και μείωση των απαιτήσεων ροής θερμότητας, προς επίτευξη των θερμοκρασιών στόχευσης. Παράλληλα, έχει μεγάλη επιρροή στον επιτελεστικό χρόνο των θερμοκρασιών στόχευσης, προκαλώντας μείωση ιδιαίτερα στο χαμηλό θερμοκρασιακό προφίλ εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ δεν παρατηρείται μεγάλη μεταβολή στους ήδη εξαιρετικά χαμηλούς επιτελεστικούς χρόνους στις υψηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες.

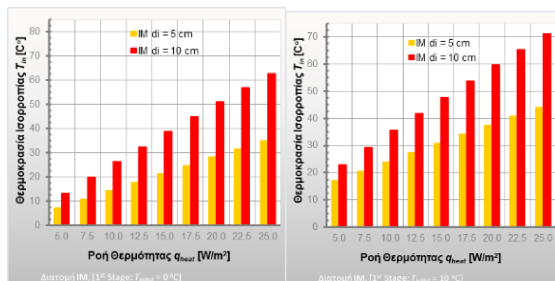
Τέλος, για συγκεκριμένους χρόνους, επιτυγχάνεται αύξηση των επιτελεστικών θερμοκρασιών, με ευμενέστερες συνθήκες στις υψηλότερες θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος.



Σχήμα 6: 2^η φάση, $T_{out}=0\pm5^{\circ}\text{C}$. Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. Παρειάς T_{in} και Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} , $d_i=10\text{cm}$ για IM & MI.

3.3. Επιρροή θερμοκρασίας περιβάλλοντος

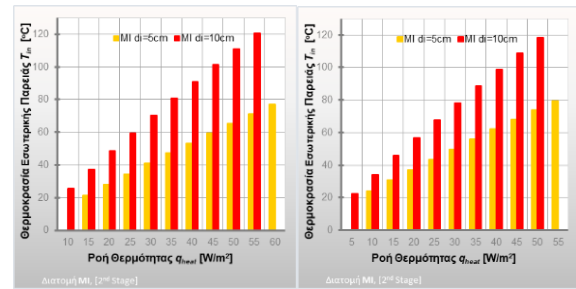
Η άνοδος της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος, συντελεί στην άνοδο της θερμοκρασίας ισορροπίας του συστήματος με ταυτόχρονη μείωση των τιμών του απαιτούμενου q_{heat} για την επίτευξη των θερμοκρασιών. (Σχήμα 7)



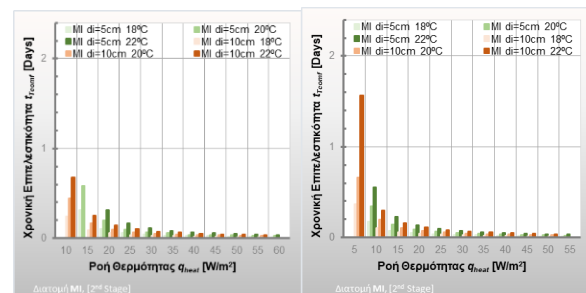
Σχήμα 7: 1^η φάση, $T_{out}=0\pm5^{\circ}\text{C}$ και $T_{out}=10\pm5^{\circ}\text{C}$ Θερμοκρασία ισορροπίας T_{in} συναρτήσει του q_{heat} , διατομής IM, για $d_i=5\text{cm}$ και $d_e=10\text{cm}$.

