

ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΡΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΕΛΕΓΧΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΑΡΕΙΑΣ: ΕΠΙΒΟΛΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΡΟΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΒΑΣΕΙ ΕΝΟΣ ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΚΛΙΜΑΚΩΣΗΣ ΤΗΣ

Ανδρέας Απέργης¹, Κάρολος - Νικόλαος Κοντολέων²

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

²Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη

email: ¹ std162494@ac.eap.gr , kontoleon@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, διερευνά την μεταβατική θερμική απόκριση μίας δομικής διάταξης κτηριακού κελύφους, η οποία μεταβαίνει από μία αρχική θερμοκρασία ισορροπίας της εσωτερικής παρειάς, σε μία προκαθορισμένη τελική θερμοκρασία. Η μετάβαση γίνεται μέσω ενός θερμοστατικού μηχανισμού ελεγχόμενης ροής θερμότητας ενώ στην εξωτερική πλευρά εφαρμόζονται δυναμικά μεταβαλλόμενες θερμοκρασιακές συνθήκες. Με τον προσδιορισμό κατάλληλης ροής θερμότητας και ενσωμάτωσης στον θερμοστατικό μηχανισμό νόμου ελέγχου Bang-Bang, εξετάζονται 3 διαφορετικές στρατηγικές ακρίβειας ελέγχου, η συχνότητα μεταγωγών του μηχανισμού και η θερμική ευστάθεια στην εσωτερική παρειά, για χρονικό διάστημα 10 ημερών. Για την μοντελοποίηση του συστήματος, έγινε χρήση του λογισμικού COMSOL Multiphysics. Τα αποτελέσματα εστιάζουν στην χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας της εσωτερικής παρειάς για χρονικό διάστημα 10 ημερών, την συμπεριφορά του θερμοστατικού μηχανισμού με έλεγχο Bang-Bang, μέσω των μεταγωγών On-Off που απαιτούνται για την διατήρηση της εντός συγκεκριμένων ορίων αλλά και μέσω του χρόνου κύκλου μεταγωγής.

Λέξεις κλειδιά: Μεταβατική θερμική απόκριση, Βέλτιστος έλεγχος θερμοκρασίας, Έλεγχος Bang-Bang, Θερμοστατικός μηχανισμός ελέγχου, Λόγος μεταγωγής, Νεκρή ζώνη, Ροή θερμότητας

ABSTRACT

This MSc thesis investigates the transient thermal response of a building-envelope structural element, during the transition from an initial equilibrium state to a prescribed final temperature. Transition is done under time-dependent boundary conditions imposed on the internal surface by a controlled heat flux through a thermostatic control mechanism. The system is modelled using COMSOL Multiphysics. The results are focused on the evolution of the internal surface temperature over a ten-day period, as well as the behaviour of the thermostatic mechanism under Bang-Bang control, through the On-Off switching operations and through the corresponding switching cycle time.

Keywords: Transient thermal response, Optimal temperature control, Bang-Bang control, Thermostatic control mechanism, Switching ratio, Dead band, Heat flux

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βελτιστοποίηση του κτηριακού κελύφους είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την κατασκευή κτηρίων υψηλής απόδοσης τόσο από την πλευρά κατανάλωσης της ενέργειας όσο και από την πλευρά της επίτευξης συνθηκών άνεσης για τους χρήστες του κτηρίου.

Στην βιβλιογραφία, συναντώνται αρκετές έρευνες που εξετάζουν την βελτιστοποίηση της θερμικής απόκρισης κατασκευαστικών δομών. Οι περισσότερες μελέτες¹ επικεντρώνονται στην μεγιστοποίηση της χρονικής υστέρησης (φ) και στην ελαχιστοποίηση του συντελεστή μείωσης (f), ακολουθώντας μεθοδολογία που βασίζεται σε μία σταθερή θερμοκρασία ισορροπίας της εσωτερικής πλευράς. Νεότερη έρευνα² εισάγει την έννοια της δυναμικά μεταβαλλόμενης οριακής συνθήκης στην εσωτερική παρειά, η οποία προκαλείται από την εφαρμογή μίας συνεχόμενης ροής θερμότητας σταθερής ισχύος, και επανεξετάζει την θερμική συμπεριφορά των δομικών συνθέσεων υπό νέο πρίσμα. Σε αυτό το σημείο τοποθετείται η παρούσα εργασία, στην οποία οι οριακές συνθήκες εσωτερικής παρειάς θα είναι αφενός μεταβαλλόμενες και θα επηρεάζονται από μία πηγή θερμότητας, αφετέρου θα είναι ελεγχόμενες μέσω ενός θερμοστατικού μηχανισμού. Η επιθυμητή θερμοκρασία, θα αποτελεί την ελεγχόμενη μεταβλητή του συστήματος, και η βελτιστοποίηση, θα αφορά την ταχύτερη επίτευξη της τιμής στόχου από την αρχική κατάσταση ισορροπίας αλλά και την διατήρησή της εντός συγκεκριμένων ορίων. Υπό αυτήν την έννοια, ο θερμοστατικός μηχανισμός θα υπακούει σε νόμο ελέγχου Bang-Bang. Κατά αυτόν τον τρόπο, η ρύθμιση της ροής

