

Έκθεση Προόδου: Κατανεμημένη Τεχνητή Νοημοσύνη για τη Διαχείριση της Άνεσης και της Ενέργειας σε Νοσοκομειακά Κτήρια

Έκθεση Προόδου Ακαδημαϊκού Έτους 2021-2022

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής: Δρ. Παναγιώτης Κοφινάς

Γνωστικό Αντικείμενο: Κατανεμημένη Τεχνητή Νοημοσύνη για τη Διαχείριση της Άνεσης και της Ενέργειας σε Νοσοκομειακά Κτήρια

Επικεφαλής Μεταδιδακτορικής Έρευνας: Δρ. Αναστάσιος Ντούνης

Περίληψη

Ο μεταδιδακτορικός ερευνητής Παναγιώτης Κοφινάς έγινε δεκτός από το τμήμα Μηχανικών Βιοϊατρικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής στις 29/10/2020, ύστερα από τη σχετική έγκριση της γενικής συνέλευσης του τμήματος. Η έρευνά του εστιάζει στην διαχείριση της άνεσης και της ενέργειας σε νοσοκομειακά κτήρια με τεχνικές κατανεμημένης τεχνητής νοημοσύνης. Τελεί υπό την επίβλεψη του καθηγητή Δρ. Αναστάσιου Ντούνη, Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Ερευνητική Εργασία

Η παρούσα μεταδιδακτορική έρευνα εστιάζει στη μελέτη, το σχεδιασμό και την υλοποίηση ευφυών πολυπρακτορικών συστημάτων για την διαχείριση της άνεσης και της ενέργειας σε νοσοκομειακά κτήρια.

Δεδομένου ότι οι άνθρωποι περνούν το μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους μέσα σε κτίρια, η διατήρηση του εσωτερικού περιβάλλοντος σε καλά επίπεδα, για τη διασφάλιση της υγείας και της παραγωγικότητας [1], είναι ένα κρίσιμο ζήτημα. Αυτό το ζήτημα πρέπει να συνδιαστεί και με την αντίστοιχη εξοικονόμηση ενέργειας

αφού τα κτήρια είναι υπεύθυνα για το 40% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης και για το 30% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα νοσοκομεία ως κτήρια έχουν μία από τις υψηλότερες καταναλώσεις ενέργειας στον τριτογενή τομέα. Αυτή η κατανάλωση ενέργειας προορίζεται για την κάλυψη των θερμικών αναγκών (θέρμανση χώρων, παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, παραγωγή ατμού για θέρμανση, αποστείρωση, μαγείρεμα) και των ηλεκτρικών αναγκών (κλιματισμός, φωτισμός, λειτουργία ιατρικών μηχανημάτων, κλπ.). Οι βασικότεροι λόγοι για την τόσο υψηλή κατανάλωση ενέργειας των νοσοκομείων είναι η συνεχής λειτουργία τους όλο το εικοσιτετράωρο καθ' όλη την διάρκεια του έτους, τα ειδικά επίπεδα άνεσης τα οποία απαιτούνται για την υγεία των ασθενών καθώς επίσης και οι ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας διάφορων χώρων π.χ. χειρουργεία.

Οι τρεις κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συνολική άνεση σε ένα κτίριο είναι η θερμική άνεση, η ποιότητα του εσωτερικού αέρα και η οπτική άνεση. Η θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος είναι ένας καλός δείκτης της θερμικής άνεσης, η συγκέντρωση του CO₂ είναι ένας καλός δείκτης ποσότητας του εσωτερικού αέρα ενώ το επίπεδο φωτισμού είναι αντιπροσωπευτικός δείκτης της οπτικής άνεσης [2]. Για να διατηρούνται οι δείκτες σε αποδεκτά επίπεδα, το σύστημα θέρμανσης/ψύξης, το σύστημα εξαερισμού και το σύστημα τεχνητού φωτισμού, (που λειτουργούν ως ενεργοποιητές στο πλαίσιο ελέγχου) θα πρέπει ταυτόχρονα να ελέγχονται κατάλληλα. Υπάρχουν πολλές έρευνες για τη θερμική άνεση σε κτίρια με ενεργοποιητές HVAC, ωστόσο οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες επικεντρώνονται μόνο στον έλεγχο θερμοκρασίας [3] ή στον έλεγχο θερμοκρασίας/σχετικής υγρασίας [4-9] και δεν επιδρούν στους άλλους δύο δείκτες. Λίγες έρευνες εξετάζουν μόνο τη διατήρηση της οπτικής άνεσης σε υψηλά επίπεδα με τη χρήση τεχνητού φωτισμού [10,11] όπως επίσης, λίγες έρευνες προτείνουν προσεγγίσεις για τον έλεγχο μόνο του αερισμού για τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα [1,12]. Καμία από τις προαναφερθείσες έρευνες δεν θεωρεί την εσωτερική άνεση του κτιρίου ως ένα ενιαίο σύστημα των τριών παραγόντων που αναφέραμε παραπάνω.

