



ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. : 57333
Αθήνα, 4-11-25

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς
τα Μέλη ΔΕΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Π Ρ Ο Σ Κ Λ Η Σ Η

Παρακαλείστε να παρευρεθείτε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής που εκπόνησε στον Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, η Υποψήφια Διδάκτορας **κ. ΚΙΤΣΟΠΟΥΛΟΥ Αγγελική του Αλεξίου**, Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ.

Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την **Τετάρτη 3 Δεκεμβρίου 2025 και ώρα 12:00 μ.μ.** με φυσική παρουσία, στο Εργαστήριο Προσωπικών Υπολογιστών (Ε.Π.Υ.) της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Το θέμα της Διδακτορικής της Διατριβής είναι:

Ελληνικός τίτλος: «Εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καινοτόμων υλικών και βέλτιστο έλεγχο συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και αερισμού»

Αγγλικός τίτλος: «Energy savings in buildings using renewable energy sources, novel materials and optimum control in heating, cooling and ventilation systems»

Ο Κοσμήτορας της Σχολής



Ι. Αντωνιάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ABSTRACT

The present doctoral dissertation investigates the reduction of building final energy consumption through renewable energy systems, the application of novel materials, and the optimal control of the building's space heating and cooling systems. Multiple innovative and conventional passive envelope technologies are examined to identify the optimum parameters regarding their application, their possible combinations, and their effectiveness. Additionally, heat pump systems for space heating and cooling, along with their integration with renewable energy sources and different terminal units, are analyzed. Photovoltaics and hybrid solar technologies are investigated as a means of on-site energy generation. This thesis aims to determine the optimal energy retrofit strategy for buildings, considering both single and multi-criteria assessments. The study considers all four climatic categories of Greece as well as other Mediterranean climates in Europe, while the investigated buildings primarily focus on residential structures, including single- and multi-family, ranging from single-story to multi-story structures.

Chapter 1 presents the driving forces of deep energy renovation in buildings. Specifically, the rapidly escalating energy prices, the age and high energy demand of the Greek and European building stock, and the increasing frequency of extreme weather phenomena due to global warming intensify the phenomenon of energy poverty and many people's inability to ensure adequate thermal comfort in their homes. **Chapter 2** provides a comprehensive literature review of passive envelope technologies, encompassing both conventional and innovative solutions. These include insulation solutions, advanced windows, high thermal mass technologies, optically advanced materials with cooling potential, mechanical ventilation strategies, and bioclimatic design approaches. Techno-economic data for various insulation materials and window systems is gathered from the market to provide practical insights. **Chapter 3** provides an extensive literature review of the most important energy systems for buildings. These systems include high-efficiency and advanced applications of photovoltaic technology, and various solar thermal technologies for building and other applications. Next, condensing boilers and shallow geothermal systems, including horizontal fields and boreholes, are examined for building applications. Finally, a detailed analysis is conducted on heat pumps, focusing on their various classifications based on energy source and heat transfer fluid, their integration with renewable energy sources, their coupling with different terminal units, and the use of environmentally friendly working fluids. Lastly, sorption cooling systems are also reviewed.

Chapter 4 provides the core methodology of this dissertation. Specifically, the mathematical modeling of building thermal envelope physics and energy system operation is described in detail. This chapter presents the specialized models developed using DesignBuilder software, the EnergyPlus simulation program, Dymola software, and the Modelica language. A validation study was also conducted using field-monitored data from an existing two-story mixed-use building. A detailed building model was developed using DesignBuilder software that accurately predicts the

building's energy demand for heating and cooling, with a maximum deviation of 2.5%. The model also effectively simulates indoor thermal conditions, with an average deviation of 0.28 K and 0.27 K in dry-bulb temperatures during two three-day periods in May and September. These results validate the building energy simulation methodology used in this dissertation.

The conclusions of the present thesis are drawn from **Chapters 5** and **6**, where the results of the calculations performed are presented. First, **Chapter 5** provides simulation results regarding building thermal behavior and applying multiple passive building envelope technologies. Firstly, a multi-objective evaluation is conducted on a single-family building, assessing renovation actions, including thermal insulation, window systems, green roof infrastructure, and an air-to-air reversible heat pump. All possible combinations are analyzed to determine the optimal solution based on energy and economic criteria. Next, thermochromic coatings are examined as a rooftop renovation strategy for a single-family building, and this is followed by a study on the combined use of phase change materials and optically advanced cool and thermochromic rooftop coatings. Another study evaluates a two-story residence, combining external wall insulation, PCM rooftop application, a mechanical ventilation system for cooling, and a cool rooftop coating. Finally, three studies focus on thermal comfort analysis. Analytical multi-objective studies are performed to investigate the impact of various passive building envelope technologies on the building's seasonal and yearly thermal performance parallel with the indoor thermal comfort conditions. Thermal comfort calculations are based on indices retrieved from Fanger's model.

