

Εξελιγμένες Στρατηγικές Ελέγχου για την Επίτευξη Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Κτήρια

Κυριάκος Κατσιγαράκης, Γιώργος Ι. Γιαννάκης, Παρθένα Εξιζίδου, Γιώργος Δ. Κόντες, Γεώργιος Ν. Λιλής, Ηλίας Β. Κοσματόπουλος, και Δημήτριος Β. Ρόβας

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται η κεντρική ιδέα και τα αποτελέσματα του προγράμματος PEBBLE: το PEBBLE είναι ένα πρόγραμμα το οποίο στοχεύει στην ανάπτυξη εξελιγμένων Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών, οι οποίες θα υποστηρίξουν τη λειτουργία Κτηρίων Θετικού ή Μηδενικού Ισοζυγίου. Στο σχεδιασμό και τη λειτουργία τέτοιων κτηρίων ρεαλιστικό στόχο αποτελεί η μεγιστοποίηση της Καθαρής Παραγόμενης Ενέργειας, μέσω ευφύους διαμόρφωσης της ζήτησης, ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση παραγωγής-κατανάλωσης. Με την πεποίθηση ότι η μεγιστοποίηση της Καθαρής Παραγόμενης Ενέργειας για Κτήρια Θετικού Ισοζυγίου επιτυγχάνεται με τη λήψη καλύτερων αποφάσεων ελέγχου, παρουσιάζεται μια μεθοδολογία ελέγχου και βελτιστοποίησης, η οποία συνδυάζει τεχνικές Προβλεπτικού Ελέγχου βασισμένου σε Μοντέλα και Προσαρμοστικής Βελτιστοποίησης. Στο σύστημα PEBBLE συνυπάρχουν τρία βασικά συστατικά: α) μοντέλα θερμικής προσομοίωσης, β) αισθητήρες, επενεργητές, και διεπαφές χρήστη, και γ) γενικά εργαλεία ελέγχου και βελτιστοποίησης. Το πιθανό περιθώριο εξοικονόμησης ενέργειας χρησιμοποιώντας εξελιγμένες στρατηγικές ελέγχου παρουσιάζεται με τη βοήθεια πειραμάτων προσομοίωσης: υπάρχουν σημαντικά ενεργειακά οφέλη από τη χρήση εξελιγμένων στρατηγικών ελέγχου, συγκριτικά με παραδοσιακές μεθόδους ελέγχου βασισμένες σε κανόνες.

I. Εισαγωγή

Στο σχεδιασμό και τη λειτουργία Κτηρίων Θετικού (ή Μηδενικού) Ενεργειακού Ισοζυγίου (ΚΘΕΙ ή ΚΜΕΙ) ένας ρεαλιστικός στόχος είναι η μεγιστοποίηση της Καθαρής Παραγόμενης Ενέργειας (ΚΠΕ), μέσω ευφύους διαμόρφωσης της ζήτησης, ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση παραγωγής-κατανάλωσης. Σε αυτή την κατεύθυνση, απαιτούνται αποφάσεις ελέγχου των υποσυστημάτων του κτηρίου σε πραγματικό χρόνο και πρόνοια για απρόβλεπτες συμπεριφορές των χρηστών και διαφοροποιήσεις στις καιρικές συνθήκες. Οι αποφάσεις αυτές έχουν άμεση επίδραση στη θερμική άνεση των χρηστών, στην εξοικονόμηση ενέργειας και τελικά, στην ΚΠΕ. Η σύνθετη αλληλεπίδραση ανάμεσα στις διάφορες παραμέτρους αποκλείει την υλοποίηση εμπειρικών μεθόδων και τεχνικών βασισμένων σε στατικούς κανόνες.