θερμότητας θα μεταβαίνει μεταξύ των καταστάσεων «ON» και «OFF». Οι οριακές συνθήκες της εξωτερικής πλευράς (θερμοκρασία περιβάλλοντος) θα ακολουθούν μία ημιτονοειδή συνάρτηση. Η δομική σύνθεση θα αποτελείται από τσιμέντο C25 και θα έχει επικάλυψη τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό μέρος της από ασβεστοκονίαμα (PI). Τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης θα εστιάσουν εκτός από την απόκριση της συγκεκριμένης διαμόρφωσης υπό την επίδραση των δυναμικών συνθηκών ροής θερμότητας, και στην ικανότητά της να διατηρήσει με ακρίβεια την συνθήκη.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς που θα ακολουθηθεί είναι η εξής: αρχικά θα δημιουργηθεί ένα θερμικό μοντέλο της υπό εξέτασης δομικής σύνθεσης. Θα οριστεί η γεωμετρία της δομικής σύνθεσης, τα στοιχεία της διαστρωμάτωσης των υλικών που θα το αποτελούν και οι θερμοφυσικές ιδιότητές τους. Στην συνέχεια, θα διατυπωθεί η μαθηματική σχέση που θα περιγράψει το φαινόμενο της θερμικής αγωγιμότητας, θα διατυπωθούν οι απαραίτητες συνοριακές συνθήκες και αρχικές τιμές του προβλήματος και θα διατυπωθεί ο νόμος ελέγχου και θα οριστούν οι τιμές των νεκρών ζωνών για την ρύθμιση της ροής θερμότητας. Θα ακολουθήσει η υπολογιστική προσομοίωση με την βοήθεια του λογισμικού COMSOL Multiphysics, με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Από την προσομοίωση, θα εξαχθούν τα αποτελέσματα της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας της εσωτερικής παρειάς ως προς την επίτευξη της τιμής στόχου, της διατήρησής της εντός συγκεκριμένων ορίων, καθώς και της

¹ Asan, 2000

² Kontoleon et al., 2026

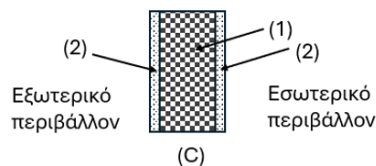
συμπεριφοράς του θερμοστατικού μηχανισμού για βέλτιστο έλεγχο της θερμοκρασίας.

2.1 Δομή και γεωμετρία θερμικού μοντέλου

Το μοντέλο αποτελείται από διαφορετικά στρώματα τα οποία βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους (Σχ. 1), σχηματίζοντας ένα ενιαίο, σύνθετο δομικό στοιχείο χωρίς διάκενα.

Αναλυτικά:

1. Επίχρισμα εξωτερικά από ασβεστοκονίαμα (PI), πάχους $d_{PI}=1.5$ cm
2. Σκυρόδεμα (C25), πάχους $d_{C25}=25$ cm
3. Επίχρισμα εσωτερικά από ασβεστοκονίαμα (PI), πάχους $d_{PI}=1.5$ cm



Σχήμα 1. Η διαμόρφωση του δομικού στοιχείου: (1) Σκυρόδεμα, (2)= Επίχρισμα

Οι τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών που μας ενδιαφέρουν είναι η Ειδική θερμοχωρητικότητα (C_p), η πυκνότητα (ρ), και η θερμοπερατότητα (λ) και παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Υλικό	Θερμική Αγωγιμότητα λ	Πυκνότητα ρ	Ειδική Θερμότητα C_p
	(W/m.K)	(kg/m ³)	(J/kg.K)
Τσιμέντο (C)	2.3	2300	1000
Ασβεστοκονίαμα (PI)	1	1900	1100