Chapter 6 presents simulation results on the combined use of passive envelope technologies and energy systems, forming holistic retrofit scenarios for residential and commercial buildings. Emphasis is placed on renewable-driven heat pump systems integrated with solar thermal and geothermal fields. First, a study determines the maximum number of stories, allowing residential buildings to achieve electrified zero-energy status via photovoltaic installations across Greece's four climatic zones. Next, a comparative dynamic and economic analysis evaluates four renewable thermally driven heat pump systems, air-source, ground-source, dual-source (air and solar), and triple-source (air, solar, and ground), for heating a 40-apartment residential building in Spain. Another study explores the holistic energy retrofit of a large cultural heritage building, integrating passive envelope solutions with a ground-source heat pump and borehole thermal energy storage for space heating. Additionally, the use of an air-to-water high-temperature heat pump with the environmentally friendly R1234ze(E) refrigerant is assessed to replace an oil boiler but retain the existing radiators and piping in a residency in Athens and Thessaloniki. Finally, the hybridization of a water-to-water high-temperature heat pump with a solar thermal system of flat plate collectors and a thermal storage tank is examined as a space-heating system for a residency in Athens.

Finally, Chapter 7 summarizes the key findings of this doctoral dissertation. Specifically, the study demonstrated that thermal insulation is the most effective renovation technology. It achieves the highest primary energy savings, up to 66.1%,

and reduces life cycle costs by up to 29% when combined with a high-efficiency reversible air-to-air heat pump. Additionally, thermal insulation results in the highest improvement of indoor thermal comfort, either as a standalone measure (up to 1.3%) or combined with triple-glazed, low-emittance, argon-filled windows (up to 14.4%). Cool coatings are an effective cooling technique resulting in up to 37% cooling energy savings but are responsible for an up to 31% increase in heating energy demand. Combining them with phase change materials restricts heating penalties up to 17%. Thermochromic coatings are an interesting alternative, resulting in 17.1% annual electricity savings, but are susceptible to optical degradation which makes their renewal within three months necessary. For apartments in multi-story buildings, where rooftop renovation is not an option, exterior shading ranks as the best cooling technique, mechanical ventilation as the second, while thermal insulation is the optimum solution regarding annual energy savings and thermal comfort improvement. Also, a comparison between the national energy performance and the Passive House is performed using field-monitoring data, and it proves that the latter results in 12.4% better thermal comfort conditions and 45.25% lower annual electricity consumption.

The results of the zero-energy building feasibility study identified the maximum number of stories in multi-family buildings that the installation of rooftop photovoltaic systems can fully satisfy, which are six for Chania, five for Athens, four for Thessaloniki, and two for Kastoria. Next, renewable thermally driven heat pumps are found to outperform conventional air-source heat pumps in terms of efficiency but have higher net present costs. Specifically, the triple-source heat pump with solar thermal and geothermal fields is found to show a 17.4% better efficiency and 200 k€ extra net present cost. The corresponding values for the ground-source heat pump are 9.98% and 222 k€, and for dual-source heat pumps, they are 5.57% and 30 k€. Following that, the renovation of a large, historical building with thermal insulation, window replacement, and the installation of a water source heat pump coupled with a borehole geothermal field results in a 36.7% reduction in the final electricity consumption. Finally, replacing oil boilers with air-to-water and water-to-water high-temperature heat pumps is investigated. The first solution is more economically viable, resulting in up to 7.1% primary energy savings, a maximum seasonal coefficient of performance of 2.128, with a simple payback period of around 6 and 8 years, and CO₂ emissions avoidance of up to 35%. On the other hand, solar-assisted heat pumps are more efficient but expensive space heating solutions. The optimal design of the configuration for the city of Athens includes 35 m² of solar collectors and a 2 m³ storage tank, demonstrating a seasonal coefficient of performance of 2.947.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνά τη μείωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου μέσω συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καινοτόμων υλικών και τον βέλτιστο έλεγχο των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Εξετάζονται πολλαπλές καινοτόμες και συμβατικές τεχνολογίες κελύφους για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων εφαρμογής και πιθανού συνδυασμού τους. Επιπλέον, αναλύονται τα συστήματα αντλιών θερμότητας, καθώς και η ενσωμάτωσή τους με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και διαφορετικές τερματικές μονάδες. Η χρήση φωτοβολταϊκών και υβριδικών ηλιακών τεχνολογιών διερευνάται επίσης ως λύση επιτόπιας παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην βέλτιστη ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων, μέσω αξιολογήσεων μονών ή και πολλαπλώς κριτηρίων. Η μελέτη εξετάζει και τις τέσσερις κλιματικές κατηγορίες της Ελλάδας καθώς και άλλα μεσογειακά κλίματα της Ευρώπης, ενώ τα κτίρια που ερευνώνται αφορούν κυρίως σε μονώροφες έως πολυώροφες κατοικίες.

