

ΚΤΗΡΙΑ ΙΣΟΣΚΕΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΑΠΕ, ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΞΕ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΩΝ

Α. Κυρίτσης*, Ε. Μαθάς, Ε. Τσελεπής

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας,

Διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Τμήμα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής

Τηλ. +30.210.6603371, fax +30.210.6603318

kyritsis@cres.gr, emathas@cres.gr, stselep@cres.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η δυνατότητα προσαρμογής του ενεργειακού προφίλ συμβατικών κτηρίων του εργασιακού τομέα σε κτήρια ισοσκελισμένου ενεργειακού ισοζυγίου. Το μοντέλο του ισοσκελισμένου ενεργειακού ισοζυγίου στοχεύει όχι μόνο στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια ενός έτους αξιοποιώντας τεχνολογίες ΑΠΕ, αλλά ταυτόχρονα επιδιώκει τη βέλτιστη εξισορρόπηση μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης σε μικρότερα διαστήματα χρόνου (μήνα, ημέρα ή ακόμα και πραγματικού χρόνου), αξιοποιώντας ενεργητικές τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και μοντέλα πρόβλεψης τόσο της ηλεκτροπαραγωγής όσο και των ηλεκτρικών καταναλώσεων. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται προέκυψαν από τη συμμετοχή του τμήματος Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του ΚΑΠΕ στο Ευρωπαϊκό πρόγραμμα Smart Build "Implementing Smart Information and Communication Technology concepts for energy efficiency in public buildings".

Λέξεις κλειδιά: κτήρια ισοσκελισμένου ενεργειακού ισοζυγίου, ενεργητικές τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας, μοντέλα πρόβλεψης κατανάλωσης, ΑΠΕ, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κάθε κτήριο τόσο στην κατασκευή του όσο στον κύκλο της λειτουργικής του ζωής αλλά και στην κατεδάφιση του είναι συνυφασμένο με την κατανάλωση ενέργειας. Εάν σε αυτά τα ποσά προστεθεί και η ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή και μεταφορά των δομικών υλικών, έχουμε μια πλήρη εικόνα των ενεργειακών απαιτήσεων ενός κτηρίου. Σύμφωνα με εργασίες που καταγράφουν την ενέργεια που δαπανάται στην περίοδο χρήσης ενός κτηρίου (άμεση κατανάλωση), τη φάση κατασκευής αλλά και της κατεδάφισης (έμμεση κατανάλωση), αποδεικνύεται πως η έμμεση καταναλισκόμενη ενέργεια είναι εξαιρετικά μικρή συγκριτικά με την ενέργεια που δαπανάται στο λειτουργικό κύκλο των κτηρίων [1]. Σύμφωνα με τα στατιστικά δεδομένα της Eurostat για το 2012, η ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας του κτηριακού τομέα στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ-28) ήταν 437,9 Mtoe, ποσό σχεδόν ίσο με το 40% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας (1104,5 Mtoe), εκ των οποίων το 66% καταναλώθηκε στον οικιακό τομέα (289,2 Mtoe) ενώ η συμμετοχή του υπόλοιπου κτηριακού τομέα ανήλθε στα 148,7 Mtoe. Αντίστοιχα, σε εθνικό επίπεδο η ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας ήταν 17,13 Mtoe από τα οποία τα 5,04 Mtoe καταναλώθηκαν σε οικιακές εφαρμογές και 2,23 Mtoe στον υπόλοιπο κτηριακό τομέα [2].

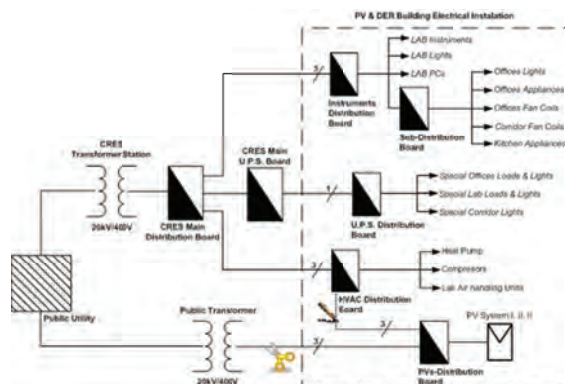
Η ενεργειακή κατανάλωση ενός κτηρίου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες με κυριότερους από αυτούς το είδος χρήσης του κτηρίου (π.χ. οικιακό ή μη-οικιακό), το ωρολόγιο πρόγραμμα χρήσης (ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται ΑΠΕ), τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής στην οποία οικοδομήθηκε, τον συντελεστή θερμοπερατότητας των οικοδομικών υλικών, την αρχιτεκτονική που εφαρμόστηκε (βιοκλιματική/παθητική ή κλασική), το έτος κατασκευής του, το είδος και την απόδοση του συστήματος θέρμανσης/ψύξης και τη συμπεριφορά των χρηστών των κτηρίου (επιλογή της εσωτερικής θερμοκρασίας, εφαρμογή των αρχών εξοικονόμησης ενέργειας, κ.λ.π) [3-7]. Επιπροσθέτως, σε αντίθεση με τα οικιακά κτήρια, ο υπόλοιπος κτηριακός τομέας παρουσιάζει ιδιαίτερα ετερογενή χαρακτηριστικά ενεργειακής κατανάλωσης με κύριο διαφοροποιό κριτήριο τον τρόπο χρήσης [8]. Παραδείγματος χάριν οι επιθυμητές συνθήκες αερισμού, θέρμανσης και φωτισμού σε μια αποθήκη εμπορευμάτων είναι εντελώς διαφορετικές με αυτές ενός γραφείου, ενός νοσοκομείου, ή ενός αθλητικού κέντρου. Συνεπώς, ενώ στον οικιακό τομέα οι τεχνικές βελτιστοποίησης της ενεργειακής αποδοτικότητας ακολουθούν λίγο πολύ συγκεκριμένη στρατηγική, στον υπόλοιπο κτηριακό τομέα απαιτείται ενδελεχής ανάλυση των ενεργειακών και των χρηστικών αναγκών του κτηρίου.