Πίνακας 1. Θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών του μοντέλου³

2.2 Συνθήκες θερμικού μοντέλου

Η εξωτερική παρεία, με θερμοκρασία επιφανείας T_{se} , υπόκειται στην επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος $T_{sol-air}$. Αυτή μεταβάλλεται περιοδικά, με βάση μία ημιτονοειδή συνάρτηση η οποία λαμβάνει υπόψη την συνεισφορά της ηλιακής ακτινοβολίας. Διατυπώνεται ως:

$$T_{sol-air} = \frac{|T_{max} - T_{min}|}{2} \times \sin\left(2\pi\nu - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{|T_{max} - T_{min}|}{2} + T_{min}^4$$

Όπου:

- $T_{max}=10$ °C η μέγιστη και $T_{min}=0$ °C η ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος αντίστοιχα
- ν : η συχνότητα ίση με 1/86400 Hz
- $-\frac{\pi}{2}$: η διαφορά φάσης

Η θερμοκρασία σε κάθε σημείο εντός της διατομής, είναι χρονικά μεταβαλλόμενη $T(x,t)$. Το μοντέλο περιγράφεται από την εξίσωση της θερμικής αγωγής του Fourier, για την περίπτωση της μονοδιάστατης ανάλυσης:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

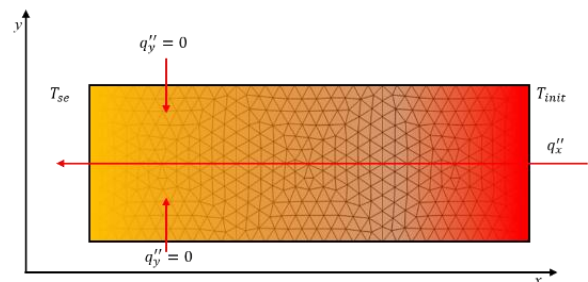
Η γεωμετρία του στοιχείου διακριτοποιείται (Σχ. 2) και τίθενται οι οριακές συνθήκες.

Στην εξωτερική επιφάνεια του μοντέλου ($x=0$), η θερμοκρασία T_{se} εξαρτάται από την πυκνότητα ροής θερμότητας:

$$q''_{se} = h_o [T_{sol-air}(t) - T_{x=0}(t)] = \lambda(\partial T_{se}/\partial x)_{x=0}$$

Όπου:

h_o : ειδική συναγωγιμότητα, με τιμή 25 W/(m²K)



Σχήμα 2. Το σύστημα συντεταγμένων και το αριθμητικό πλέγμα του μοντέλου.

Ως αρχική συνθήκη της θερμοκρασίας της εσωτερικής παρειάς θεωρούμε ότι αυτή είναι ίση με τον μέσο όρο των (T_{max} , T_{min}), ήτοι :

$$T_{init} = T(L,0) = 5$$
 °C

Θεωρούμε μονοδιάστατη ροή θερμότητας (q''_x), μόνον κατά τον άξονα x, η οποία μεταβάλλει την θερμοκρασία T_{si} του μοντέλου ($x=L$), από την αρχική τιμή T_{init} . Κατά την διεύθυνση του άξονα y, ισχύει $q''_y=0$.

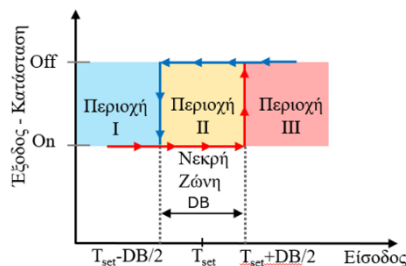
³ (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2 / 2017)

⁴ Asan et al., 1997

Η αριθμητική επίλυση θα γίνει με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών μέσω του λογισμικού COMSOL Multiphysics.