Το **Κεφάλαιο 1** εξετάζει την αναγκαιότητα των ενεργειακών κτιριακών αναβαθμίσεων. Η ραγδαία κλιμακώση των τιμών ενέργειας, η παλαιότητα και η υψηλή ενεργειακή ζήτηση του ελληνικού και ευρωπαϊκού κτιριακού αποθέματος, καθώς και η αυξανόμενη συχνότητα ακραίων καιρικών φαινομένων εντείνουν το φαινόμενο της ενεργειακής φτώχειας και της αδυναμίας πολλών ανθρώπων να εξασφαλίσουν επαρκή θερμική άνεση στα σπίτια τους. Το **Κεφάλαιο 2** παρέχει μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση συμβατικών και καινοτόμων τεχνολογιών κελύφους. Αυτές περιλαμβάνουν θερμομονωτικά υλικά, προηγμένα συστήματα παραθύρων, τεχνολογίες υψηλής θερμικής μάζας, οπτικά προηγμένα υλικά με δυνατότητες ψύξης, μηχανικό αερισμό και λύσεις βιοκλιματικού σχεδιασμού. Τεχνικοοικονομικά δεδομένα για διάφορα μονωτικά υλικά και συστήματα παραθύρων έχουν συλλεχθεί από την αγορά για να παρέχουν πρακτικές γνώσεις. Το **Κεφάλαιο 3** παρέχει μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση των σημαντικότερων ενεργειακών συστημάτων για κτίρια. Σε αυτά περιλαμβάνονται υψηλής απόδοσης και προηγμένες εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων, και υβριδικές ηλιοθερμικές τεχνολογίες, με κύρια εφαρμογή στα κτίρια. Εξετάζονται επίσης λέβητες συμπύκνωσης και ρηχά γεωθερμικά πεδία, είτε οριζόντια πεδία είτε γεωτρήσεις, κατάλληλες για κτιριακές εφαρμογές. Τέλος, αναλύονται τα συστήματα αντλιών θερμότητας, εστιάζοντας στις διάφορες ταξινομήσεις τους βάσει της πηγής ενέργειας και του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, στην ενσωμάτωσή τους με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στη σύζευξή τους με διαφορετικές τερματικές μονάδες και στη χρήση περιβαλλοντικά φιλικών εργαζόμενων μέσων. Τέλος, αναφέρονται επίσης τα συστήματα ψύξης απορρόφησης και προσρόφησης.

Το **Κεφάλαιο 4** παρέχει τη βασική μεθοδολογία αυτής της διατριβής. Περιγράφεται λεπτομερώς η μαθηματική μοντελοποίηση της φυσικής του κτιριακού κελύφους και της λειτουργίας των ενεργειακών συστημάτων του κτιρίου. Παρουσιάζονται τα εξειδικευμένα μοντέλα που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό DesignBuilder, το πρόγραμμα προσομοίωσης EnergyPlus, το λογισμικό Dymola και τη γλώσσα Modelica. Παρουσιάζεται, επίσης, η μελέτη επικύρωσης βάσει μετρήσεων

ηλεκτρικών καταναλώσεων και θερμοκρασιών ενός διώροφου κτιρίου μικτής χρήσης. Ένα λεπτομερές μοντέλο κτιρίου αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό DesignBuilder που προβλέπει με ακρίβεια, μέγιστη απόκλιση 2,5%, τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου για θέρμανση και ψύξη. Το μοντέλο προσομοιώνει επίσης με ακρίβεια τις εσωτερικές θερμικές συνθήκες, με μέση απόκλιση 0,28 K και 0,27 K σε θερμοκρασίες ξηρού βολβού κατά τη διάρκεια δύο τριήμερων περιόδων τον Μάιο και τον Σεπτέμβριο. Τα αποτελέσματα αυτά επικυρώνουν τη μεθοδολογία ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή.

Τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας εξάγονται από τα **Κεφάλαια 5 και 6**, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν. Το **Κεφάλαιο 5** παρέχει τα αποτελέσματα προσομοίωσης σχετικά με τη θερμική συμπεριφορά κτιρίων και την εφαρμογή πολλαπλών τεχνολογιών κελύφους. Πρώτον, για μια μονοκατοικία πραγματοποιείται η πολυκριτηριακή αξιολόγηση της θερμομόνωσης, συστημάτων παραθύρων, πράσινης οροφής και αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα. Αναλύονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης με βάση ενεργειακά και οικονομικά κριτήρια. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι θερμοχρωμικές επιστρώσεις ως στρατηγική ανακαίνισης οροφής μιας μονοκατοικίας, ενώ ακολουθεί μελέτη σχετικά με τη συνδυασμένη χρήση υλικών αλλαγής φάσης και οπτικά προηγμένων ψυχρών και θερμοχρωμικών επιστρώσεων οροφής. Μια άλλη μελέτη αξιολογεί μια διώροφη κατοικία, συνδυάζοντας εξωτερική θερμομόνωση τοίχων, υλικά αλλαγής φάσης στην οροφή, μηχανικό σύστημα αερισμού για δροσισμό και ψυχρή βαφή οροφής. Τέλος, τρεις μελέτες επικεντρώνονται στις εσωτερικές συνθήκες θερμικής άνεσης. Βάσει αναλυτικών πολυκριτηριακών μελετών διερευνάται η επίδραση διαφόρων τεχνολογιών κελύφους στην κτιριακή θερμική συμπεριφορά και συνθήκες εσωτερικής θερμικής άνεσης. Οι υπολογισμοί θερμικής άνεσης βασίζονται σε δείκτες που ανακτώνται από το μοντέλο του Fanger.

Το **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζει αποτελέσματα προσομοίωσης σχετικά με τη συνδυασμένη χρήση τεχνολογιών κελύφους και ενεργειακών συστημάτων, διαμορφώνοντας ολιστικά σενάρια αναβάθμισης. Έμφαση δίνεται σε συστήματα αντλιών θερμότητας που τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ενσωματώνουν ηλιοθερμικά και γεωθερμικά πεδία. Πρώτον, μια μελέτη καθορίζει τον μέγιστο αριθμό ορόφων, που καθιστά δυνατή την πλήρη κάλυψη της ηλεκτρικής απαίτησης κτιρίων από φωτοβολταϊκά συστήματα οροφής. Στη συνέχεια, μια συγκριτική ενεργειακή και οικονομική ανάλυση αξιολογεί τέσσερα συστήματα αντλιών θερμότητας που χρησιμοποιούν ως πηγή τον αέρα, το έδαφος, τον αέρα και τον ήλιο (διπλή), και τον αέρα, τον ήλιο και το έδαφος (τριπλή), για τη θέρμανση μιας πολυκατοικίας 40 διαμερισμάτων στην Ισπανία. Επόμενη μελέτη διερευνά την ολιστική ενεργειακή αναβάθμιση ενός μεγάλου κτιρίου πολιτιστικής κληρονομιάς, συνδυάζοντας λύσεις κελύφους με αντλία θερμότητας συζευγμένη με γεωθερμικό πεδίο για θέρμανση. Επιπλέον, αξιολογείται η χρήση αντλίας θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας αέρα-νερού με το φιλικό προς το περιβάλλον ψυκτικό μέσο R1234ze(E) ως λύση αντικατάστασης λέβητα πετρελαίου, με την διατήρηση των υφιστάμενων θερμαντικών

σωμάτων και σωληνώσεων. Τέλος, μελετάται ο υβριδισμός μιας αντλίας θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας νερού-νερού με ηλιοθερμικό πεδίο απλών επίπεδων συλλεκτών σε σύνδεση με δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης για εφαρμογή σε κατοικία.