Αρκετές επιστημονικές ομάδες μελέτησαν τις ενεργοβόρες πτυχές της λειτουργικής συμπεριφοράς των κτηρίων και πρότειναν εφαρμοσμένες λύσεις για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής τους αποδοτικότητας, αξιοποιώντας τεχνικές όπως ο παθητικός ηλιακός σχεδιασμός, ο φυσικός δροσισμός και αερισμός του κτηρίου, η θέρμανση του κτηρίου μέσω γεωθερμίας ή/και ηλιακής θερμότητας [1, 3, 6,]. Οι προαναφερθείσες λύσεις σε συνδυασμό με τη χρησιμοποίηση οικοδομικών υλικών με χαμηλό δείκτη θερμοπερατότητας και τεχνολογίες ΑΠΕ, οδήγησαν αρχικά στα κτήρια χαμηλής κατανάλωσης και στη συνέχεια στα κτήρια Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (ΜΕΚ). Ένα κτήριο ΜΕΚ παράγει την ενέργεια που καταναλώνει κατά τη διάρκεια ενός έτους αξιοποιώντας ΑΠΕ. Ταυτόχρονα όμως εξακολουθεί να είναι συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο. Δηλαδή το κτήριο παρέχει ή απορροφά ενέργεια στο/από το δίκτυο προσπαθώντας να εξυπηρετήσει το εκάστοτε ενεργειακό ισοζύγιο όπως αυτό ορίζεται από την εξίσωση της ηλεκτροπαραγωγής και των καταναλώσεων [7, 9-11]. Στη περίπτωση που ο υπολογισμός της ενεργειακής αυτονομίας γίνεται σε ετήσια βάση ή το κτήριο δεν διαθέτει μέσα ενεργειακής αποθήκευσης, καθίσταται εύλογο πως η ενεργειακή αυτάρκεια προκύπτει σε λογιστική βάση και όχι σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, παρότι το κτήριο περιορίζει την ενεργειακή του εξάρτηση από το ηλεκτρικό δίκτυο αλλά και τη λειτουργική επιβάρυνση του δικτύου (μέσω του περιορισμού της μεταφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας άρα και των ηλεκτρικών απωλειών), από την άλλη πλευρά δύναται να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα της τάσης και της ηλεκτρικής ισχύος στις γραμμές Χ.Τ. δημιουργώντας επαναλαμβανόμενες αλληλουχίες αιχμών φορτίου και επιστροφών ενέργειας από το κτήριο προς το ηλεκτρικό δίκτυο .

Το ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας εστιάζεται στις πρακτικές βελτιστοποίησης της ενεργειακής συμπεριφοράς του μη οικιακού κτηριακού τομέα και συγκεκριμένα στα κτήρια που χρησιμοποιούνται ως γραφεία, τομέας που καλύπτει το 23% της συνολικής επιφάνειας των μη οικιακών κτισμάτων στην ΕΕ-28 και παρουσιάζει πολλά κοινά στοιχεία με τα εκπαιδευτικά συγκροτήματα [8]. Αρχικά παρουσιάζεται η μεθοδολογία με την οποία μετρήθηκε και αξιολογήθηκε η ενεργειακή συμπεριφορά της κτηριακής εγκατάστασης του τμήματος Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής, τα κριτήρια επιλογής των τεχνικών βελτιστοποίησης της ενεργειακής αποδοτικότητας του κτηρίου (επιδίωξη κτηρίου χαμηλής κατανάλωσης) και τα πρώτα αποτελέσματα αυτών σε δείκτες που επιτρέπουν την απευθείας σύγκριση των ενεργειακών ευρημάτων με αυτά άλλων κτηρίων παραπλήσιας λειτουργικής φιλοσοφίας. Οι συνηθέστεροι διεθνώς δείκτες είναι της πυκνότητας της καταναλισκόμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας και όγκου (kWh/m^2 , kWh/m^3) ή ανά χρήστη του κτηρίου (kWh/emp). Επίσης, για την ορθή σύγκριση των μετρούμενων μεγεθών με τα αντίστοιχα μεταγενέστερων χρονικών περιόδων χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο των βαθμομερών θέρμανσης/ψύξης. Τέλος, προτείνονται λύσεις για τη μερική εφαρμογή του μοντέλου του κτηρίου ισοσκελισμένου ενεργειακού ισοζυγίου (IEI), προκειμένου να περιοριστούν οι αιχμές στις ενεργειακές συναλλαγές του κτηρίου με το δίκτυο Χ.Τ. Συγκεκριμένα, από την ενεργειακή ανάλυση του κτηρίου επιλέγονται τα φορτία με έντονο διακοπτικό χαρακτήρα (συχνές εκκινήσεις/παύσεις λειτουργίας) και εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης των Φ/Β συστημάτων για την εξομάλυνση των αιχμών ισχύος.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το κτήριο στο οποίο στεγάζεται το τμήμα Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του ΚΑΠΕ καταλαμβάνει συνολική επιφάνεια 300m^2 και ο όγκος του ανέρχεται στα 1290m^3 . Η διαρρύθμιση του κτηρίου επιτρέπει το σχηματισμό πέντε πλήρως ηλεκτρονικά εξοπλισμένων γραφείων στα οποία μπορούν να εργαστούν οκτώ (8) άτομα. Επίσης, το κτήριο διαθέτει τρεις αίθουσες εργαστηρίων οι οποίες είναι εξοπλισμένες με κατάλληλο ερευνητικό εξοπλισμό για τη διεξαγωγή μετρήσεων σε Φ/Β πλαίσια, σε συσσωρευτές και ηλεκτρονικούς μετατροπείς. Μολονότι η εγκατεστημένη ισχύς του κτηρίου ανέρχεται στα 130kW , η πραγματικά καταναλισκόμενη ισχύς δύσκολα ξεπερνά τα 30kW εξαιτίας του υψηλού συντελεστή ετεροχρονισμού μεταξύ των διαφόρων ηλεκτρικών καταναλώσεων του κτηρίου. Παρατηρώντας την εικόνα 1, στην οποία παρουσιάζεται το μονογραμμικό ηλεκτρικό σχέδιο του κτηρίου, τεκμαίρεται πως η παροχέτευση της ηλεκτρικής ισχύος στο κτήριο πραγματοποιείται μέσω τριών ξεχωριστών γραμμών Χ.Τ.