Με την πεποίθηση ότι η μεγιστοποίηση της Καθαρής Παραγόμενης Ενέργειας για Κτήρια Θετικού Ισοζυγίου επιτυγχάνεται με τη λήψη καλύτερων αποφάσεων ελέγχου, στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται μια μεθοδολογία ελέγχου και βελτιστοποίησης, η οποία συνδυάζει τεχνικές Προβλεπτικού Ελέγχου βασισμένου σε Μοντέλα και Προσαρμοστικής Βελτιστοποίησης. Το σύστημα PEBBLE περιέχει τρία βασικά δομικά στοιχεία: πρώτον, μοντέλα θερμικής προσομοίωσης, τα οποία αποτελούν ακριβείς αναπαραστάσεις του κτηρίου και των υποσυστημάτων του· δεύτερον, αισθητήρες, επενεργητές, και διεπαφές χρηστών για την διεπικοινωνία ανάμεσα στο φυσικό κτήριο και το επίπεδο προσομοίωσης· και τρίτον, γενικά εργαλεία ελέγχου και βελτιστοποίησης τα οποία χρησιμοποιούν τις μετρήσεις από τους αισθητήρες, σε συνδυασμό με τα θερμικά μοντέλα, για τη λήψη ευφύων αποφάσεων ελέγχου. Οι χρήστες του κτηρίου έχουν διττό ρόλο στο πλαίσιο PEBBLE: μέσω διεπαφών ενημερώνουν τις προτιμήσεις τους στο σύστημα PEBBLE όσον αφορά τη θερμική άνεση του χώρου, λειτουργώντας σαν “αισθητήρες”, και το σύστημα επιστρέφει πληροφορίες σχετικές με την κατανάλωση, συμβάλλοντας στην ενεργειακή συνειδητοποίηση των χρηστών. Η γενικότητα της προτεινόμενης μεθόδου επιτρέπει τη χρήση της σε ένα μεγάλο εύρος κτηρίων, ανεξάρτητα από διαφοροποιήσεις στην τοποθεσία, στις καιρικές συνθήκες, στα υλικά κατασκευής ή στα επιμέρους υποσυστήματα. Για το λόγο αυτό το σύστημα PEBBLE θα αξιολογηθεί σε τρία κτήρια επίδειξης, τα οποία διαφέρουν σε σχεδίαση και ενεργειακή απόδοση και βρίσκονται σε διαφορετικές

Οι Κ. Κατσιγαράκης, Γ.Ι. Γιαννάκης, Π. Εξιζίδου, Γ.Δ. Κόντες, Γ.Ν. Λιλής, και Δ.Β. Ρόβας ανήκουν στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά και στο Ινστιτούτο Πληροφορικής & Τηλεματικής, Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Θεσσαλονίκη.

Ο Η.Β. Κοσματόπουλος ανήκει στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη και στο Ινστιτούτο Πληροφορικής & Τηλεματικής, Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Θεσσαλονίκη.

ευρωπαϊκές πόλεις. Το σύστημα PEBBLE δεν στοχεύει απλά στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, αλλά στην αρμονική και αποδοτική χρήση όλων των εγκατεστημένων συστημάτων του κτηρίου, λαμβάνοντας υπόψιν τον ανθρώπινο παράγοντα, και προσαρμόζοντας τις αποφάσεις σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο όταν παρουσιαστούν αποκλίσεις στην προβλεπόμενη λειτουργία.

Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα του έργου PEBBLE. Το σύστημα θεωρείται σαν ένα δυναμικό σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει διάφορα υποσυστήματα και τους χρήστες. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό, μια και οι ενέργειες των χρηστών (για παράδειγμα το άνοιγμα ή το κλείσιμο ενός παραθύρου) επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου και διαφοροποιούν τις αποφάσεις ελέγχου. Το κτήριο αντιδρά σε εξωτερικές (καιρός) και εσωτερικές (χρήστες) διεγέρσεις σύμφωνα με τη δυναμική του — η οποία ορίζεται από την κατασκευή του κτηρίου — με τη βοήθεια επενεργητών, οι οποίοι λειτουργούν σύμφωνα με τις αποφάσεις που λαμβάνονται από το σύστημα PEBBLE.