2.2 Νόμος λειτουργίας θερμοστατικού μηχανισμού

Η κλιμάκωση της ροής θερμότητας θα υπακούει στην μέθοδο ελέγχου Bang – Bang, δηλαδή θα είναι είτε «On» είτε «Off» και θα κινείται μεταξύ μίας μέγιστης τιμής και της ελάχιστης (μηδενικής). Η T_{set} θα διατηρείται εντός των ορίων που καθορίζονται από την νεκρή ζώνη (Σχ. 3)

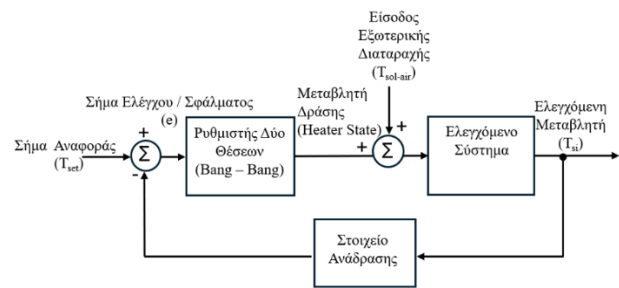


Σχήμα 3. Κατάσταση του θερμοστατικού μηχανισμού ανάλογα με την περιοχή τιμών της T_{si} .⁵

Ο θερμοστατικός μηχανισμός θα λάβει ως τιμή αναφοράς για την θερμοκρασία T_{si} μία προκαθορισμένη τιμή $T_{set}=20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Συνολικά θα εξεταστούν 3 διαφορετικά πλάτη νεκρών ζωνών: Dead Band max=1.0 $^{\circ}\text{C}$, Dead Band mean=0.8 $^{\circ}\text{C}$, Dead Band min=0.6 $^{\circ}\text{C}$.

2.2 Αρχιτεκτονική συστήματος αυτομάτου ελέγχου

Το δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του θερμοστατικού μηχανισμού, απεικονίζεται στο (Σχ.4). Το σήμα αναφοράς είναι η T_{set} το οποίο συγκρίνεται με την τιμή T_{si} . Με βάση το αποτέλεσμα της σύγκρισης, ο ρυθμιστής δύο θέσεων (Bang-Bang) δίνει την εντολή στην πηγή θερμικής ροής (Heater) είτε για «On» είτε για «OFF».



Σχήμα 4. Δομικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου με βρόχο ανάδρασης.

Το θερμικό κύμα που προκαλείται από την $T_{sol-air}$ υπεισέρχεται στο σύστημα ως εξωτερική διαταραχή και το άθροισμα των δύο θερμικών ροών διαμορφώνει την ελεγχόμενη μεταβλητή T_{si} . Αυτή ανατροφοδοτείται στο στοιχείο ανάδρασης και συγκρίνεται με το σήμα αναφοράς, παράγοντας το σήμα σφάλματος.

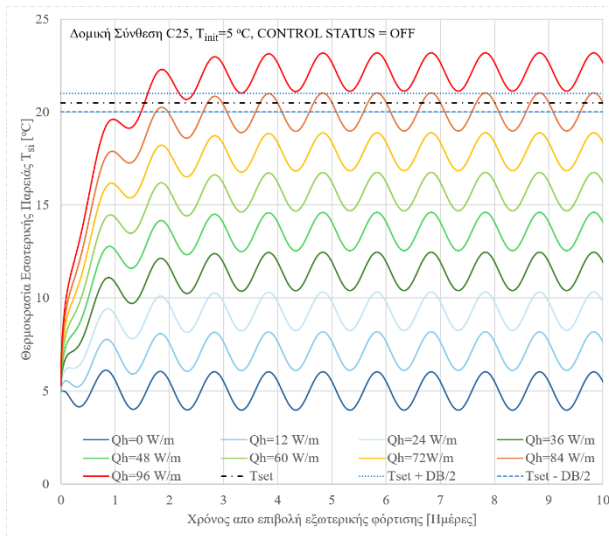
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Ενσωμάτωση νόμου ελέγχου και βρόχου ανάδρασης στον θερμοστατικό μηχανισμό