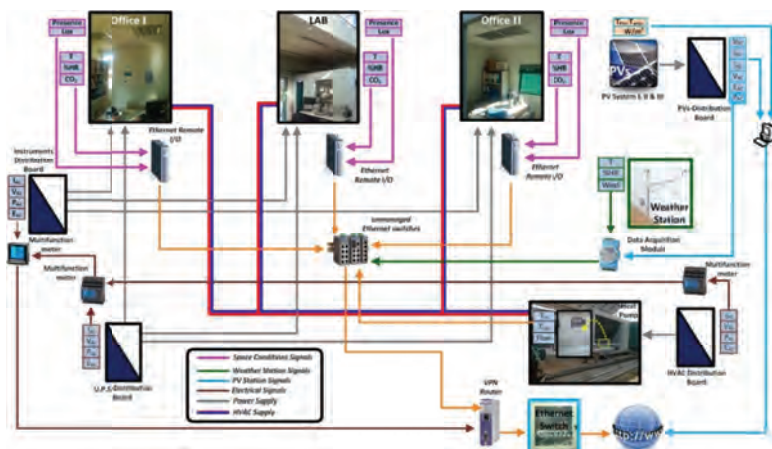
Εικόνα 1: Μονογραμμική απεικόνιση του συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας του κτηρίου Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η πρώτη τριφασική γραμμή μέσω του πίνακα διανομής “Instruments D.B” εξυπηρετεί τα ηλεκτρικά φορτία των εργαστηρίων, μέρος των ηλεκτρικών αναγκών των γραφείων (κυρίως φωτισμός και μερικά ηλεκτρικά φορτία) και τις υπόλοιπες παροχές του κτηρίου (εξοπλισμός

κουζίνας, γενικός φωτισμός, κ.λπ.). Ο δεύτερος μονοφασικός πίνακα διανομής "U.P.S. D.B" τροφοδοτεί επιλεγμένα ηλεκτρικά φορτία σε ολόκληρο το κτήριο (κυρίως υπολογιστές και φωτισμό ασφαλείας), ενώ ο τρίτος πίνακα διανομής "HVAC D.B" εξυπηρετεί αποκλειστικά το ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης/ψύξης (HVAC) του κτηρίου ονομαστικής ισχύος 15.5kW (54kW θερμική και 46.7kW ψυκτική ισχύς). Το HVAC σύστημα εμπεριέχει δύο συμπιεστές, εκ των οποίων ο δεύτερος ενεργοποιείται όταν οι ανάγκες του κτηρίου ξεπερνούν το ήμισυ της συνολικής θερμική ή ψυκτικής του ικανότητας.

Επίσης, στο κτήριο είναι εγκατεστημένο ένα Φ/Β σύστημα συνολικής ισχύος 21,8kWp το οποίο απαρτίζεται από τρία υποσυστήματα των i) 10,35kWp (κλίσης 30° και προσανατολισμού 22,5°NΔ), ii) 6,72kWp (κλίσης 45° και προσανατολισμού 0°N) και iii) 4,73kWp (κλίσης 90° και προσανατολισμού 22,5°NΔ). Η επιλογή των κλίσεων και των προσανατολισμών των υποσυστημάτων δεν έγινε με κριτήριο την ετήσια μεγιστοποίηση της παραγωγής, αλλά αντιθέτως με γνώμονα το σκιασμό του κτηρίου και τη διατήρηση όσο το δυνατόν ισορροπημένης παραγωγής σε μεγαλύτερο διάστημα του έτους. Η ετήσια ενεργειακή συνεισφορά του Φ/Β συστήματος ανέρχεται στις 27MWh και ο σχετικός δείκτης παραγωγής κυμαίνεται στις 1240kW_{el}/kWp. Η παραγόμενη ενέργεια δεν ιδιοκαταναλώνεται αλλά παρέχεται εξ ολοκλήρου στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ξεχωριστού Μ/Σ 20kV/400V όπως χαρακτηριστικά φαίνεται το σχήμα 1 (καθεστώς Feed in Tariff).

Λαμβάνοντας υπόψη πως το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Smart Build στοχεύει στη χρήση ICT συστημάτων για την επίτευξη ενεργειακής εξοικονόμησης σε κτήρια, δεν αναζητήθηκαν παθητικές μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας και αναβάθμισης του κτηριακού κελύφους. Αντιθέτως, χρησιμοποιήθηκαν συστήματα συλλογής καταγραφής, ανάλυσης και μετάδοσης, πληροφοριών για την λεπτομερή μελέτη των χρονοσειρών τόσο των ηλεκτρικών καταναλώσεων όσο και της ηλεκτροπαραγωγής του Φ/Β συστήματος, των εσωτερικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία, φωτεινότητα, επίπεδα συγκέντρωσης CO₂, παρουσία) και των εξωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών του κτηρίου (θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα διεύθυνση ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία και βροχόπτωση). Η συλλογή των δεδομένων διήρκησε όλο το 2013 (έτος βάσης), ενώ τα ευρήματα που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν για να επιλεγούν οι τεχνικές βελτιστοποίησης της ενεργειακής αποδοτικότητας του κτηρίου, για τη μαθηματική μοντελοποίηση της ηλεκτρικής ζήτησης και της ενεργειακής παραγωγής των Φ/Β και των προγραμματισμό των ευφυών ελεγκτών εξοικονόμησης ενέργειας.