Για τη δεύτερη φάση, η επιρροή της αύξησης εξωτερικής θερμοκρασίας ποικίλει ανάλογα με το είδος της κατασκευαστικής διάταξης, με καλύτερα αποτελέσματα στη διάταξη MI (Σχήμα 8). Παράλληλα δημιουργεί μικρότερες απαιτήσεις q_{heat} , όπως επίσης και μείωση του επιτελεστικού χρόνου (Σχήμα 9), για την επίτευξη των θερμοκρασιών στόχευσης. Τέλος επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα

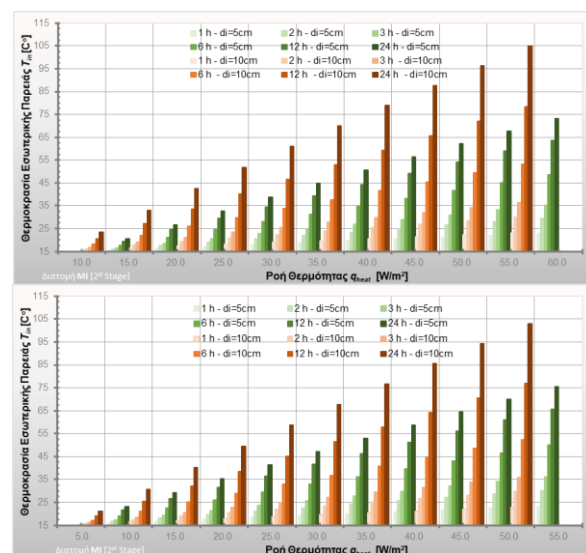
στις μέγιστες επιτελεστικές θερμοκρασίες για συγκεκριμένους χρόνους (Σχήμα 10).



Σχήμα 8: 2^η φάση, $T_{out}=0\pm5^{\circ}\text{C}$ και $T_{out}=10\pm5^{\circ}\text{C}$ Θερμοκρασία ισορροπίας T_{in} συναρτήσει του q_{heat} , διατομής MI, για $d_i=5\text{cm}$ και $d_e=10\text{cm}$.



Σχήμα 9: 2^η φάση, $T_{out}=0\pm5^{\circ}\text{C}$ και $T_{out}=10\pm5^{\circ}\text{C}$ Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, συναρτήσει του q_{heat} διατομής MI για $d_i=5\text{cm}$ & $d_e=10\text{cm}$.



Σχήμα 10: 2^η φάση, $T_{out}=0\pm5^{\circ}\text{C}$ και $T_{out}=10\pm5^{\circ}\text{C}$. Επιτελεστική θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} , διατομής MI, συναρτήσει του q_{heat} , σε καθορισμένους χρόνους, για $d_i=5\text{cm}$ και $d_e=10\text{cm}$

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα έρευνα προσεγγίστηκε η θερμική απόκριση συμβατικών

κατασκευαστικών διατάξεων, οι οποίες εκτίθενται εξωτερικά σε περιοδικές θερμοκρασιακές φορτίσεις δύο διαφορετικών ημερών του χειμώνα, ενώ εσωτερικά επιβάλλεται καθορισμένη ροή θερμότητας. Η μελέτη διενεργήθηκε σε δύο φάσεις και σε αυτές διερευνήθηκε η συμβολή της ροής θερμότητας που επιβλήθηκε σε εσωτερικό χώρο, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την κατασκευαστική διάταξη και το πάχος θερμομόνωσης, προκειμένου στη δεύτερη φάση να επιτευχθούν τρεις θερμοκρασιακοί στόχοι, στο εύρος της θερμικής άνεσης.

Τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων που εξήχθησαν, σχετικά με την επιρροή του πάχους και της θέσης θερμομόνωσης, καθώς και της εξωτερική θερμοκρασίας είναι χρήσιμα για το σχεδιασμό. Παράλληλα μπορούν να αποτελέσουν βάση για τη διεξαγωγή μελλοντικής διερεύνησης σε διαφορετικές κτιριακές δομές, διαφορετικά κλιματικά προφίλ, την αποτίμηση της καταναλισκόμενης ενέργειας προς επίτευξη των στοχεύσεων, όπως επίσης και τη μελέτη της επιρροής στις παραμέτρους της θερμικής αδράνειας της κατασκευής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Al-Sanea S.A., Zedan M.F. (2011), "Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass", Applied Energy 88 (2011), 3113-3124, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.036>
- Al-Sanea S.A., Zedan M.F., Al-Hussain S.N. (2013), "Effect of masonry material and surface absorptivity on critical thermal mass in insulated building walls", Applied Energy 102 (2013), 1063-1070, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.016>
- Asan H. (2000), "Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view", Energy and Buildings 32 (2000) 197-203, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00044-X)
- Cengel Y.A. (2002) "Heat Transfer, A Practical Approach", second edition 2002
- EN1992-1-2 (2004) Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-2: General Rules -Structural Fire Design, European Standard
- Georgiadis-Filiras K. (2015), "Behavior of thermal insulation materials under fire conditions with reference to their position within building envelopes, Ph.D. Thesis (2015), Aristotle University of Thessaloniki, Greece, ND: 35980 [in Greek].
- Mavromatidis L.E., El Mankibi M., Michel P., Santamouris M. (2012), "Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climating zones", Applied Energy 92 (2012) 480-491, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.007>
- Ozel M. (2014), "Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness", Energy and Buildings 72 (2014) 288-295, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.015>
- Sjöström J., Jansson R. (2012), Measuring thermal material properties for structural fire engineering, in: 15th Int. Conf. Exp. Mech., Porto 2012
- T.O.T.E.E. 20701-2/2017 (2017) ,ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ, (2017)
- " COMSOL Multiphysics 5.4 Reference Manual" https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf retrieved 14/07/2022



ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΣΗ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΑΡΕΙΑΣ, ΣΥΝΑΦΩΝ ΜΕ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΗ ΡΟΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Περσεφόνη Ψυλλάκη¹, Κάρολος-Νικόλαος Κοντολέων²

¹Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα, std048610@ac.eap.gr

²Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστημιούπολη ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη, kontoleon@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

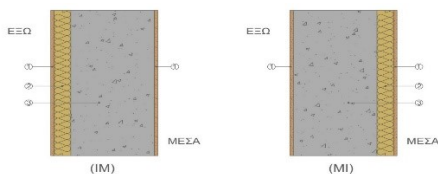
Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η θερμική απόκριση κατακόρυφων διατομών κτιριακού κελύφους, οι οποίες εκτίθενται εξωτερικά σε περιοδικές θερμοκρασιακές φορτίσεις, για δύο θερμοκρασιακά διαφορετικές χειμερινές ημέρες, ενώ εσωτερικά επιβάλλεται καθορισμένη ροή θερμότητας. Αναλύεται η επιρροή της επιβαλλόμενης ροής θερμότητας, συναρτήσει των δυναμικά μεταβαλλόμενων εξωτερικών συνθηκών, της κατασκευαστικής διάταξης και του πάχους θερμομόνωσης.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται συνεχώς, ενώ μεγάλο μέρος της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται για την ψύξη και θέρμανση των χώρων. Το γεγονός οφείλεται στη μετάδοση θερμότητας μέσω του κελύφους του κτιρίου, λόγω των ακραίων εξωτερικών συνθηκών που επικρατούν. Το πάχος της θερμομόνωσης, η επιλογή δομικών υλικών και το πρότυπο κατασκευής επηρεάζουν την ικανότητα ενός κτιρίου να διατηρεί τη θερμότητα, προς μείωση της συμβατικής κατανάλωσης ενέργειας στο χειμώνα και αποφυγή υπερθέρμανσης το καλοκαίρι.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Στη μελέτη εξετάστηκαν διαφορετικές συνθέσεις τοιχοποιίας από οπλισμένο σκυρόδεμα (Σχήμα 1), με μεταβλητό πάχος θερμομόνωσης (πετροβάμβακας).



Σχήμα 1. Χαρακτηριστικές διατάξεις εξωτερικής τοιχοποιίας μελέτης.

Η θερμική ανάλυση διενεργήθηκε μέσω του λογισμικού COMSOL Multiphysics, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων – διαφορών, σε όλες τις περιπτώσεις των επιλεγμένων διατάξεων.

Η μοντελοποίηση έγινε με γεωμετρία δύο διαστάσεων (2D), το μοντέλο μελετάται εξαρτώμενο από το χρόνο (Time Depended), χρησιμοποιήθηκε δε, ενισχυμένος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας σε στερεά (Heat transfer with Surface-to-Surface Radiation).