Ορισμένες έρευνες προσεγγίζουν το προαναφερόμενο πρόβλημα με ελεγκτές ασαφούς λογικής [13-15] και πολυπρακτορικά συστήματα (MAS) [16-18], για τη διατήρηση των υψηλών επιπέδων άνεσης σε εσωτερικούς χώρους και ταυτόχρονα

τη μείωση της συνολικής κατανάλωσης των κτιρίων ελέγχοντας την εσωτερική θερμοκρασία, την συγκέντρωση CO₂ καθώς και την φωτεινότητα του εσωτερικού χώρου. Αυτές οι προσεγγίσεις όμως εξαρτώνται κυρίως από υποκειμενικές γνώσεις για τον καθορισμό των παραμέτρων και δεν αναπτύσσουν κανένα μηχανισμό μάθησης για την προσαρμογή της συμπεριφοράς τους όταν αλλάζει η δυναμική του κτιρίου.

Επιπλέον, στις περισσότερες από αυτές τις περιπτώσεις, ένας κεντρικός πράκτορας ενεργεί ως συντονιστής όλων των τοπικών πρακτόρων, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε ολική κατάρρευση του συστήματος όταν δημιουργηθεί βλάβη στον συντονιστή πράκτορα.

Το πρόβλημα λοιπόν προσδιορίζεται αφενός στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και αφετέρου στην επίτευξη της άνεσης, η οποία περιλαμβάνει την ανθρώπινη ικανοποίηση όσον αφορά τα επίπεδα θερμικής και οπτικής άνεσης καθώς και την ποιότητα του αέρα. Έτσι το ισοζύγιο των δύο είναι αναγκαίο για ένα βιώσιμο και έξυπνο νοσοκομειακό κτήριο. Η επίτευξη αυτή θα πρέπει να πραγματοποιείται από ένα πλήρως αποκεντρωμένο σύστημα έτσι ώστε να αποφεύγεται η ολική κατάρρευση του συστήματος όταν συμβαίνουν τοπικές βλάβες και ταυτόχρονα αυτό το σύστημα να έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται σε τυχόν αλλαγές του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Πρόσφατα, προτάθηκαν μέθοδοι ενισχυτικής μάθησης για την ενίσχυση των προτεινόμενων συστημάτων με μηχανισμούς μάθησης, ωστόσο αυτές οι προσεγγίσεις εστιάζουν στην επίτευξη μόνο της θερμικής άνεσης με ταυτόχρονη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης [19, 20]. Έτσι, τα ευφυή πολυπρακτορικά συστήματα φαίνονται πολλά υποσχόμενα στο να δίνουν λύσεις στις προαναφερόμενες περιπτώσεις.

Στα πλαίσια της μεταδιδακτορικής έρευνας θα πραγματοποιηθεί ανάπτυξη πολύπρακτορικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας και άνεσης βασισμένο σε αλγορίθμους ενισχυτικής μάθησης με ασαφή λογική, ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της ανθρώπινης πληρότητας του χώρου και αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του κτηρίου. Για την υλοποίηση έχει υιοθετηθεί το λογισμικό Matlab/Simulink, το οποίο επιτρέπει την ανάπτυξη των μοντέλων και των κυκλωμάτων ελέγχου που μπορούν να υπάρξουν σε ένα κτήριο. Επίσης, επιτρέπει

την ανάπτυξη μαθηματικών και νεύρο-ασαφών μοντέλων και τον προγραμματισμό ευφυών πρακτόρων-ελεγκτών με μεθόδους ενισχυτικής μάθησης.

Ο μεταδιδακτορικός ερευνητής συγκεκριμένα ασχολήθηκε:

- **Με την ενσωμάτωση όλων των μοντέλων σε μια ενιαία προσομοίωση.** Τα μοντέλα του κτηρίου που αναπτύχθηκαν για θερμοκρασία, φωτισμό και CO₂ μαζί με το πολυπρακτορικό σύστημα που αναπτύχθηκε ενσωματώθηκαν σε μια προσομοίωση. Τα κλιματολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αντλήθηκαν από την βάση δεδομένων του TranSys. Επίσης, για τη σύγκριση της απόδοσης του πολυπρακτορικού συστήματος δημιουργήθηκε ένα απλό σύστημα ελέγχου on-off το οποίο αποτελείται από 3 υποσυστήματα. Ένα υποσύστημα για τον έλεγχο της θερμοκρασίας, ένα για τον έλεγχο του CO₂ και ένα για τον έλεγχο του φωτισμού. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας τους χειμερινούς μήνες, όταν η εσωτερική θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 20°C το σύστημα δίνει εντολή στο HVAC να λειτουργήσει στη μέγιστη ισχύ ενώ όταν ξεπεράσει τους 23°C δίνει εντολή να σταματήσει τη λειτουργία. Αντίστροφη είναι η λειτουργία τους καλοκαιρινούς μήνες. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία ξεπεράσει τους 28°C το σύστημα δίνει εντολή στο HVAC να λειτουργήσει στη μέγιστη ισχύ ενώ όταν η εσωτερική θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 25°C το σύστημα δίνει εντολή να σταματήσει τη λειτουργία του. Παρόμοια είναι η λειτουργία του υποσυστήματος ελέγχου του CO₂. Όταν η εσωτερική συγκέντρωση ξεπεράσει τα 900 ppm τότε δίνει εντολή στο σύστημα να δουλέψει στη μέγιστη ισχύ ενώ όταν η εσωτερική συγκέντρωση πέσει κάτω από 420 ppm δίνει εντολή να σταματήσει τη λειτουργία. Η λειτουργία του υποσυστήματος ελέγχου του φωτισμού είναι λίγο διαφορετικό αφού η λογική on-off στον φωτισμό δεν μπορεί να επιφέρει τα επιθυμητά επίπεδα φωτισμού των χρηστών. Το σύστημα λοιπόν όταν τα επίπεδα φωτισμού πέσουν κάτω από τα 600 Lux δίνει εντολή για θετική μεταβολή της ισχύος φωτισμού ενώ όταν τα επίπεδα φωτισμού ξεπεράσουν τα 800 Lux δίνει εντολή για αρνητική μεταβολή της ισχύος του