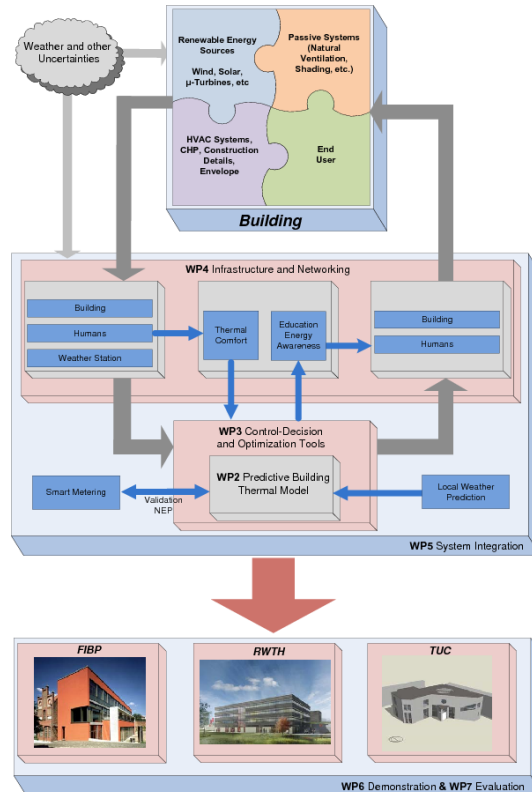


Fig. 1. Το έργο PEBBLE

II. Μοντέλα Προσομοίωσης

Το σύστημα PEBBLE θα παρουσιαστεί και αξιολογηθεί σε τρία κτήρια τα οποία διαφέρουν σε σχεδίαση και ενεργειακή απόδοση και είναι διασκορπισμένα σε διαφορετικές τοποθεσίες σε όλη την Ευρώπη, οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση στις καιρικές συνθήκες. Η επιλογή των κτηρίων βοηθά στην αναλυτική και ολοκληρωμένη αξιολόγηση του συστήματος PEBBLE.

Η ανάπτυξη του συστήματος Βελτιστοποίησης και Ελέγχου Κτηρίων (BEK) προϋποθέτει την ύπαρξη αναλυτικών μοντέλων προσομοίωσης των τριών κτηρίων. Τα κτήρια είναι σύνθετα συστήματα και για να είναι λεπτομερής η προσομοίωση, πρέπει να ληφθούν υπόψιν διάφορες παράμετροι, όπως οι κλιματικές συνθήκες, η γεωμετρία του κτηρίου, η φυσική του, τα συστήματα κλιματισμού, τα συστήματα παραγωγής ενέργειας, ο φυσικός εξαερισμός και η συμπεριφορά των χρηστών. Για την δημιουργία ενός λεπτομερούς μοντέλου προσομοίωσης, δεν απαιτείται μόνο μια λεπτομερής αναπαράσταση του κτηρίου και των διάφορων υποσυστημάτων, αλλά και μια ακριβής εξομίωση της αλληλεπίδρασης και της ένωσης όλων αυτών. Για το σκοπό αυτό, μια

σειρά από εργαλεία προσομοίωσης, με διαφορετικές δυνατότητες είναι διαθέσιμα — σε μελέτη του 2005 [1] συγκρίνονται 20 διαδεδομένα λογισμικά προσομοίωσης ως προς τη δυνατότητα μοντελοποίησης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Στο έργο PEBBLE χρησιμοποιούνται τρία λογισμικά θερμικής μοντελοποίησης: το TRNSYS [5], η γλώσσα Modelica με μια ενσωματωμένη ειδική βιβλιοθήκη για εξομοίωση κτηρίων [4] και το EnergyPlus [2]. Χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός λογισμικά προσομοίωσης, για να καταδειχθεί η γενικότητα του συστήματος BEK που έχει αναπτυχθεί και η απόδοσή του, ανεξάρτητα από το λογισμικό ανάπτυξης θερμικών μοντέλων κτηρίων που χρησιμοποιείται.