Στο μοντέλο εφαρμόζονται περιοδικές εξωτερικές διεγέρσεις μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας για δύο διαφορετικές θερμοκρασιακές ημέρες με θερμοκρασίες $T_1=0\pm5^\circ\text{C}$ και $T_2=10\pm5^\circ\text{C}$. Η θερμοκρασία δίδεται από τη σχέση:

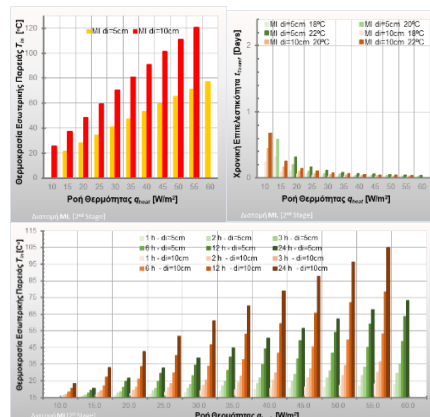
$$T_{sa(t)} = \frac{|T_{\max} - T_{\min}|}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{p}t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{|T_{\max} - T_{\min}|}{2}$$

Εσωτερικά επιβάλλεται συνεχόμενη ροή θερμότητας q_{heat} , καθορισμένης ισχύος, που μεταβάλλεται παραμετρικά.

Η διεξαγωγή της μελέτης διακρίνεται σε δύο φάσεις: α) στην πρώτη φάση, αναζητείται η τιμή της ροής θερμότητας, η οποία οδηγεί σε ισορροπία με μέσο όρο εσωτερικής θερμοκρασίας 15°C . β) στη δεύτερη φάση της ανάλυσης, αναζητείται το εύρος των τιμών του q_{heat} , που με το χαμηλότερο επιτελεστικό χρόνο θα οδηγήσει στις θερμοκρασίες στόχευσης. Συνολικά διερευνήθηκαν 312 περιπτώσεις.

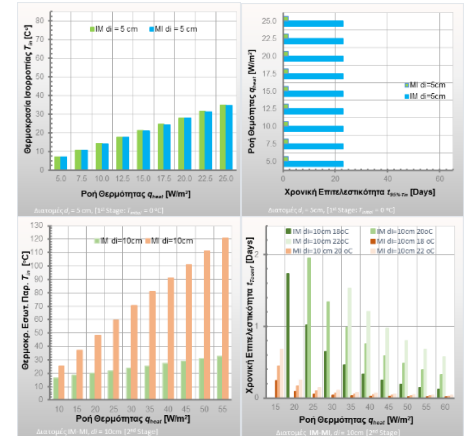
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πάχος θερμομόνωσης: Η αύξηση του πάχους d του μονωτικού υλικού, με συνέπεια την αύξηση της θερμικής αντίστασης και ως εκ τούτου, τη μείωση των φορτίων μετάδοσης, συντελεί στην αύξηση των θερμοκρασιών ισορροπίας, του χρόνου επίτευξης θερμικής ισορροπίας, στη μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων και τη βελτίωση των συνθηκών στο εσωτερικό. Στη δεύτερη φάση της ανάλυσης, η αύξηση του πάχους μονωτικής στρώσης, οδηγεί σε αύξηση τελικών θερμοκρασιών, ενώ είναι πιο αποτελεσματική για προφίλ εσωτερικής θερμομόνωσης (MI), αφού επιτυγχάνει υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας, σε χαμηλότερο επιτελεστικό χρόνο και με μικρότερες τιμές q_{heat} .