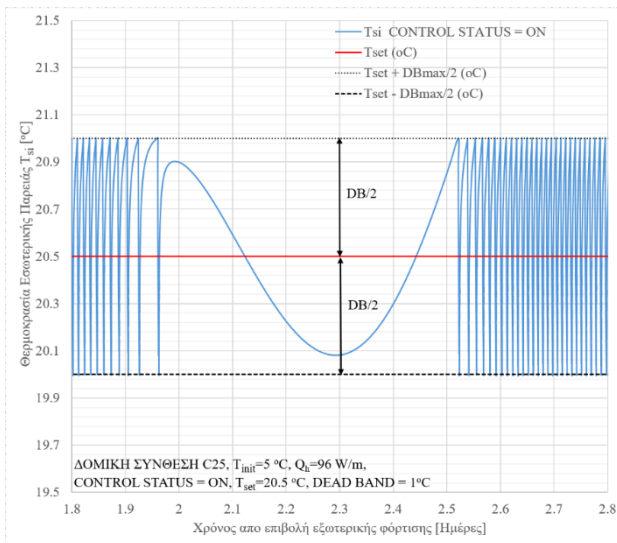
Η λειτουργία του θερμοστατικού μηχανισμού χωρίς έλεγχο, θέτει την εσωτερική παρειά σε μόνιμη επίδραση της ροής θερμότητας. Η θερμική απόκριση του συστήματος, περιγράφεται από την καμπύλη της θερμοκρασίας T_{si} για τιμή της ροής θερμότητας $Q_h=96\text{ W/m}$ (Διάγρ. 1). Η T_{si} κινείται αυξητικά (θέρμανση), καταλήγοντας σε μία σταθερή ημιτονοειδή μεταβολή με σταθερό πλάτος, αλλά άνω της τιμής στόχου $T_{set}=20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η ενσωμάτωση νόμου ελέγχου και βρόχου ανατροφοδότησης (Διάγρ. 2), έχει ως αποτέλεσμα η T_{si} να ακολουθεί μία τροχιά η οποία ξεκινάει όπως και πριν αυξητικά, αλλά εισερχόμενη εντός της προκαθορισμένης και ελεγχόμενης από τον μηχανισμό περιοχής, της νεκρής ζώνης (DB), διατηρείται εντός αυτής. Η T_{si} λαμβάνει θερμοκρασίες στο διάστημα με

⁵ Savasci et al., 2025

κεντρική τιμή την T_{set} , μέγιστη την θερμοκρασία $T_{set}+DB/2$, και ελάχιστη την τιμή $T_{set}-DB/2$.



Διάγραμμα 1. Η απόκριση του συστήματος χωρίς νόμο ελέγχου και βρόχου ανατροφοδότησης για διαφορετικές τιμές της ροής θερμότητας.

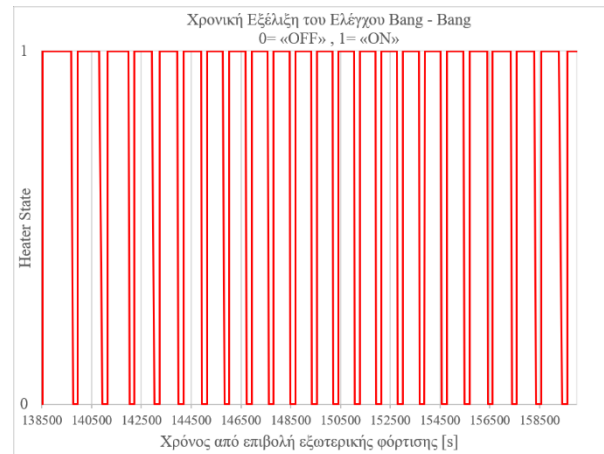


Διάγραμμα 2. Η απόκριση του συστήματος με ενσωμάτωση νόμου ελέγχου και βρόχου ανατροφοδότησης για πλάτος νεκρής ζώνης 1.0 °C.

3.2 Επίδραση του είδους του νόμου ελέγχου

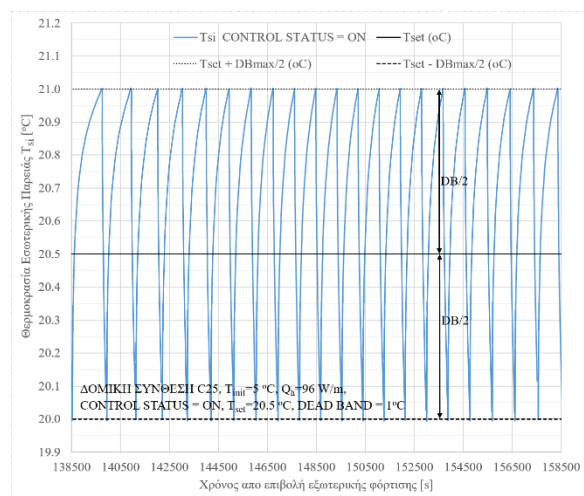
Η εφαρμογή του νόμου ελέγχου Bang-Bang, έχει ως αποτέλεσμα την διακοπτόμενη λειτουργία του θερμοστατικού μηχανισμού

(Διάγρ. 3), με μεταγωγές από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 0.