Τα κτήρια του PEBBLE

- FIBP: Το πρώτο κτήριο εφαρμογής είναι το Centre for Sustainability Building του Fraunhofer Institute for Building Physics, στο Κάσελ της Γερμανίας. Το κτήριο είναι εξοπλισμένο με επιδαπέδιο σύστημα ψύξης και θέρμανσης, χωριστά ελεγχόμενο για κάθε γραφείο του κτιρίου. Επιπρόσθετα έχουν εφαρμοστεί σημαντικό πλήθος συστημάτων και τεχνολογιών για εξοικονόμηση ενέργειας. Η μοντελοποίηση του κτηρίου πραγματοποιήθηκε στο TRNSYS (Εικόνα 2).



Fig. 2. Το κτήριο στο Κάσελ, μοντελοποιημένο σε TRNSYS

- RWTH: Το δεύτερο κτήριο είναι το E.ON Energy Research Center του RWTH Πανεπιστημίου του Άαχεν στη Γερμανία. Εκτός του ότι αποτελεί το μεγαλύτερο από τα τρία κτήρια, παρουσιάζει αυξημένες και πολύπλοκες θερμικές απαιτήσεις, καθώς αποτελείται από γραφεία, αίθουσες συνεδριάσεων, αλλά και μεγάλα εργαστήρια συγκεκριμένων κλιματικών απαιτήσεων. Η “καλή” ενεργειακή επίδοση του εν λόγω κτηρίου διασφαλίζεται από μια πλούσια συλλογή μοντέρνων τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων: αντλίες θερμότητας φυσικού αερίου, επιδαπέδια θέρμανση και ψύξη, εξαερισμό με εναλλάκτες θερμότητας, χρήση φυσικού φωτισμού. Επιπλέον το κτήριο έχει εγκατεστημένα: μια φωτοβολταϊκή συστοιχία, μια ανεμογεννήτρια καθώς και συστήματα ανάκτησης θερμότητας στο υπολογιστικό κέντρο, τα οποία την χειμερινή περίοδο διοχετεύουν θερμότητα από το υπολογιστικό κέντρο στα γραφεία και τις αίθουσες συνεδριάσεων. Το κτήριο μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα Modelica (Εικόνες 3 και 4).