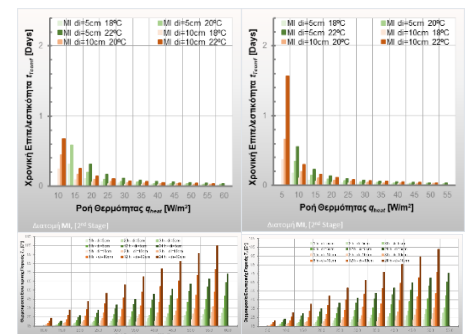
Σχήμα 2. $T_{out}=0\pm5^\circ\text{C}$, -2η φάση: Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , και Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης (MI), - Θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} , σε καθορισμένους χρόνους (MI). (Όλα συναρτήσει του q_{heat} , για $d_i=5\text{cm}$ και $d_o=10\text{cm}$)

Κατασκευαστική διάταξη: Η αλλαγή στη θέση της μονωτικής στρώσης, από την εξωτερική (IM) σε εσωτερική (MI), οδηγεί στη μείωση του επιτελεστικού χρόνου θερμικής ισορροπίας, λόγω της άμεσης επίδρασης με τη θερμομονωτική στρώση. Σχετικά με τη δεύτερη φάση της μελέτης, η αλλαγή της θέσης θερμομόνωσης, οδηγεί σε αύξηση των μέγιστων θερμοκρασιών, με καλύτερα αποτελέσματα στα μεγαλύτερα πάχη μόνωσης και μείωση των απαιτήσεων ροής θερμότητας, προς επίτευξη των θερμοκρασιών στόχευσης. Παράλληλα, έχει μεγάλη επιρροή στον επιτελεστικό χρόνο των θερμοκρασιών στόχευσης, προκαλώντας μείωση ιδιαίτερα στο χαμηλό θερμοκρασιακό προφίλ εξωτερικού περιβάλλοντος. Τέλος, για συγκεκριμένους χρόνους, επιτυγχάνεται αύξηση των επιτελεστικών θερμοκρασιών, με ευμενέστερες συνθήκες στις υψηλότερες θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος.



Σχήμα 3. $T_{out}=0\pm5^\circ\text{C}$, -1η φάση: Θερμοκρασία ισορροπίας T_{in} και Επιτελεστικός χρόνος του 95% T_{in} , για $d=5\text{cm}$ -2η φάση: Μέγιστη θερμοκρασία εσωτ. παρειάς T_{in} , και Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης για $d_i=10\text{cm}$. (Όλα συναρτήσει του q_{heat} , για διατομές IM&MI)

Θερμοκρασία περιβάλλοντος: Η άνοδος της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος, συντελεί στην άνοδο της θερμοκρασίας ισορροπίας του συστήματος με ταυτόχρονη μείωση των τιμών του απαιτούμενου q_{heat} για την επίτευξη των θερμοκρασιών. Στη δεύτερη φάση, η επιρροή της αύξησης εξωτερικής θερμοκρασίας ποικίλει ανάλογα με το είδος της κατασκευαστικής διάταξης, με καλύτερα αποτελέσματα στη διάταξη MI. Παράλληλα προκαλεί μείωση του επιτελεστικού χρόνου, για την επίτευξη των θερμοκρασιών στόχευσης. Τέλος επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα στις μέγιστες επιτελεστικές θερμοκρασίες για συγκεκριμένους χρόνους.



Σχήμα 4. -2η φάση: $T_{out}=0\pm5^\circ\text{C}$ και $T_{out}=10\pm5^\circ\text{C}$ Επιτελεστικός χρόνος των θερμοκρασιών στόχευσης, και Επιτελεστική θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς T_{in} σε καθορισμένους χρόνους (όλα συναρτήσει του q_{heat} για $d_i=5\text{cm}$ και $d_o=10\text{cm}$, διατομής MI)

Λέξεις κλειδιά: Ροή θερμότητας, Επιτελεστικός χρόνος.

Βιβλιογραφία

- Al-Sanea S.A., Zedan M.F. (2011), "Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass", Applied Energy 88 (2011), 3113-3124, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.036>
- Mavromatidis L.E., El Mankibi M., Michel P., Santamouris M. (2012), "Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climatic zones", Applied Energy 92 (2012) 480-491, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.007>