τεχνητού φωτισμού. Η μεταβολή της ισχύος είναι 8 W είτε για αρνητική είτε για θετική μεταβολή.

- **Με την μελέτη της πρόβλεψης της πληρότητας των κτηρίων.** Μελέτες έχουν δείξει ότι μια σημαντική ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται από τα HVAC στα κτίρια χρησιμοποιείται αναποτελεσματικά κατά τη διάρκεια χαμηλών ή μηδενικών ωρών πληρότητας [21, 22]. Αυτό συνεπάγεται ότι οποιοσδήποτε τεχνολογικές εξελίξεις που βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση των συστημάτων HVAC, περιορίζονται στην αποτελεσματικότητά τους λόγω λειτουργίας των συστημάτων αυτών σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει πληρότητα στο κτήριο. Προκύπτει λοιπόν πως ένας σημαντικός παράγοντας που μπορεί να προσφέρει περαιτέρω δυνατότητες στη μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας είναι η προσαρμογή της λειτουργίας αυτών των συστημάτων ανάλογα με το ποσοστό πληρότητας του κτηρίου [23]. Υπάρχει επίσης, μια αυξανόμενη τάση να αναγνωρίζονται οι άνθρωποι με βάση την ιδιότητά τους και τη σχέση που έχουν ενεργειακά με το κτήριο [24, 25]. Επιπλέον, η επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στις πληροφορίες των ανθρώπων είναι ζωτικής σημασίας για την αξιόπιστη προσομοίωση ενεργειακών προβλέψεων [26], ειδικά σε κτίρια που αντιμετωπίζουν υψηλή μεταβλητότητα στην πληρότητα και υπόκεινται σε μεγάλο αριθμό επισκεπτών [27].

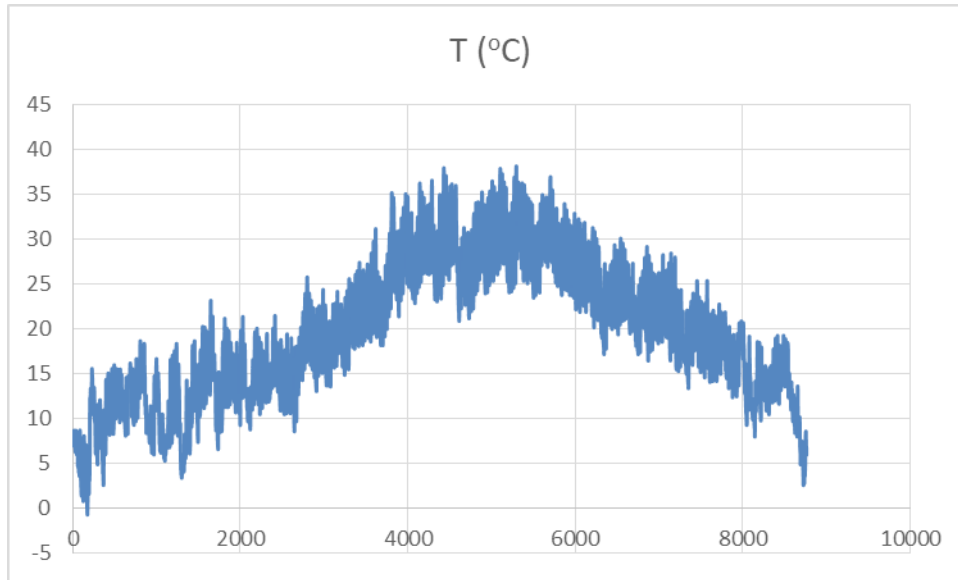
Οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί συνοψίζονται παρακάτω:

- Χρήση παθητικών αισθητήρων υπέρυθρης ακτινοβολίας (PIR). Αυτοί οι αισθητήρες έχουν μια συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης εντός της οποίας είναι σε θέση να ανιχνεύσουν την αλλαγή της κατάστασης πληρότητας [28].
- Χρήση συστημάτων ανάλυσης βίντεο και εικόνας όπου ανιχνεύεται η παρουσία ανθρώπων με αλγόριθμους ανίχνευσης αλλαγών στο παρασκήνιο, παρακολούθησης αντικειμένων και αναγνώρισης [29].
- Με χρήση αισθητήρων CO₂ δεδομένου ότι οι άνθρωποι είναι συνήθως η πιο σημαντική πηγή CO₂ μέσα σε ένα κτήριο [30].
- Με χρήση αισθητήρων αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (RFID). Το RFID είναι

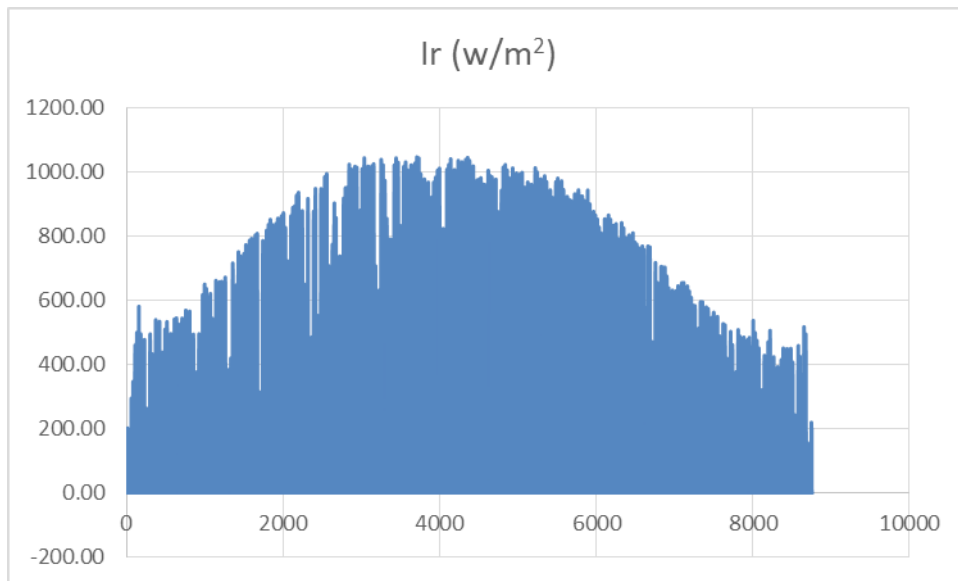
μια τεχνολογία ασύρματου αισθητήρα που αποτελείται συνήθως από έναν πομποδέκτη, μια κεραία και έναν μοναδικά αναγνωρισμένο πομποδέκτη, που συνήθως αναφέρεται ως ετικέτα RF [31].

- Με χρήση πανταχού υπάρχουσων τεχνολογιών, όπως δεδομένα κινητού τηλεφώνου, παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS), Bluetooth και ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) [32].
- **Με τη συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων.** Συλλέχτηκαν δεδομένα από το αστεροσκοπείο Αθηνών που περιέχουν μετρήσεις για 4 έτη (2015, 2016, 2017, 2018 και 2019) για την περιοχή της Αθήνας. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η διαχεόμενη και η ολική φωτεινή ισχύς και τέλος, η διαχεόμενη και η ολική φωτεινότητα. Το χρονικό βήμα των μετρήσεων είναι η μία ώρα. Τα δεδομένα αυτά αναλύθηκαν και παρατηρήθηκε σε πολλά χρονικά σημεία μεγάλα κενά μετρήσεων από μη καταγραφή των αισθητήρων. Αξιολογήθηκαν όλες οι χρονοσειρές. Η χρονοσειρά για το έτος 2019 είχε τα λιγότερα κενά μετρήσεων στα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Η συμπλήρωση των κενών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε ως εξής:
 - Σε περιπτώσεις έλλειψης μίας μόνο μέτρησης, το κενό συμπληρώθηκε με τον μέσο όρο από τις τιμές της προηγούμενης και της επόμενης μέτρησης.
 - Σε περιπτώσεις κενών διαστημάτων μεγαλύτερων της μίας ώρας (το ανώτερο που υπήρχε ήταν 5 ωρών), τα αντίστοιχα κενά συμπληρώθηκαν με τον μέσο όρο των τιμών της προηγούμενης και της επόμενης ημέρας, τις αντίστοιχες ώρες.