Εικόνα 2: Αποτύπωση των μετρητών ηλεκτρικής ισχύος/ενέργειας και των αισθητήρων παρακολούθησης των εσωτερικών και εξωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών του κτηρίου.

Για να διερευνηθεί η δυνατότητα ολικής ή μερικής ενεργειακής ισορροπίας μεταξύ των ηλεκτρικών φορτίων και της ενεργειακής παραγωγής του Φ/Β συστήματος, αλλά και να

εξεταστεί τόσο η επαναληψιμότητα ή ο στοχαστικός χαρακτήρας ορισμένων κρίσιμων ενεργειακών ανισοροπιών όσο και η δυνατότητα περιορισμού των αιχμών στις ενεργειακές ανταλλαγές του κτηρίου, χρησιμοποιήθηκε πλήθος αναλυτών ισχύος και ενέργειας στα σημεία ηλεκτρικής τροφοδότησης του κτηρίου όσο και σε ορισμένα φορτία που παρουσιάζουν ιδιαίτερα διακοπτικά χαρακτηριστικά. Παρότι η δομή του ηλεκτρικού συστήματος δεν επιτρέπει την ιδιοκατανάλωση των παραγόμενων ποσών ενέργειας, στην ανάλυση των αποτελεσμάτων εξετάστηκε το ενδεχόμενο υπαγωγής του Φ/Β συστήματος σε καθεστώς Net Metering (η αλλαγή επισημαίνεται στο σχήμα 1 με τις διακεκομμένες γραμμές) προκειμένου να αξιολογηθεί η δυνατότητα προσαρμογής του κτηρίου στο μοντέλο των κτηρίων IEI. Στην εικόνα 2 αποτυπώνονται οι μετρητές ισχύος/ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν, οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των εσωτερικών και εξωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών του κτηρίου σε χώρους που επιλέχθηκαν ως θέσεις αναφοράς, καθώς και το σύστημα παρακολούθησης των βασικών λειτουργικών χαρακτηριστικών του HVAC συστήματος. Η πρόσβαση στις μετρούμενες τιμές γίνεται αξιοποιώντας τις υπηρεσίες του διαδικτύου ενώ η αποθήκευση και επεξεργασία αυτών γίνεται μέσω ψηφιακής πλατφόρμας ασύγχρονης μετάδοσης της εταιρείας FAR Systems [12].

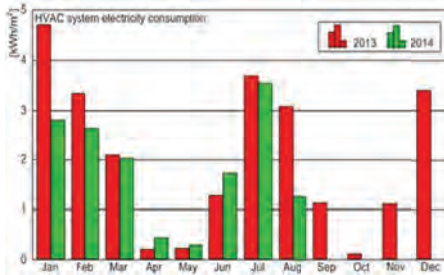
3. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται ορισμένα από τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν ύστερα από την ενδελεχή ανάλυση των χρονοσειρών των ηλεκτρικών καταναλώσεων και της ηλεκτροπαραγωγής του Φ/Β συστήματος για το έτος αναφοράς, καθώς και τα αποτελέσματα από τους πρώτους οκτώ μήνες του 2014 στους οποίους εφαρμόστηκαν οι τεχνικές βελτιστοποίησης της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτηρίου. Η ανάλυση των ενεργειακών αποτελεσμάτων έγινε με τη συνεργασία ειδικού τμήματος της EURAC που ειδικεύεται στα κτήρια MEK, τις τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας αλλά και τη μοντελοποίηση των κτηριακών φορτίων [13].

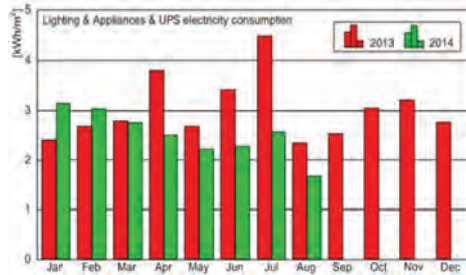
Η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση για το έτος 2013 ήταν 18,18MWh, εκ των οποίων σχεδόν το 40% δαπανήθηκε για την εξυπηρέτηση του συστήματος θέρμανσης/ψύξης (HVAC), το 9% στα φορτία που εξυπηρετούνται από το σύστημα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (U.P.S.), και το υπόλοιπο 51% στα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του κτηρίου και στο φωτισμό (Appliances). Σύμφωνα με τις εργασίες [1, 14, 15] σχεδόν το 50% της ενέργειας στα γραφεία δαπανάται σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό υψηλής ενεργειακής απόδοσης (υπολογιστές, οθόνες, εκτυπωτές) ενώ το υπόλοιπο 50% καλύπτει κυρίως ανάγκες φωτισμού (δεν υπολογίζεται η κατανάλωση των HVAC συστημάτων). Υποθέτοντας λοιπόν πως το σύστημα U.P.S. εξυπηρετεί σχεδόν αποκλειστικά υπολογιστικά συστήματα, τεκμαίρεται πως ισόποσο σχεδόν ποσό ενέργειας δαπανάται για το σύνολο του φωτισμού του κτηρίου. Συμπερασματικά λοιπόν η ενέργεια που καταναλώνεται στις εργαστηριακές/πειραματικές εφαρμογές αντιστοιχεί στο 42% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας. Τέλος, βάση των δεικτών πυκνότητας ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, η ηλεκτρική κατανάλωση για την ψύξη και θέρμανση του κτηρίου ήταν 24kWh/m²/year για το 2013, ενώ οι υπόλοιπες ηλεκτρικές ανάγκες του κτηρίου ανήλθαν στις 36,6kWh/m²/year. Η ενέργεια που παράχθηκε από το Φ/Β σύστημα ανήλθε στις 78,7kWh/m²/year, ενώ σε μηνιαίο επίπεδο ήταν πάντα υψηλότερη της ηλεκτρικής κατανάλωσης με εξαίρεση τους χειμερινούς μήνες. Συνεπώς, ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός του κτηρίου πληροί τις προϋποθέσεις των κτηρίων MEK τόσο σε ετήσια βάση όσο και σε μηνιαία βάση με εξαίρεση τη χειμερινή περίοδο, όπου οι ενεργειακές συναλλαγές με το ηλεκτρικό δίκτυο δεν ξεπέρασαν στη χειριστή περίπτωση τις 2.3kWh/m² (Ιανουάριος 2013).

