

Ανδρέας Απέργης¹, Κάρολος-Νικόλαος Ι. Κοντολέων²

¹Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα, std162494@ac.eap.gr
²Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστημιούπολη ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη, kontoleon@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, διερευνάται η μεταβατική απόκριση δομικής διάταξης κτηριακού κελύφους που υποβάλλεται σε περιοδικά μεταβαλλόμενες συνθήκες εξωτερικής πλευράς και σε ελεγχόμενη θέρμανση εσωτερικά. Η εφαρμογή της ροής θερμότητας συντελείται μέσω του ελέγχου ενός θερμοστατικού μηχανισμού που ενσωματώνει νόμο ελέγχου Bang-Bang. Το σύστημα ξεκινάει από μία αρχική θερμοκρασία ισορροπίας $T_{si}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ στην εσωτερική παρειά και ο θερμοστατικός μηχανισμός το οδηγεί στην θερμοκρασία στόχο $T_{set}=20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, διατηρώντας την εντός προκαθορισμένης νεκρής ζώνης. Εξετάζονται 3 διαφορετικές στρατηγικές διατήρησης της θερμοκρασίας, με κλιμακούμενο εύρος νεκρής ζώνης από $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ μέχρι και $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η ακρίβεια απόκλισης από την τιμή στόχο, επιτρέποντας την αποτίμηση της επίδρασης της ακρίβειας ελέγχου, συχνότητας μεταγωγών του μηχανισμού και της θερμικής ευστάθειας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

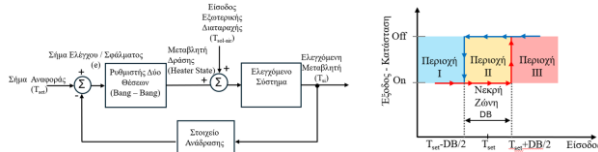
Η βελτιστοποίηση του κτηριακού κελύφους αποτελεί σημαντικότερη παράμετρο για την κατασκευή κτηρίων υψηλής ενεργειακής απόδοσης και υψηλού επιπέδου συνθηκών άνεσης των χρηστών. Στην βιβλιογραφία συναντώνται αρκετές έρευνες που εξετάζουν την βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών θερμικής απόκρισης, υστέρηση (φ) & απομείωση (f), των κατασκευαστικών δομών με την μεθοδολογία να βασίζεται σε μία σταθερή θερμοκρασία ισορροπίας της εσωτερικής πλευράς. Η περίπτωση των δυναμικά μεταβαλλόμενων οριακών συνθηκών στην εσωτερική παρειά, παρότι εμφανίζεται στην πράξη, δεν έχει μελετηθεί επαρκώς, ιδιαίτερα όταν οι μεταβολές οφείλονται στην λειτουργία ενός θερμοστατικού μηχανισμού ελέγχου ροής θερμότητας.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το υπό μελέτη δομικό στοιχείο αποτελείται από σκυρόδεμα C25 πάχους 25 cm , με εσωτερική και εξωτερική επίστρωση από ασβεστοκονίαμα πάχους 1.5 cm .

Σχήμα 1. Μέρη του δομικού στοιχείου: (1) σκυρόδεμα, (2) ασβεστοκονίαμα

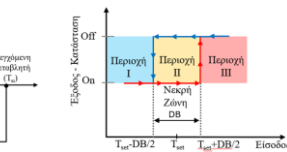
Ο θερμοστατικός μηχανισμός (Σχ.2), διαχειρίζεται ως μεταβλητή ελέγχου την θερμοκρασία εσωτερικής παρειάς (T_{si}), την οποία συγκρίνει με την τιμή αναφοράς T_{set} . Οι αποκλίσεις, ανάλογα με την περιοχή που βρίσκεται η ελεγχόμενη μεταβλητή, καθορίζουν την κατάσταση του μηχανισμού (Διάγρ. 1).



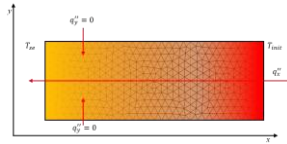
Σχήμα 2. Δομικό διάγραμμα θερμοστατικού μηχανισμού με έλεγχο.

Η θερμική ανάλυση γίνεται με εισαγωγή του μοντέλου στο λογισμικό COMSOL Multiphysics. Η διατομή διακριτοποιείται (Σχ. 3) και επιλύεται αριθμητικά η μονοδιάστατη εξίσωση της διάχυσης ($\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$) με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων FEM.

Σχήμα 3. Η διακριτοποίηση της διατομής και οι ροές θερμότητας.

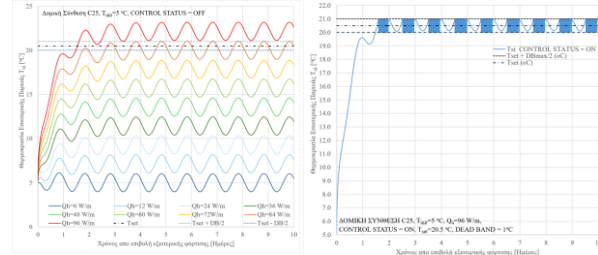


Διάγραμμα 1. Οι καταστάσεις του ρυθμιστή.