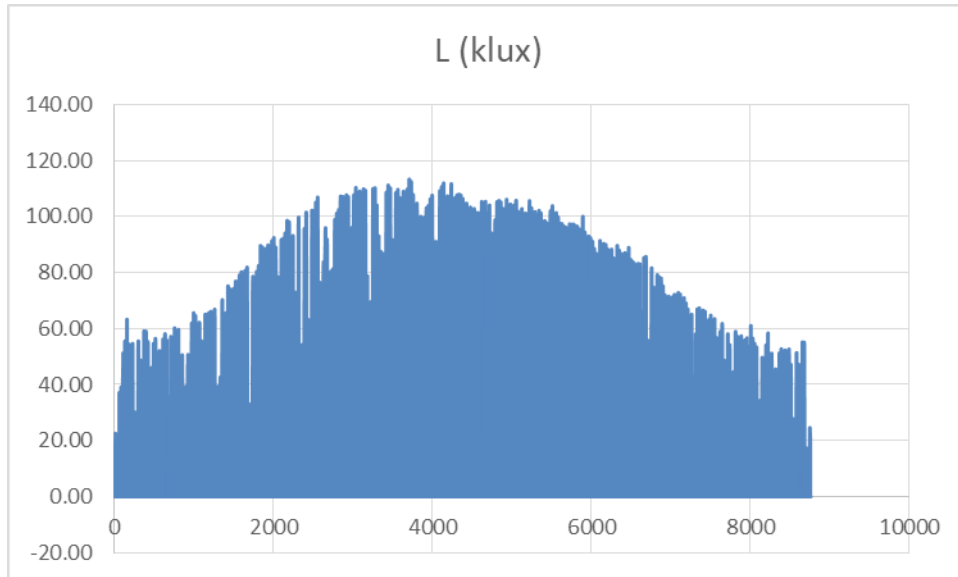
Τα επεξεργασμένα δεδομένα μετατράπηκαν σε κατάλληλη μορφή έτσι ώστε να «διαβάζονται» από το Matlab προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στην ενεργειακή προσομοίωση του κτηρίου. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στην προσομοίωση είναι η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος (εικ. 1), η διαχεόμενη φωτεινή ισχύς (εικ. 2) και η διαχεόμενη φωτεινότητα (εικ. 3). Η εξωτερική συγκέντρωση του CO₂ ελλείψει πραγματικών μετρήσεων στην προσομοίωση, θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 400 ppm.



Εικόνα 1: Εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος για το έτος 2019



Εικόνα 2: Διαχεόμενη φωτεινή ισχύς για το έτος 2019



Εικόνα 3: Διαχεόμενη φωτεινότητα για το έτος 2019

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το πολυπρακτορικό σύστημα καταφέρνει να προσαρμοστεί και να διαχειριστεί τα επιμέρους στοιχεία δράσης έτσι ώστε ο δείκτης άνεσης να παραμένει σε υψηλά επίπεδα με ταυτόχρονη εξοικονόμηση ενέργειας. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν και με το σύστημα ελέγχου on-off και αναδείχτηκε η ανωτερότητα του πολυπρακτορικού συστήματος και ως προς τα δύο ζητούμενα (δείκτης άνεσης, εξοικονόμηση ενέργειας).

➤ **Με την αναβάθμιση του θερμικού μοντέλου του κτηρίου.** Στο ήδη υπάρχον μοντέλο, ενσωματώθηκαν τέσσερα θερμικά κέρδη. Οι θεμελιώδεις απαιτήσεις για την εκτίμηση των θερμικών κερδών (εσωτερικά θερμικά κέρδη, θερμικά κέρδη λόγω της παρουσίας ανθρώπων, ηλιακά θερμικά κέρδη μέσω διάφανων δομικών στοιχείων) δίνονται στα ευρωπαϊκά πρότυπα (prEN 15203: 2005; EN ISO 13790: 2008; LST EN 15217: 2007). Σύμφωνα με αυτά τα πρότυπα, όλοι οι τύποι θερμικών κερδών πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συνολικών θερμικών κερδών ενός κτηρίου. Το πρώτο κέρδος έχει να κάνει με την θερμική ισχύ που απελευθερώνουν διάφορα ηλεκτρικά φορτία του κτιρίου [33]. Η συγκεκριμένη τιμή της ισχύος προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τα τετραγωνικά του κτηρίου (50 m²) με την ισχύ των 5.38 w. Το δεύτερο θερμικό κέρδος έχει να κάνει με την θερμική ισχύ που απελευθερώνει το σύστημα φωτισμού [34]. Η τιμή της θερμικής ισχύος προκύπτει από την ονομαστική ισχύ των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται κάθε στιγμή, πολλαπλασιαζόμενη με ένα συντελεστή της τάξεως του 0.5. Το τρίτο κέρδος έχει να κάνει με τη θερμική ισχύ που απελευθερώνουν οι άνθρωποι που βρίσκονται μέσα στον χώρο [35]. Η τιμή της θερμικής ισχύος προκύπτει από τον αριθμό των ατόμων πολλαπλασιαζόμενος με 115 w. Το τέταρτο θερμικό κέρδος έχει να κάνει με την φωτεινή ισχύ του ηλίου που περνάει μέσω του παραθύρου [36]. Για τον υπολογισμό της τιμής χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$\dot{Q}_w = A_w \cdot \tau_{gl} \cdot D \cdot I_w - h_w \cdot A_w \cdot (T_a - T_{amb}) \quad \text{Εξ. 1}$$

όπου \dot{Q}_w η θερμική ισχύς που περνάει μέσα από το παράθυρο, A_w το εμβαδόν του παραθύρου, τ_{gl} διαπερατότητα του γυαλιού, D σκίαση παραθύρου, I_w ηλιακή ισχύς που προσπίπτει στο παράθυρο h_w αγωγιμότητα γυαλιού, T_a εσωτερική θερμοκρασία αέρα, και T_{amb} θερμοκρασία εξωτερικού αέρα.