Διάγραμμα 3. Μετάβαση του θερμοστατικού μηχανισμού μεταξύ των καταστάσεων «ON» και «OFF» για πλάτος νεκρής ζώνης 1.0 °C.

Η ροή θερμότητας εφαρμόζεται με χρονικούς παλμούς, αποτελούμενους από διάστημα σε κατάσταση 1=«ON» και διάστημα σε κατάσταση



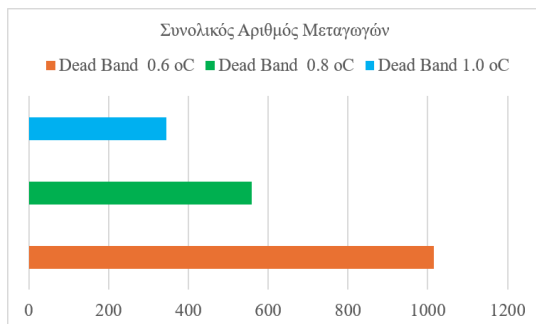
Διάγραμμα 4. Χρονική εξέλιξη της T_{si} με έλεγχο για πλάτος νεκρής ζώνης = 1.0 °C.

«OFF» που αθροιστικά διαμορφώνουν τον χρόνο κύκλου (cycle time). Αντίστοιχα, η τροχιά της T_{si} (Διάγρ. 4) χαρακτηρίζεται από ένα τμήμα ομαλής ανόδου, (θερμοστατικός μηχανισμός σε κατάσταση 1=«ON») ακολουθούμενο από τμήμα απότομης πτώσης (θερμοστατικός μηχανισμός σε κατάσταση 0=«OFF»), ενώ

κυμαίνεται εντός της προκαθορισμένης νεκρής ζώνης $T_{set} \pm DB/2$.

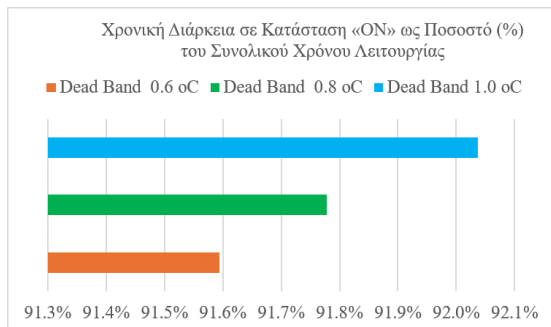
3.3 Επίδραση της νεκρής ζώνης

Η διερεύνηση της επίδρασης 3 διαφορετικών νεκρών ζωνών, της μέγιστης (εύρος 1.0 °C), της μέσης (εύρος 0.8 °C) και της ελάχιστης (εύρος 0.6 °C), για χρονικό διάστημα 10 ημερών, επιβεβαιώνει την θεωρητική διαπίστωση ότι μειούμενου του εύρους της νεκρής ζώνης, αυξάνεται η συχνότητα εμφάνισης των μεταγωγών από «ON» σε «OFF» (Διάγρ. 5).



Διάγραμμα 5. Αριθμός μεταγωγών ανά πλάτος της νεκρής ζώνης.

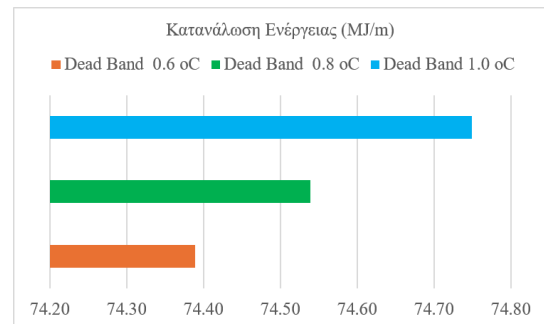
Ο συνολικός χρόνος, που η πηγή θερμότητας είναι σε κατάσταση «ON» (Διαγρ. 6), μειώνεται



Διάγραμμα 6. Χρονική διάρκεια σε κατάσταση «ON» ανά πλάτος της νεκρής ζώνης.