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

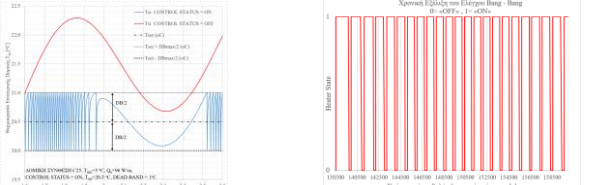
Ενσωμάτωση νόμου ελέγχου και βρόχου ανάδρασης: Η λειτουργία του θερμοστατικού μηχανισμού χωρίς έλεγχο, θέτει την εσωτερική παρειά σε μόνιμη επίδραση της ροής θερμότητας. Η θερμική απόκριση του συστήματος, για $Q_h=96\text{ W/m}$, περιγράφεται από την καμπύλη της θερμοκρασίας T_{si} , η οποία εξελίσσεται με ημιτονοειδή μορφή (Διάγρ. 2), και καταλήγει 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, αναγκάζει την T_{si} να ακολουθεί μία τροχιά (Διάγρ. 3) η οποία κινείται εντός μίας ελεγχόμενης από τον μηχανισμό περιοχής, με κεντρική τιμή την T_{set} , και μεταξύ των τιμών $T_{set}+DB/2$, T_{set} και $T_{set}-DB/2$.



Διάγραμμα 2. Η απόκριση του συστήματος χωρίς νόμο ελέγχου και βρόχου ανατροφοδότησης.

Διάγραμμα 3. Η απόκριση του συστήματος με ενσωμάτωση νόμου ελέγχου και βρόχου ανατροφοδότησης για πλάτος νεκρής ζώνης $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

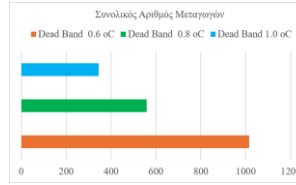
Είδος νόμου ελέγχου: Η εφαρμογή του νόμου ελέγχου Bang-Bang, έχει ως αποτέλεσμα η τροχιά της T_{si} να ακολουθεί ανοδική πορεία (Διάγρ. 4) στην κατάσταση «ON» και απότομη πτώση στην κατάσταση «OFF» (Διάγρ. 5), ενώ κυμαίνεται εντός της προκαθορισμένης νεκρής ζώνης $T_{set}\pm DB/2$.



Διάγραμμα 4. Χρονική εξέλιξη της T_{si} με και χωρίς έλεγχο για πλάτος νεκρής ζώνης $= 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Επίδραση νεκρής ζώνης: Αυξανόμενου του πλάτους της Νεκρής ζώνης, η απόκριση του συστήματος οδηγεί σε μειωμένο αριθμό μεταγωγών μεταξύ των καταστάσεων «ON» και «OFF» (Διάγρ. 6).

Διάγραμμα 5. Μετάβαση του θερμοστατικού μηχανισμού μεταξύ «ON» «OFF»



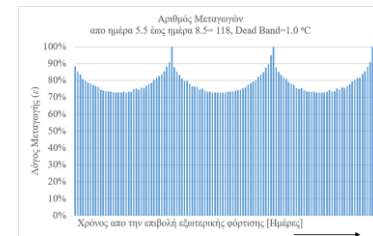
Διάγραμμα 6. Αριθμός μεταγωγών σε σχέση με το πλάτος της νεκρής ζώνης.

Επίδραση θερμικής αδράνειας: η χαμηλή ικανότητα του σκυροδέματος να περιορίσει την επίδραση του κύματος θερμότητας στην T_{si} , καθώς και η έλλειψη μόνωσης, προκαλούν μεταβλητότητα στον λόγο μεταγωγής (ε) (Διάγρ. 6).



Διάγραμμα 6. Αριθμός μεταγωγών για πλάτος νεκρής ζώνης $= 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Επιπλέον, παρατηρείται μία περιοδικότητα στην χρονική εξέλιξη της παραμέτρου ε (Διάγρ. 7), ως αποτέλεσμα της περιοδικής μεταβολής των εξωτερικών συνθηκών - $T_{sol-air}$).



Διάγραμμα 7. Χρονική εξέλιξη της παραμέτρου ε για πλάτος νεκρής ζώνης $= 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Λέξεις κλειδιά: Έλεγχος Bang-Bang, Λόγος μεταγωγής, Μεταβατική θερμική απόκριση, Νεκρή ζώνη, Πυκνότητα παροχής θερμότητας

Βιβλιογραφία

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>

Πουλιέζος, Α. (2015). Σύγχρονη Θεωρία Ελέγχου [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. (Γ. Σταυρακάκης, Επιμ.) Αθήνα: Κάλυπτος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-883>