Στις εικόνες 3 και 4 αποτυπώνεται η μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση του κτηρίου για το έτος αναφοράς αλλά και τους πρώτους οκτώ μήνες του 2014. Συγκεκριμένα η κατανάλωση διαχωρίζεται σε δύο συνιστώσες βάσει των οποίων επιδιώχθηκε και η βελτιστοποίησης της ενεργειακής αποδοτικότητας. Η πρώτη αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική κατανάλωση του

συστήματος θέρμανσης/ψύξης –εικόνα 3-, ενώ η δεύτερη εμπεριέχει την ενέργεια που δαπανάται σε φωτισμό (Lighting), στο σύστημα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (UPS) και στα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του κτηρίου (Appliances) –εικόνα 4-.



Εικόνα 3: Ηλ. κατανάλωση του συστήματος HVAC για το έτος αναφοράς και τους πρώτους οκτώ μήνες του 2014.



Εικόνα 4: Ηλ. κατανάλωση σε φωτισμό, UPS και στα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία για το έτος αναφοράς και τους πρώτους 8 μήνες του 2014.

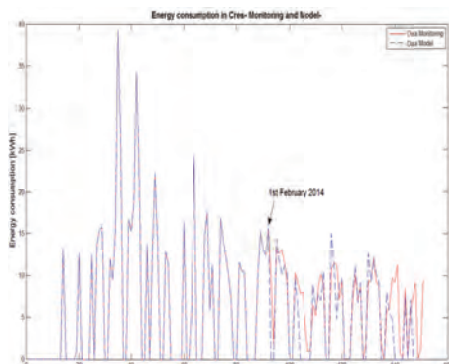
Από τη μελέτη των γραφημάτων 3 και 4 τεκμαίρεται πως η ηλεκτρική κατανάλωση του συστήματος θέρμανσης/ψύξης παρουσιάζει έντονα εποχικά χαρακτηριστικά (δραστικός περιορισμός της κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου) ως απόρροια των κλιματικών χαρακτηριστικών της χώρας μας. Για τη βελτιστοποίηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης του συστήματος HVAC αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν ηλεκτροβάνες σε συνδυασμό με τριόδους βαλβίδες στα θερμαντικά/ψυκτικά σώματα, ενώ η συνάρτηση ενεργοποίησής τους στους ευφείς ελεγκτές λαμβάνει υπόψη την παρουσία/απουσία του εργαζομένου, τη θερμοκρασία του χώρου και τη θερμοκρασία αναφοράς. Ως θερμοκρασία αναφοράς θεωρήθηκαν οι 20°C στη χειμερινή και οι 23°C στην καλοκαιρινή περίοδο. Στον πίνακα 1 παρατίθεται η ηλεκτρική κατανάλωση του συστήματος HVAC, με γνώμονα τις βαθμοημέρες (HDD) θέρμανσης/ψύξης. Ο υπολογισμός των βαθμοημερών έγινε χρησιμοποιώντας τα μετεωρολογικά δεδομένα του ιστότοπου Degree Days.net [16]. Από κάθε μήνα έχουν αφαιρεθεί τα σαββατοκύριακα. Η εφαρμογή των τεχνικών βελτιστοποίησης της ενεργητικής αποδοτικότητας του συστήματος HVAC οδήγησε σε εξοικονόμηση ενέργειας σε ποσοστό 10,32% για το πρώτο οκτάμηνο του 2014.

2013	Ηλ. κατανάλωση HVAC [kWh/HDD]	HDD	2014	Ηλ. κατανάλωση HVAC [kWh/HDD]	HDD
Ιανουάριος	5,53	255,7	Ιανουάριος	3,85	218,6
Φεβρουάριο	5,01	200,1	Φεβρουάριος	4,04	195,2
Μάρτιος	3,80	165,2	Μάρτιος	3,44	177,1
Απρίλιος	0,56	120,2	Απρίλιος	1,01	130,8
Μάιος	2,04	34,8	Μάιος	1,68	53,7
Ιούνιος	7,23	53,4	Ιούνιος	8,99	57,7
Ιούλιος	11,65	95,4	Ιούλιος	11,53	92,4
Αύγουστος	8,35	110,4	Αύγουστος	5,03	95
Μέση Τιμή	5,52		Μέση Τιμή	4,95	

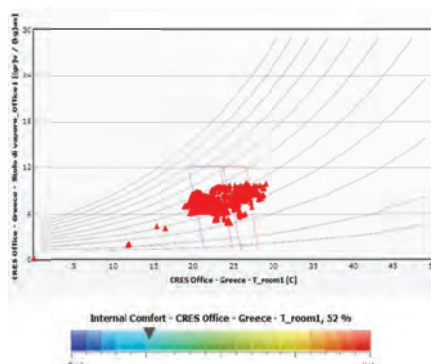
Επίσης, για τη μείωση των ψυκτικών αναγκών των εργαστηρίων κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου, αποφασίστηκε να μεγιστοποιηθούν τα διαστήματα φυσικού δροσισμού τους, αξιοποιώντας τη βιοκλιματική αρχιτεκτονική του κτηρίου. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών συγκρίνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος με αυτή της θερμής αέριας μάζας που εγκλωβίζεται στο ύψος της οροφής του κτηρίου κατά τη διάρκεια της ημέρας και εφόσον οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου και του ανιχνευτή