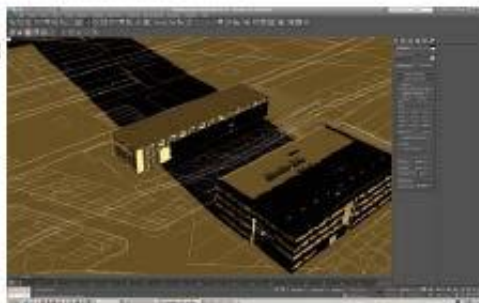


Fig. 3. Σκίαση στις 21/12 και ώρα 09:00

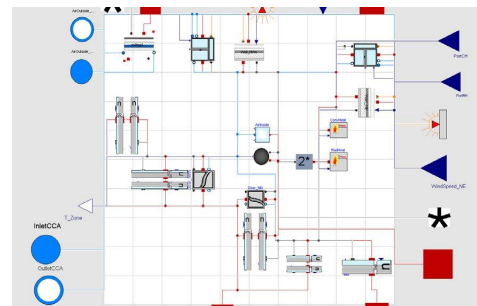


Fig. 4. Μοντελοποίηση του κτηρίου του RWTH σε Modelica

- TUC: Το τρίτο κτήριο στεγάζει την Τεχνική Υπηρεσία του Πολυτεχνείου Κρήτης, στα Χανιά. Το κτήριο αυτό χαρακτηρίζεται από σημαντικά προβλήματα θερμικής άνεσης και, σύμφωνα με ενεργειακές επιθεωρήσεις και αποτελέσματα προσομοιώσεων, έχει υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, της τάξης 130 kWh/m^2 , για τη λειτουργία του. Το κτήριο του Π.Κ. έχει συμβατική σχεδίαση και αρκετά προβλήματα οπότε υπό την έννοια αυτή αποτελεί αρχέτυπο για σημαντικό πλήθος από υπάρχοντα κτήρια στην Ελλάδα και στο Εξωτερικό. Η φάση πιλοτικής εφαρμογής για το συγκεκριμένο κτήριο θα προχωρήσει σε δύο φάσεις: στην πρώτη, θα εφαρμοστούν «προφανείς» χαμηλού κόστους τροποποιήσεις· στη δεύτερη φάση θα εγκατασταθεί μια φωτοβολταϊκή συστοιχία καθώς και απλά συστήματα τα οποία θα ελέγχονται από το σύστημα PEBBLE. Το κτήριο αυτό είναι μοντελοποιημένο σε EnergyPlus (Εικόνες 5 και 6).

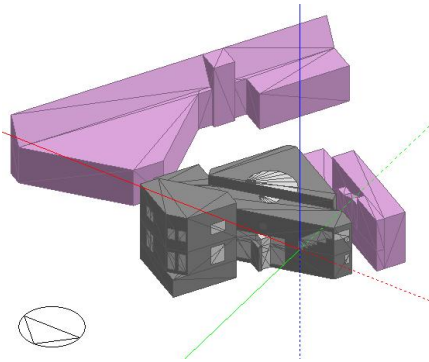


Fig. 5. Γεωμετρία του προσομοιωμένου μοντέλου στο DesignBuilder



Fig. 6. Σκίαση στις 21/06 και ώρα 09:00

III. Βελτιστοποίηση και Έλεγχος Κτηρίων

Για την επίτευξη κτηρίων με μηδενικό ενεργειακό ισοζύγιο, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας BEK, η οποία θα ανταποκρίνεται στους ακόλουθους στόχους:

- Από τη μια πλευρά, θα συμπεριλαμβάνει και θα στηρίζεται σε ακριβή μοντέλα του κτηρίου, αλλά ταυτόχρονα, θα έχει χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα και θα μπορεί να εφαρμοστεί σε μια ευρεία γκάμα κτηρίων και υποσυστημάτων ελέγχου.
- Θα μπορεί να εξαλείψει τις ανακρίβειες στη μοντελοποίηση του κτηρίου και να προσαρμόζει γρήγορα και σθεναρά την απόδοση του συστήματος, όποτε απρόβλεπτες αλλαγές — για παράδειγμα μεταβολές του καιρού ή στις συνήθειες των χρηστών — επηρεάζουν τη λειτουργία του. Με άλλα λόγια, απαιτείται ένα αυτοματοποιημένο και προσαρμοστικό σύστημα, το οποίο θα βελτιστοποιεί αδιάκοπα τη λειτουργία του συστήματος BEK, ώστε να αντισταθμίζει τις αναπόφευκτες ανακρίβειες των μοντέλων προσομοίωσης και των προβλέψεων των καιρικών συνθηκών και των συνηθειών των χρηστών.

Η πλήρως αυτοματοποιημένη προσαρμοστική μεθοδολογία που περιγράφεται στα [3], [7], [8], [9], [10] μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς αυτή την κατεύθυνση. Η λειτουργία μιας τέτοιας μεθοδολογίας — προσαρμοσμένη στην βελτιστοποίηση συστημάτων BEK για ΚΜΕΙ — συνοψίζεται στα ακόλουθα (Εικόνα 7):