σε ακολουθία με την μείωση του πλάτους της νεκρής ζώνης. Η διαφορά χρονικής διάρκειας λειτουργίας μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου πλάτους ωστόσο, είναι της τάξης του 0.4%. η διαφορά αυτή αποτυπώνεται και στην συνολική κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των 3 στρατηγικών ελέγχου της θερμοκρασίας (Διάγρ.

7), όπου φαίνεται πως το μεγαλύτερο εύρος νεκρής ζώνης απαιτεί περισσότερη έστω και οριακά ενέργεια.



Διάγραμμα 7. Αριθμός μεταγωγών ανά πλάτος της νεκρής ζώνης.

3.4 Επίδραση της θερμικής αδράνειας του συστήματος

Η απουσία στρωμάτων μονωτικού υλικού σε συνδυασμό με την χαμηλή ικανότητα του σκυροδέματος να περιορίσει την επίδραση του κύματος θερμότητας, επιτρέπει σε αυτό να επηρεάσει την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας της εσωτερικής παρειάς T_{si} . Αυτό αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 1, όπου φαίνεται πως η T_{si} ακολουθεί την ημιτονοειδή μεταβολή της $T_{sol-air}$, (μετά την επίδραση της απομείωσης f και χρονικής υστέρησης φ). Η αλληλεπίδραση του κύματος θερμότητας με την ροή θερμότητας, προκαλεί μία μεταβλητότητα στον χρόνο κύκλου του θερμοστατικού μηχανισμού και πιο συγκεκριμένα στο ποσοστό επί του χρόνου κύκλου που το σύστημα είναι σε κατάσταση «ON», δηλαδή τον λόγο μεταγωγής ϵ . Και στις 3 περιπτώσεις πλάτους νεκρής ζώνης, ο λόγος μεταγωγής δεν είναι σταθερός, αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις (Διάγρ. 8,9,10) λαμβάνοντας τιμή από 72.6% μέχρι και 99.9%.



Διάγραμμα 8. Ιστόγραμμα απόλυτων συχνοτήτων παραμέτρου ε. Dead Band=1.0 °C, t=10 ημέρες.

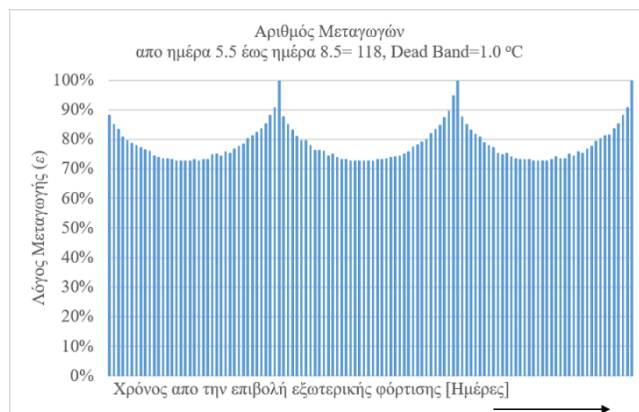


Διάγραμμα 9. Ιστόγραμμα απόλυτων συχνοτήτων παραμέτρου ε. Dead Band=0.8 °C, t=10 ημέρες.

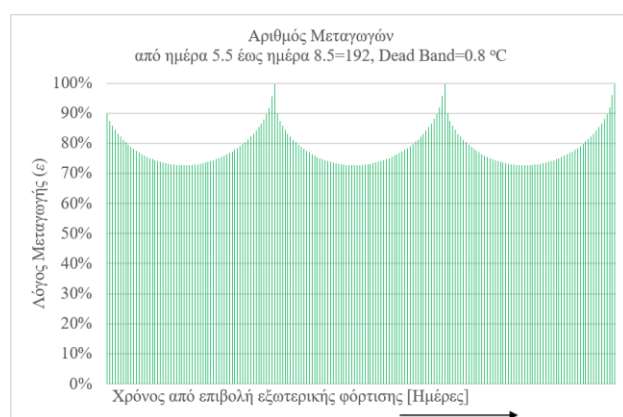


Διάγραμμα 10. Ιστόγραμμα απόλυτων συχνοτήτων του λόγου μεταγωγής για Dead Band = 0.6 °C