βροχής το επιτρέπουν ανοίγουν τα παράθυρα οροφής των αιθουσών για να επιτευχθεί φυσικός δροσισμός. Η σύγκριση της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας του κτηρίου γίνεται μέσω λογικής υστέρησης προκειμένου να αποφευχθούν άσκοπες ενεργοποιήσεις/απενεργοποιήσεις των παραθύρων. Στις συναρτήσεις ελέγχου της συγκεκριμένης εφαρμογής έχουν προβλεφθεί μετρήσεις ανίχνευσης πυρκαγιάς για να αποφευχθεί το άνοιγμα των παραθύρων σε μια τέτοια περίπτωση.

Η βελτιστοποίηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των φωτιστικών σωμάτων οδήγησε στη θέσπιση κατώτατου ανεκτού ορίου φωτεινότητας των 300LUX (τιμή η οποία επιφέρει την υποχρεωτική τους ενεργοποίηση σε περίπτωση παρουσίας εργαζομένου), ενώ η απενεργοποίησή τους επιβάλλεται σε περίπτωση απουσίας εργαζομένων ή όταν η διαφορά μεταξύ της εκάστοτε τιμής της φωτεινότητας με το επίπεδο φωτεινότητας του τεχνητού φωτισμού (μετρημένο σε συνθήκες ολικής έλλειψης φυσικού φωτισμού) οδηγεί σε αποτέλεσμα μεγαλύτερο των 400LUX. Αντίστοιχα, για τον περιορισμό της ηλεκτρικής κατανάλωσης των υπολογιστικών συστημάτων ενεργοποιήθηκαν οι λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας στις θόδες και τους εκτυπωτές, ενώ επίσης μειώθηκε και ο χρόνος λειτουργίας των υπολογιστών σε πλήρη ισχύ σε διαστήματα που δεν χρησιμοποιούνται άμεσα. Η εφαρμογή των τεχνικών βελτιστοποίησης της ενεργητικής αποδοτικότητας του συστήματος φωτισμού και των υπολογιστικών συστημάτων οδήγησε σε εξοικονόμηση ενέργειας σε ποσοστό 16,9% για το πρώτο οκτάμηνο του 2014 (θεωρώντας παραπλήσιο εργαστηριακό φόρτο στους αντίστοιχους μήνες). Περαιτέρω αύξηση του ποσοστού εξοικονόμησης ενέργειας δύναται να επιτευχθεί με την αντικατάσταση των λαμπτήρων φθορίου των γραφείων με φωτιστικά σώματα LED. Από τα μέτρα εξοικονόμησης εξαιρέθηκαν τα ποσά ενέργειας που καταναλώνονται στις πειραματικές εφαρμογές.



Εικόνα 5: Κατανάλωση HVAC συστήματος και μοντελοποίηση αυτής με ARX γραμμικά μοντέλα



Εικόνα 6: Συνθήκες στα γραφεία σύμφωνα με τα επίπεδα άνεσης/ποιότητας της ASHRAE

Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης του συστήματος θέρμανσης/ψύξης χρησιμοποιώντας ARX (Auto-Regressive with exogenous input) γραμμικά μοντέλα. Στη συνάρτηση πρόβλεψης χρησιμοποιήθηκαν ως ανεξάρτητες μεταβλητές οι τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς επίσης και το σήμα της παρουσίας, ενώ τα δεδομένα του έτους βάσης χρησιμοποιήθηκαν για επαλήθευση της ορθότητας του μοντέλου. Παρόμοια μοντέλα αναπτύχθηκαν και για τις υπόλοιπες ηλεκτρικές καταναλώσεις του κτηρίου όπως επίσης και της ηλεκτροπαραγωγής, προσαρμόζοντας σε κάθε περίπτωση τον αριθμό και το είδος των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Η υλοποίηση των συναρτήσεων βελτιστοποίησης της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτηρίου έγινε χρησιμοποιώντας αυτόνομους εξυπηρετητές δικτύων της εταιρείας Schneider Electric και συγκεκριμένα τη σειρά SmartStruxure πάνω σε δικτυακή υποδομή Ethernet TCP/IP. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι οι τεχνικές που εφαρμόστηκαν δεν επέφεραν μόνο τον περιορισμό της ηλεκτρικής κατανάλωσης του κτηρίου αλλά συνέβαλαν ταυτόχρονα στην επίτευξη ικανοποιητικών επιπέδων θερμοκρασίας και υγρασίας στα γραφεία σύμφωνα με τα

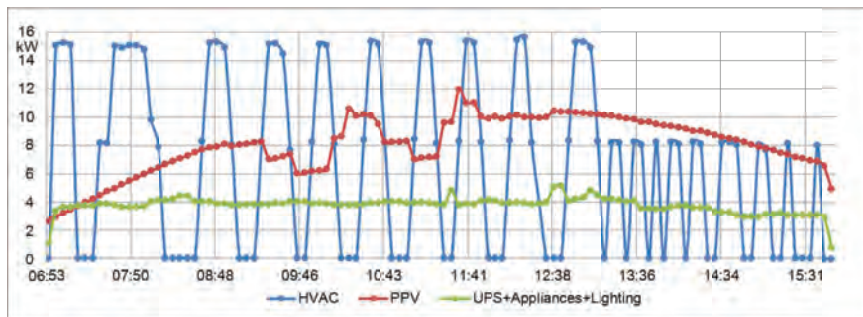
κριτήρια άνεσης/ποιότητας των εσωτερικών εργασιακών συνθηκών της ASHRAE (ακολουθώντας το πρότυπο EN 7730) όπως αποτυπώνεται στην εικόνα 6 [17].

4. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ ΙΣΟΣΚΕΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

Εκτιμώντας τις μέσες ημερήσιες ηλεκτρικές ανάγκες του κτηρίου στις 80kWh, στον πίνακα 2 παρουσιάζεται το μέγεθος της απαιτούμενης ενεργειακής αποθήκευσης για να επιτευχθεί ημερήσια ενεργειακή αυτονομία είτε στο σύνολο των αναγκών του κτηρίου, είτε για τη μερική κάλυψη αυτών σε ορίζοντα πέντε ημερών. Και στις δύο περιπτώσεις το κτήριο παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο Χ.Τ. απορροφώντας ενέργεια στις περιπτώσεις ενεργειακών ανισορροπιών που δεν εξυπηρετούνται από το μοντέλο της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης. Το ημερήσιο βάθος εκφόρτισης περιορίστηκε λίγο πάνω από το 30% προκειμένου να διευρυνθεί η ζωή των συσσωρευτών. Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτηρίου σε πραγματικό χρόνο με συσσωρευτές απορρίφθηκε καθώς το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό για το προφίλ χρήσης του κτηρίου (περίπου 150€/kWh για συσσωρευτές μολύβδου οξέος).

(%) κάλυψη ημερήσιων ηλεκτρικών	Ημέρες αυτονομίας	Απαιτούμενη Ενέργεια [kWh]	Απαιτούμενο μέγεθος ενεργειακής αποθήκευσης [kWh]
100%	5	400	1150
50%	5	200	570

Στην συνέχεια προτείνονται λύσεις για τη μερική συμμόρφωση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου στο μοντέλο του κτηρίου ισοσκελισμένου ενεργειακού ισοζυγίου χρησιμοποιώντας μέσα ενεργειακής αποθήκευσης μικρότερου μεγέθους. Στην εικόνα 7 αποτυπώνονται η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση του κτηρίου για μια τυπική μέρα της καλοκαιρινής περιόδου, όπως επίσης και η παραγωγή του Φ/Β συστήματος. Αναλυτικότερα, η ηλεκτρική κατανάλωση διαιρείται στις δύο συνιστώσες βάσει των οποίων επιλέχθηκαν οι τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας (κατανάλωση HVAC συστήματος και άθροισμα των καταναλώσεων φωτισμού, U.P.S. και των υπόλοιπων ηλεκτρικών φορτίων του κτηρίου).

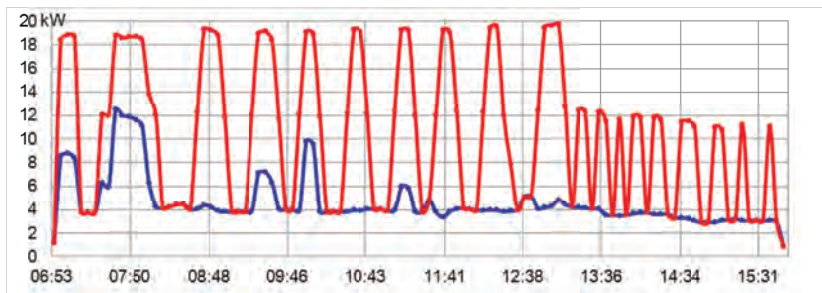


Εικόνα 7: Συνιστώσες της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης του κτηρίου για μια τυπική μέρα της καλοκαιρινής περιόδου και ηλεκτροπαραγωγική ικανότητα του Φ/Β συστήματος.

Η μελέτη του παραπάνω γραφήματος αποδεικνύει πως το σύστημα HVAC παρουσιάζει ιδιαίτερα έντονο διακοπτικό χαρακτήρα, συμπαρασύροντας και τη συνολική εικόνα της ηλεκτρικής κατανάλωσης του κτηρίου, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται από το σχήμα 8 (γράφημα με το κόκκινο χρώμα). Αντιθέτως η δεύτερη συνιστώσα της ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου παραμένει σχεδόν σταθερή σε όλη την περίοδο χρήσης του κτηρίου και συνεπώς δεν είναι ικανή να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα της τάσης και την ηλεκτρική ισχύ του ηλεκτρικού δικτύου.

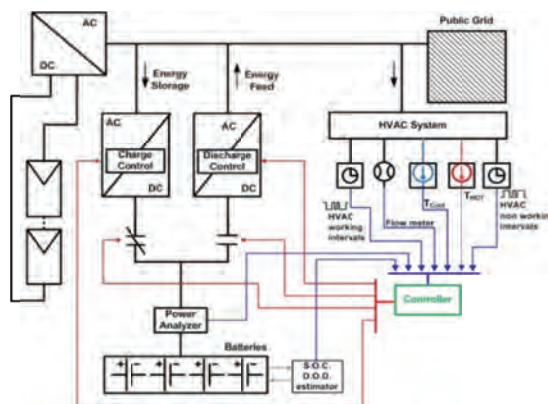
Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται η δομή και η βασική αρχή λειτουργίας ενός συστήματος αξιοποίησης των Φ/Β συστημάτων για την εξομάλυνση της ηλεκτρικής ζήτησης του

θέρμανσης/ψύξης συστήματος. Συγκεκριμένα μεταξύ δύο διαδοχικών λειτουργικών κύκλων, η ενέργεια που παράγεται από το Φ/Β σύστημα αποθηκεύεται σε συσσωρευτές. Στον επόμενο λειτουργικό κύκλο το HVAC σύστημα θα τροφοδοτείται από τους συσσωρευτές, τα Φ/Β και ενδεχομένως από το ηλεκτρικό δίκτυο (στην περίπτωση που η ενέργεια που αποθηκεύτηκε δεν είναι αρκετή για να καλύψει την ηλεκτρική ζήτηση -συνήθως στους χειμερινούς μήνες-).