- Σε πρώτη φάση αναπτύσσεται ένα θερμικό μοντέλο του συστήματος, χρησιμοποιώντας θερμικά κυκλώματα, τα οποία αποτελούνται από δίκτυα Αντιστάσεων - Πυκνωτών (ΑΠ) [11]. Αυτά τα δίκτυα περιγράφουν την προσωρινή αποθήκευση και την εξασθένιση της θερμικής ενέργειας στα δομικά στοιχεία του κτηρίου, και δεχόμενα σαν είσοδο τις καιρικές προβλέψεις και την ύπαρξη χρηστών για την επόμενη μέρα, επιστρέφουν τις εσωτερικές θερμικές συνθήκες στο κτήριο. Τα δίκτυα ΑΠ χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη ενός προσεγγιστικού μοντέλου στο χώρο των καταστάσεων (state-space model), το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό ενός αρχικού ελεγκτή για όλους τους επενεργητές του κτηρίου (καλοριφέρ, παράθυρα, κ.τ.λ.). Ο ελεγκτής αυτός σχεδιάζεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας, διατηρώντας όμως εσωτερικές συνθήκες θερμικής άνεσης. Σε αυτή την προσέγγιση τα λάθη στη μοντελοποίηση είναι αναπόφευκτα, γι' αυτό ο ελεγκτής που σχεδιάζεται αποτελεί το σημείο εκκίνησης του αλγόριθμου Cognitive-Adaptive-Optimization (CAO, Εικόνα 7).

- Το αρχικό μοντέλο βασισμένο στο δίκτυο ΑΠ αντικαθίσταται από ένα πιο λεπτομερές μοντέλο θερμικής προσομοίωσης, αναπτυγμένο με τη βοήθεια εξειδικευμένων πακέτων λογισμικού (όπως τα EnergyPlus, TRNSYS ή Modelica). Χρησιμοποιώντας τον εξομοιωτή και προβλέψεις για τον καιρό και για τους χρήστες, ένα off-line σύστημα βελτιστοποίησης ενεργοποιείται, και ο αρχικός ελεγκτής βελτιώνεται και προσαρμόζεται στις προβλέψεις για την επόμενη μέρα.

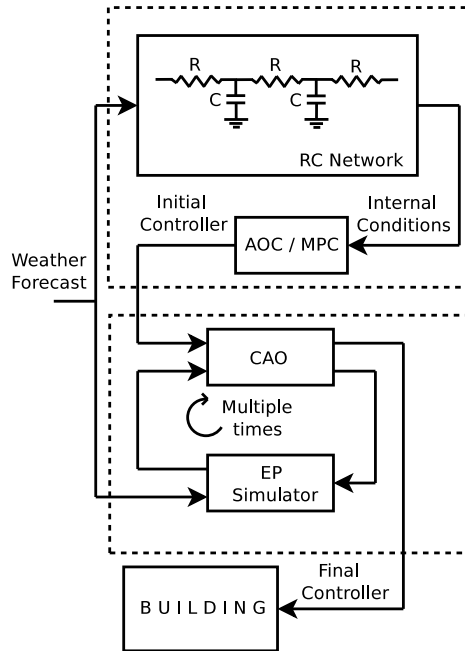


Fig. 7. Έλεγχος με χρήση μοντέλου

IV. Περιθώριο Βελτίωσης Απόδοσης

Το σύστημα PEBBLE έχει ελεγχθεί σε ένα υπο-κτήριο, το οποίο περιέχει λιγότερες θερμικές ζώνες, του κτηρίου που βρίσκεται στο Κάσελ και έχει συγκριθεί με παραδοσιακές μεθόδους ελέγχου βασισμένες σε κανόνες (οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε κτήρια), δίνοντας καλύτερα αποτελέσματα στην ενεργειακή κατανάλωση και στα επίπεδα θερμικής άνεσης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις μεθοδολογίες, την υλοποίηση και πρόσθετα αποτελέσματα, περιέχονται στα [3], [6].