Επίσης, πραγματοποιήθηκε η ενσωμάτωση του αναβαθμισμένου θερμικού μοντέλου και των νέων επεξεργασμένων περιβαλλοντικών δεδομένων στην ενιαία προσομοίωση του πολυπρακτορικού συστήματος. Τέλος, μελετήθηκε ο τρόπος που

θα ενσωματωθεί η εκτίμηση της πληρότητας του κτιρίου από το ANFIS στο πολυπρακτορικό σύστημα έτσι ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.

- **Με την ανάπτυξη σε περιβάλλον προσομοίωσης πολυπρακτορικό σύστημα ελέγχου (MACS) που λαμβάνει υπόψη του την πληρότητα του κτηρίου.** Το εν λόγω σύστημα αποτελείται από μια ομάδα τριών πρακτόρων $A = \{AG_T, AG_L, AG_{CO_2}\}$, όπου το AG_T είναι ο πράκτορας θερμοκρασίας, το AG_L είναι ο πράκτορας φωτισμού και το AG_{CO_2} είναι ο πράκτορας CO_2 . Όλα τα σήματα κανονικοποιούνται στο εύρος $[0, 1]$ για σήματα με θετικές τιμές και στην περιοχή $[-1, 1]$ για σήματα με θετικές και αρνητικές τιμές. Οι καταστάσεις των πρακτόρων καθορίζονται από ένα συνολικό αριθμό 6 ασαφών μεταβλητών κατάστασης που ποικίλει X_i : δύο μεταβλητές για κάθε πράκτορα. Για κάθε είσοδο θετικών τιμών χρησιμοποιούνται πέντε συναρτήσεις συμμετοχής (MF). Για κάθε είσοδο θετικών και αρνητικών τιμών χρησιμοποιούνται επτά συναρτήσεις συμμετοχής. Οι πράκτορες AG_T και AG_L λαμβάνουν υπόψη το εκτιμώμενο επίπεδο πληρότητας και λειτουργούν μονάχα όταν υπάρχουν χρήστες στο εσωτερικό του χώρου. Για τις χρονικές περιόδους όπου υπάρχουν χρήστες μέσα στο χώρο το σήμα ελέγχου του πράκτορα είναι μηδενικό και δεν πραγματοποιείται μάθηση. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η άσκοπη κατανάλωση ενέργειας.

Για να ελέγξουμε την απόδοση του συστήματος MACS στον έλεγχο της άνεσης του κτηρίου έχουμε τα εξής: Ο χρόνος εξομοίωσης είναι ένα έτος με δειγματοληψία 0.001 ώρες. Τα δεδομένα που αφορούν στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, την οριζόντια διαχεόμενη φωτεινότητα και την ηλιακή ακτινοβολία μας χορηγήθηκαν από το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, και αφορούν στο έτος 2019 και τοποθεσία Αθήνα. Η εξωτερική συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα είναι η εκτιμώμενη που παράγει ο αλγόριθμος εκτίμησης παραμέτρων με τιμή 359.4813 ppm. Το επιθυμητό σήμα για την θερμοκρασία είναι 23 βαθμοί Κελσίου, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι μικρότερη των 21 βαθμών και 26 βαθμοί Κελσίου, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από 29 βαθμούς. Για το σύστημα φωτισμού, η

επιθυμητή τιμή καθορίζεται στα 700 lux και για το σύστημα εξαερισμού το επιθυμητό σήμα είναι 380 ppm. Η αριθμητική μελέτη του MACS αφορά σε τρεις περιπτώσεις: Χρησιμοποιώντας το εκτιμώμενο διάνυσμα πληρότητας, που προκύπτει από τις εκτιμώμενες παραμέτρους τις στοχαστικής διαφορικής εξίσωσης και χρησιμοποιώντας τα διανύσματα πληρότητας που προκύπτουν από τις ασαφείς εκτιμώμενες παραμέτρους. Τα ενεργειακά αποτελέσματα του συστήματος έχουν ως εξής:

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας των τριών συστημάτων: θέρμανσης / ψύξης, τεχνητού φωτισμού και εξαερισμού για περίοδο ενός έτους υπολογίζεται σε 1663 KWh σε σχέση με την πολύ μεγαλύτερη τιμή 3770 KWh που είναι η συνολική κατανάλωση αυτών των συστημάτων για το ίδιο έτος χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η πληρότητα του κτιρίου. Αυτό καταλήγει σε μια συνολική μείωση της τάξεως του 55.9%.