Εικόνα 8: Ηλεκτρική κατανάλωση μια τυπική μέρα της καλοκαιρινής περιόδου πριν (κόκκινο) και μετά (μπλε) την μερική εφαρμογή του μοντέλου των κτηρίων ισοσκελισμένου ενεργειακού ισοζυγίου.

Αξιοποιώντας τις μετρήσεις των λειτουργικών χαρακτηριστικών του συστήματος θέρμανσης ψύξης (θερμοκρασίες και ροή νερού, καθώς και τις θερμοκρασίες εντός και εκτός του κτηρίου είναι δυνατόν να προβλεφτεί η χρησιμοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας. Σε περίπτωση ενεργειακού πλεονάσματος η περίσσεια ενέργεια αποδίδεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του προτεινόμενου συστήματος στην συνολική ηλεκτρική κατανάλωση του κτηρίου φαίνεται στο γράφημα μπλε χρώματος της εικόνας 8.



Εικόνα 9: Προτεινόμενο σύστημα περιορισμού των αιχμών στις ενεργειακές συναλλαγές του συστήματος HVAC και κατά συνέπεια της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις του έτους αναφοράς, η μέγιστη ενέργεια που αποθηκεύεται στους συσσωρευτές μεταξύ δύο διαδοχικών λειτουργικών κύκλων δεν ξεπερνά τις 3 kWh. Παρά ταύτα, στις ενεργειακές προσομοιώσεις επιλέχθηκε τριπλάσια τιμή χωρητικότητας, προκειμένου να περιοριστεί το βάθος εκφόρτισης και να αυξηθεί το προσδόκιμο της λειτουργίας τους.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν πρακτικές βελτιστοποίησης της ηλεκτρικής κατανάλωσης των κτηρίων που χρησιμοποιούνται ως γραφεία, στοχεύοντας αφ' ενός στον

ισσοσκελισμό του ενεργειακού τους ισοζυγίου και αφ' ετέρου στην εξομάλυνση των αιχμών στις ενεργειακές τους συναλλαγές με το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι τεχνικές που εφαρμόστηκαν οδήγησαν σε εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό 10,3% στο σύστημα θέρμανσης ψύξης και 16,9% στο φωτισμό και τα υπολογιστικά συστήματα. Τέλος το προτεινόμενο σύστημα εξομάλυνσης αιχμών εξομαλύνει καταλυτικά το προφίλ των ηλεκτρικών συναλλαγών του κτηρίου με το ηλεκτρικό δίκτυο κατά τα χρονικά διαστήματα υψηλής κατανάλωσης με ταυτόχρονη υψηλή ηλεκτροπαραγωγή από Φ/Β συστήματα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε θερμά τους κυρίους Federico Noris, Daniele Antonucci ερευνητές του Ινστιτούτου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας της EURAC για τη βοήθειά τους στον προσδιορισμό της ποιότητας των εσωτερικών συνθηκών των γραφείων και τη μοντελοποίηση των κτηριακών φορτίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] I. Sartori, A.G. Hestnes: "Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article", Energy and Buildings, Vol. 39, No. 3, March 2007, pp.249-257.
- [2] "EU Energy in Figures-Statistical Pocket Book", Publication Office of the E.U., Luxembourg, 2014.
- [3] G. N. Spyropoulos, C. A. Balaras: "Energy consumption and the potential of energy savings in Hellenic office buildings used as bank branches-A case study", Energy and Buildings, Vol. 43, No. 4, Apr. 2011, pp.770-778.
- [4] D.A. Asimakopoulos, M. Santamouris, I. Farrou, M. Laskari, M. Saliari, G. Zanis, G. Giannakidis, K. Tigas, J. Kapsomenakis, C. Douvis, S.C. Zerefos, T. Antonakaki, C. Giannakopoulos: "Modelling the energy demand projection of the building sector in Greece in the 21st century", Energy and Buildings, Vol. 49, June 2012, pp.488-498.
- [5] Sfakianaki A., Santamouris M., Hutchins M., Nichol F., Wilson M., Pagliano L., Pohl W., Alexandre J.L., Freire A.: "Energy consumption variation due to different thermal comfort categorization introduced by European standard EN 15251 for new building design and major rehabilitations", International Journal of Ventilation, Vol. 10, No. 2, Sept. 2011, pp.195-204.
- [6] M. Santamouris, D. Kolokotsa: "Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: the state of the art Review Article", Energy & Buildings, Vol. 57, Feb. 2013, pp.74-94
- [7] M. Kapsalaki, V. Leal, M. Santamouris: "A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings", Energy and Buildings, Vol. 55, December 2012, pp.765-778.
- [8] M. Economidou, et al.: "European Buildings under the Microscope-A country by country review of the energy performance of buildings", Published by Buildings Performance Institute Europe (BPIE), October 2011, ISBN: 9789491143014.
- [9] Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, Christine Pout.: "A review on buildings energy consumption information", Energy and Buildings, Vol. 40, No. 3, 2008, pp.394-398.
- [10] Patxi Hernandez, Paul Kenny: "From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB)", Energy and Buildings, Vol. 42, No. 6, June 2010, pp.815-821.
- [11] A.J. Marszal, P. Heiselberg, J.S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano: "Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies", Energy and Buildings, Vol. 43, No. 4, April 2011, pp.971-979, ISSN 0378-7788.
- [12] <http://www.farsystems.it/>
- [13] <http://www.eurac.edu/>
- [14] A.C. Menezes, A. Cripps, R.A. Buswell, J. Wright, D. Bouchlaghem, Estimating the energy consumption and power demand of small power equipment in office buildings, Energy and Buildings, Volume 75, June 2014, Pages 199-209.
- [15] NBI, "Plug Load Best Practice Guide – Managing Your Office Equipment Plug Load", New Buildings Institute, 2012.
- [16] <http://www.degreedays.net/>
- [17] <https://www.ashrae.org/>