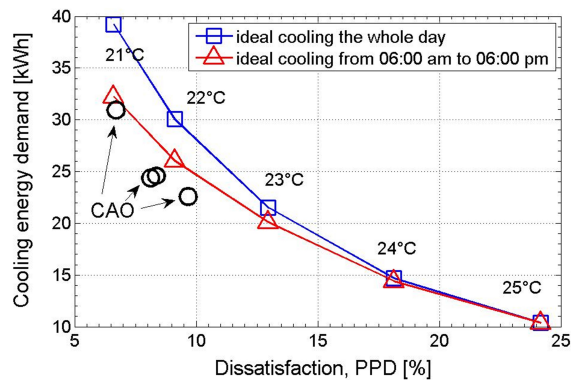


Fig. 8. Απόδοση του PEBBLE συστήματος BEK σε σύγκριση με στρατηγικές ελέγχου βασισμένες σε κανόνες

Πιο σύνθετες μελέτες προσομοίωσης καταδεικνύουν ότι καλύτερη επιλογή ενεργειών ελέγχου μπορεί να

συνεισφέρει έως και 20% μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στις περισσότερες περιπτώσεις λειτουργίας του κτηρίου.

V. Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε εν μέρει από το πρόγραμμα PEBBLE, το οποίο χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του 7ου Προγράμματος Πλαισίου στην περιοχή των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών για εξοικονόμηση ενέργειας. Το πρόγραμμα συντονίζεται από το Πολυτεχνείο Κρήτης. Άλλοι συμμετέχοντες είναι: Fraunhofer-Gesellschaft zur Foerderung der Angewandten Forschung E.V (Γερμανία), Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen (Γερμανία); Technische Universitaet Graz (Αυστρία), Association pour la Recherche et le Developpement des Methodes et Processus Industriels – ARMINES (Γαλλία), CSEM Centre Suisse D'Electronique et de Microtechnique SA (Ελβετία), και, Saia-Burgess Controls AG (Ελβετία).

References

- [1] D.B. Crawley, J.W. Hand, M. Kummert, and B.T. Griffith. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4):661–673, 2008.
- [2] D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y.J. Huang, C.O. Pedersen, R.K. Strand, R.J. Liesen, D.E. Fisher, M.J. Witte, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4):319–331, 2001.
- [3] G.I. Giannakis, G.D. Kontes, E.B. Kosmatopoulos, and D.V. Rovas. A model-assisted adaptive controller fine-tuning methodology for efficient energy use in buildings. In *Mediterranean Conference on Control & Automation, 20011. Under review*.
- [4] T. Haase, A. Hoh, P. Matthes, and D. Muller. Integrated simulation of building structure and building services installations with modelica. In *Proceedings of Roomvent, 2007*.
- [5] S.A. Klein, W.A. Beckman, and J.A. Duffie. TRNSYS - A TRANSIENT SIMULATION PROGRAM. *ASHRAE Transactions*, 82(1):623–633, 1976.
- [6] G.D. Kontes, G.I. Giannakis, G.N. Lilis, D.V. Rovas, and E.B. Kosmatopoulos. PEBBLE BO&C System. PEBBLE Deliverable 3.2, 2011.
- [7] E.B. Kosmatopoulos. An adaptive optimization scheme with satisfactory transient performance. *Automatica*, 45(3):716–723, 2009.
- [8] E.B. Kosmatopoulos and A. Kouvelas. Large-Scale Nonlinear Control System Fine-Tuning through Learning. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 20(6):1009–1023, 2009.
- [9] E.B. Kosmatopoulos, M. Papageorgiou, A. Vakouli, and A. Kouvelas. Adaptive fine-tuning of nonlinear control systems with application to the urban traffic control strategy TUC. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(6):991–1002, 2007.
- [10] A. Kouvelas, K. Aboudolas, E.B. Kosmatopoulos, and M. Papageorgiou. Adaptive Performance Optimization for Large-Scale Traffic Control Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, under review.
- [11] K. Lee and J.E. Braun. Model-based demand-limiting control of building thermal mass. *Building and Environment*, 43(10):1633–1646, 2008.