Στο **Κεφάλαιο 7** συνοψίζονται τα σημαντικότερα ευρήματα της παρούσας διατριβής. Αρχικά, η θερμομόνωση διακρίνεται ως η πιο αποδοτική τεχνολογία αναβάθμισης, επιτυγχάνοντας μείωση πρωτογενούς ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής, έως 66,1% και 29,0%, όταν συνδυάζεται με αναστρέψιμη αντλία θερμότητας αέρα-αέρα υψηλής απόδοσης, και μέγιστη βελτίωση συνθηκών θερμικής άνεσης, έως 1,3% ή 14,4% όταν εφαρμόζεται μόνη της ή συνδυάζεται με προηγμένα συστήματα παραθύρων. Οι ψυχρές βαφές είναι μια αποτελεσματική λύση μείωσης φορτίων ψύξης, έως και 37%, ωστόσο ευθύνονται για την έως και 31% αύξηση της ζήτησης ενέργειας θέρμανσης. Ο συνδυασμός τους με υλικά αλλαγής φάσης περιορίζει την αύξηση των φορτίων θέρμανσης έως και 17%. Οι θερμοχρωμικές επιστρώσεις είναι μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση, που οδηγεί σε 17,1% ετήσια εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο το φαινόμενο της οπτικής υποβάθμισής τους καθιστά απαραίτητη την ανανέωσή τους εντός τριών μηνών. Για διαμερίσματα σε πολώροφα κτίρια, όπου η ανακαίνιση οροφής δεν αποτελεί επιλογή, η εξωτερική σκίαση κατατάσσεται ως η καλύτερη λύση μείωσης ψυκτικών φορτίων, ο μηχανικός αερισμός ως η δεύτερη, ενώ η θερμομόνωση ως η βέλτιστη λύση όσον αφορά στην ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας και στη βελτίωση της θερμικής άνεσης. Επίσης, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ του εθνικού κανονικού ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και του προτύπου του Παθητικού Κτιρίου και αποδεικνύεται ότι το τελευταίο οδηγεί σε 12,4% καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεσης και 45,25% χαμηλότερη ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση.

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών οροφής μπορεί να υπερκαλύψει την ετήσια απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε κατοικίες έως έξι ορόφους στα Χανιά, πέντε στην Αθήνα, τέσσερις στη Θεσσαλονίκη και δύο στην Καστοριά. Οι αντλίες θερμότητας που τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υπερβαίνουν τις συμβατικές αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα σε απόδοση, αλλά και κόστος. Συγκεκριμένα, η αντλία θερμότητας τριπλής ενέργειας παρουσιάζει 17,4% καλύτερη απόδοση και 200 k€ επιπλέον καθαρό τρέχον κόστος. Οι αντίστοιχες τιμές για την αντλία θερμότητας με πηγή το έδαφος είναι 9,98% και 222 k€, ενώ για την αντλία θερμότητας διπλής πηγής, είναι 5,57% και 30 k€. Επιπλέον, η ανακαίνιση ενός μεγάλου, ιστορικού κτιρίου με θερμομόνωση, αντικατάσταση παραθύρων και εγκατάσταση αντλίας θερμότητας σε σύζευξη με γεωθερμικό πεδίο συμβάλλει στη μείωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας κατά 36,7%. Τέλος, διερευνάται η αντικατάσταση των λεβήτων πετρελαίου με αντλίες θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας αέρα-νερού και νερού-νερού. Η πρώτη λύση είναι πιο οικονομική και οδηγεί σε εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας έως και 7,1%, με μέγιστο εποχιακό συντελεστή απόδοσης 2.128, απλή περίοδο απόσβεσης περίπου 6 και 8 ετών, και μείωση εκπομπών CO₂ έως και 35%. Αντίθετα, οι αντλίες θερμότητας με ηλιακή υποβοήθηση είναι πιο αποδοτικές αλλά ακριβές λύσεις θέρμανσης χώρου. Ο βέλτιστος σχεδιασμός της περιλαμβάνει 35 m² ηλιακών συλλεκτών και δεξαμενή αποθήκευσης 2 m³, με εποχιακό συντελεστή απόδοσης 2.947.