- **Με την μελέτη της ενισχυτικής μάθησης ως εργαλείο πρόβλεψης ενεργειακής ζήτησης σε νοσοκομειακούς χώρους.** Το κύριο καθήκον των μεθόδων μηχανικής μάθησης είναι να μαθαίνουν από δεδομένα και να κάνουν προβλέψεις. Η ενισχυτική μάθηση ως ένας τέτοιου είδους αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ζήτησης ενεργειακών φορτίων χρησιμοποιώντας χρονοσειρές δεδομένων της ζητούμενης ηλεκτρικής ισχύος. Η έξοδος του συστήματος θα είναι η προβλεπόμενη τιμή της ενεργειακής ζήτησης την επόμενη χρονική στιγμή. Οι εισοδοί του συστήματος καθορίζονται από το πλήθος των διαδοχικών μετρήσεων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Αυτό είναι ένα κύριο ζήτημα καθώς πολλές εισοδοί θα αυξήσουν τον χώρο των καταστάσεων ενεργειών και κατά συνέπεια την πολυπλοκότητα του συστήματος ενώ λίγες εισοδοί μπορούν να φανούν ανεπαρκείς για την εκμάθηση του αλγόριθμου. Η ανταμοιβή ενός τέτοιου συστήματος θα προέρχεται από την απόκλιση της προβλεπόμενης τιμής σε σχέση με την πραγματική τιμή. Για την εντιμετώπιση του συνεχούς χώρου καταστάσεων ενεργειών θα χρησιμοποιηθούν προσεγγιστές ασαφούς λογικής που έχουν

χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε άλλα προβλήματα για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος [37].

Αναφορές

- [1] Z. Wang and L. Wang, "Intelligent Control of Ventilation System for Energy-Efficient Buildings With CO₂ Predictive Model," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 686-693, June 2013, doi: 10.1109/TSG.2012.2229474
- [2] Z. Wang, R. Yang, L. Wang and A. Dounis, "Customer-centered control system for intelligent and green building with heuristic optimization," 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Phoenix, AZ, 2011, pp. 1-7
- [3] Dong, J.; Winstead, C.; Nutaro, J.; Kuruganti, T. Occupancy-Based HVAC Control with Short-Term Occupancy Prediction Algorithms for Energy-Efficient Buildings. *Energies* 2018, 11, 2427
- [4] M. Chiang and L. Fu, "Adaptive Control of Switched Systems with Application to HVAC System," 2007 IEEE International Conference on Control Applications, Singapore, 2007, pp. 367-372
- [5] E. Semsar-Kazerooni, M. J. Yazdanpanah and C. Lucas, "Nonlinear Control and Disturbance Decoupling of HVAC Systems Using Feedback Linearization and Backstepping With Load Estimation," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 5, pp. 918-929, Sept. 2008
- [6] B. Arguello-Serrano and M. Velez-Reyes, "Nonlinear control of a heating, ventilating, and air conditioning system with thermal load estimation," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 56-63, Jan. 1999
- [7] A.I. Dounis and D.E. Manolakakis, "Design of a fuzzy system for living space thermal-comfort regulation", *Applied Energy* 69, 2001, pp. 119-144
- [8] L. Morales Escobar, J. Aguilar, A. Garcés-Jiménez, J. A. Gutierrez De Mesa and J. M. Gomez-Pulido, "Advanced Fuzzy-Logic-Based Context-Driven Control for HVAC Management Systems in Buildings," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 16111-16126, 2020

- [9] Z. A. Shah, H. F. Sindi, A. Ul-Haq and M. A. Ali, "Fuzzy Logic-Based Direct Load Control Scheme for Air Conditioning Load to Reduce Energy Consumption," in IEEE Access, vol. 8, pp. 117413-117427, 2020
- [10] A.I. Dounis, D.E. Manolakakis and A. Argiriou, "A fuzzy rule based approach to achieve visual comfort conditions", Int. J. Systems Sci., 1995, Vol. 26, No. 7, pp. 1349-1361
- [11] C. Malavazos, A. Papanikolaou, K. Tsatsakis and E. Hatzoplaki, "Combined Visual Comfort and Energy Efficiency through True Personalization of Automated Lighting Control", In Proceedings of the 4th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS-2015), pages 264-270
- [12] Z. Wang and L. Wang, "Indoor air quality control for energy-efficient buildings using CO₂ predictive model," IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics, Beijing, 2012, pp. 133-138
- [13] M. Fayaz, D Kim, "Energy Consumption Optimization and User Comfort Management in Residential Buildings Using a Bat Algorithm and Fuzzy Logic", Energies 2018, 11, 161
- [14] F. Wahid, M. Fayaz, A. Aljarbough, M. Mir, M. Aamir, Imran, "Energy Consumption Optimization and User Comfort Maximization in Smart Buildings Using a Hybrid of the Firefly and Genetic Algorithms", Energies. 2020; 13(17):4363.
- [15] F. Wahid, L. H. Ismail, R. Ghazali and M. Aamir, "An Efficient Artificial Intelligence Hybrid Approach for Energy Management in Intelligent Buildings", KSII Transactions on Internet and Information Systems, vol. 13, no. 12, pp. 5904-5927, 2019
- [16] Z. Wang, R. Yang and L. Wang, "Multi-agent control system with intelligent optimization for smart and energy-efficient buildings", IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ, 2010, pp. 1144-1149
- [17] P. H. Shaikh, N. B. M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, "Stochastic optimized intelligent controller for smart energy efficient buildings", Sustainable Cities and Society, Volume 13, 2014, Pages 41-45