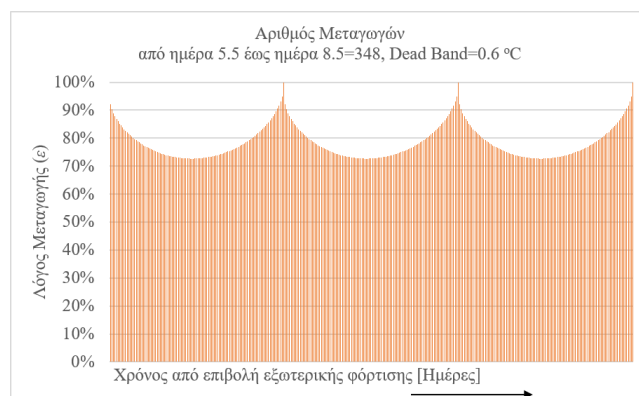
Επιπλέον, παρατηρείται και μία περιοδικότητα στην χρονική εξέλιξη του λόγου μεταγωγής, (Διάγρ. 11,12,13), ως αποτέλεσμα του κύματος που προκαλεί η $T_{sol-air}$.



Διάγραμμα 11. Χρονική εξέλιξη του λόγου μεταγωγής για την περίπτωση Dead Band=1.0 °C.



Διάγραμμα 12. Χρονική εξέλιξη του λόγου μεταγωγής για την περίπτωση Dead Band=0.8 °C.



Διάγραμμα 13. Ιστόγραμμα απόλυτων συχνοτήτων παραμέτρου ε. Dead Band=0.6 °C.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της εργασίας επιβεβαιώνουν ότι η θερμική συμπεριφορά επηρεάζεται καθοριστικά τόσο από την θερμική αδράνεια όσο και από τον επιλεγόμενο νόμο ελέγχου του μηχανισμού που ρυθμίζει την μετάβαση στην επιθυμητή θερμοκρασία.

Αναδεικνύεται η ανάγκη συμβιβασμού μεταξύ της ακρίβειας του ελέγχου και της λειτουργικής σταθερότητας. Δεδομένου ότι στην πράξη το κέλυφος επιτελεί μεν θερμομονωτικό ρόλο, αλλά απαιτείται ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός για να συμπληρώσει την έλλειψη της ενέργειας (λειτουργώντας σε θέρμανση) ή να αφαιρέσει την πλεονάζουσα (λειτουργώντας σε ψύξη), θα πρέπει να συνεκτιμηθεί η συμπεριφορά του κελύφους στην λειτουργία του εξοπλισμού, μέσω του λόγου μετάβασης (ε). Στην βάση της βελτιστοποίησης κτηριακών κελυφών, αυτό θα μπορούσε να είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης δομικών συνθέσεων με παραμέτρους τις λειτουργικές συνθήκες και την θερμική άνεση του κτηρίου. Επιπλέον, προβλήματα όπως:

- η ελαχιστοποίηση του χρόνου επίτευξης της θερμοκρασίας στόχου
- η μετάβαση με τις μικρότερες δυνατές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις
- η μετάβαση με την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας
- η ελαχιστοποίηση του αριθμού των μεταγωγών αποτελούν δυνητικά παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου που ακολουθήθηκε στην εργασία. Ωστόσο, για να δημιουργηθεί μία σαφέστερη εικόνα, προτείνονται τα παρακάτω ως τα επόμενα βήματα:
- Συμπλήρωση των αποτελεσμάτων με μελέτη πρόσθετων διαμορφώσεων που εμπεριέχουν και μονωτικά υλικά (πχ EPS), σε διαφορετικές θέσεις και πάχη.
- Μελέτη της συμπεριφοράς σε διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος, που θα περιέχουν την ανάγκη και για ψύξη και για θέρμανση.

- Διερεύνηση της συμπεριφοράς των δομικών συνθέσεων για διαφορετικούς τρόπους ελέγχου όπως αναλογικό Διαφορικό και Ολοκληρωτικό (PID).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσσες

- Asan, H., Sancaktar, Y.S. Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy Build* 1998;28(2):159-66
- 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(2), 197–203.
[https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(00\)00044-x](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(00)00044-x)
- Kontoleon, J.K., Saboor, S., Arici, M., Niyas, H., Pirouz, B., Psyllaki, P., Al-Sanea, S.A. (2026). A novel technique for unlocking wall elements thermal sensitivity under dynamic conditions and shedding light on the processes until convergence to a steady - periodic state. *Energy and Buildings*, 359, 117316.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117316>
- Savasci, A., Ceylan, O., & Paudyal, S. (2025). Supervised learning-driven dead band control of occupant thermostats for energy-efficient residential HVAC. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 45(45), 102110.
<https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.102110>