- [18] Z. Wang, L. Wang, A. I. Dounis and R. Yang, "Multi-agent control system with information fusion based comfort model for smart buildings", *Applied Energy*, Volume 99, 2012, pp. 247-254
- [19] C. Zhang, S. R. Kuppannagari, R. Kannan, V. K Prasanna, "Building HVAC Scheduling Using Reinforcement Learning via Neural Network Based Model Approximation", *BuildSys '19: Proceedings of the 6th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation*, Nov. 2019, pp. 287-296
- [20] G. Gao, J. Li, Y. Wen, "Energy-Efficient Thermal Comfort Control in Smart Buildings via Deep Reinforcement Learning", arXiv:1901.04693v1, Jan 2019
- [21] V.L. Erickson, Y. Lin, A. Kamthe, R. Brahme, A. Surana, A.E. Cerpa, M.D. Sohn, S. Narayanan, Energy efficient building environment control strategies using real-time occupancy measurements, in: *Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, ACM, Berkeley, California, 2009, pp. 19-24.
- [22] O.T. Masoso, L.J. Grobler, The dark side of occupants' behaviour on building energy use, *Energy and Buildings*, 42 (2) (2010) 173-177.
- [23] S. Goyal, H.A. Ingley, P. Barooah, Occupancy-based zone-climate control for energy-efficient buildings: Complexity vs. performance, *Applied Energy*, 106 (2013) 209-221.
- [24] A. Mahdavi, People in building performance simulation, in: J. Hensen, R. Lamberts (Eds.) *Building performance simulation for design and operation*, Spon Press, 2011.
- [25] E. Azar, C.C. Menassa, Agent-Based Modeling of Occupants and Their Impact on Energy Use in Commercial Buildings, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26 (4) (2012) 506-518.

- [26] J. Yang, M. Santamouris, S.E. Lee, C. Deb, Energy performance model development and occupancy number identification of institutional buildings, *Energy and Buildings*, 123 (2016) 192-204.
- [27] M.S. Gul, S. Patidar, Understanding the energy consumption and occupancy of a multi-purpose academic building, *Energy and Buildings*, 87 (2015) 155-165.
- [28] R.H. Dodier, G.P. Henze, D.K. Tiller, X. Guo, Building occupancy detection through sensor belief networks, *Energy and Buildings*, 38 (9) (2006) 1033-1043.
- [29] Y. Benezeth, H. Laurent, B. Emile, C. Rosenberger, Towards a sensor for detecting human presence and characterizing activity, *Energy and Buildings*, 43 (2-3) (2011) 305-314.
- [30] S. Wang, J. Burnett, H. Chong, Experimental validation of CO₂-based occupancy detection for demand-controlled ventilation, *Indoor Built Environment*, (8) (1999) 377-391.
- [31] K. Domdouzis, B. Kumar, C. Anumba, Radio-Frequency Identification (RFID) applications: A brief introduction, *Advanced Engineering Informatics*, 21 (4) (2007) 350-355
- [32] Y. Gu, A. Lo, N. Ignas, A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks, *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 11 (1) (2009) 13-32.
- [33] Kianifar, A.; Rezazadeh, M. 2006. An improved design method for estimating the annual auxiliary energy requirement for solar heating building, in 9th Arab International Conference on Solar Energy (AICSE-9), April 30, 2007, Bahrain, Nov 05-07, 2006, 209(1-3): 182-189.
- [34] Suszanowicz, Dariusz. (2017). Internal heat gain from different light sources in the building lighting systems. *E3S Web of Conferences*. 19. 01024, 2017.
- [35] KaiserAhmed, Jarek Kurnitski, Bjarne Olesen. Data for occupancy internal heat gain calculation in main building categories, Vol. 15, 2017, pp. 1030-1034

[36] Šeduikytė, L.; Paukštys, V. 2008. Evaluation of indoor environment conditions in offices located in buildings with large glazed areas, Journal of Civil Engineering and Management 14(1): 39–44.

[37] Kofinas P., Dounis A.I., Vouros G.A., Fuzzy q-learning for multi-agent decentralized energy management in microgrids, Appl Energy, 219 (53–67) (2018), p. 6

Αναστάσιος Ντούνης

Ο Επιβλέπων Καθηγητής

Παναγιώτης Κοφινάς

PANAGIOTIS KOFINAS
10.04.2023 14:25

Ο Μεταδιδακτορικός Ερευνητής