

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΗΓΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΑΝΑΓΚΩΝ ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Βασίλειος Κίλης^{1*}, Γεώργιος Πανάρας¹, Νικόλαος Πλόσκας²

¹ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΠΔΜ,

² Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή,
ΠΔΜ

e-mail: mpi00012@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η περιβαλλοντική επιβάρυνση του πλανήτη σε συνδυασμό με τη μείωση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων έχει οδηγήσει στη λήψη δραστικών αποφάσεων σχετικά με τη μείωση της συμβατικής ενέργειας που καταναλώνεται στα κτήρια, συμπεριλαμβάνοντας στις απαιτούμενες δράσεις την αύξηση διείσδυσης συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού ενεργειακού συστήματος, όπου περιλαμβάνονται πολλές πηγές ενέργειας, με στόχο την κάλυψη των αναγκών ζεστού νερού οικιακής χρήσης. Ειδικότερα, διατυπώνονται μαθηματικά μοντέλα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και διερευνώνται οι βέλτιστες λύσεις σε οικονομικό, ενεργειακό και περιβαλλοντικό επίπεδο, αναφορικά με τον βαθμό συμμετοχής έκαστου ενεργειακού συστήματος. Σχετικά με τα μοντέλα, δομούνται απλές προσεγγίσεις γραμμικών αντικειμενικών συναρτήσεων, πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων με ή χωρίς συντελεστές βαρύτητας και μοντέλα που βασίζονται στον προγραμματισμό στόχων. Η μοντελοποίηση των προβλημάτων πραγματοποιείται με το λογισμικό GAMS και η επίλυση τους με τον λύτη CPLEX.

Η εφαρμογή των μοντέλων γίνεται σε περίπτωση κτηρίου χρήσης κατοικίας, επιφάνειας 200m², τοποθετούμενου στην κλιματική ζώνη Α και Δ. Για την κάλυψη των φορτίων επιλέγονται τόσο συμβατικά συστήματα όσο και συστήματα ΑΠΕ (ηλιακό θερμικό σύστημα και λέβητας βιομάζας). Το χρονικό βήμα της ανάλυσης είναι μία ώρα για ετήσια λειτουργία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, στην περίπτωση του ενεργειακού κριτηρίου κυριαρχεί η βιομάζα (ή η Α/Θ όταν η βιομάζα δε συμπεριλαμβάνεται), με αύξηση συμμετοχής των ηλιακών συλλεκτών όταν εισάγεται και ο παράγοντας του περιβαλλοντικού κριτηρίου. Η συμμετοχή των ΑΠΕ (ηλιακό σύστημα) ενισχύεται και στην περίπτωση του προγραμματισμού στόχων λόγω της δυνατότητας αποκλίσεων από τους προκαθορισμένους στόχους.

Η ανάλυση κατέδειξε ότι τα υφιστάμενα μεθοδολογικά εργαλεία ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να αξιοποιηθούν στην κατεύθυνση διερεύνησης προβλημάτων πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων ή σύγκρισης των υποσυστημάτων. Η διερεύνηση μπορεί να επεκταθεί σε διαφορετικούς τύπους ενεργειακών συστημάτων, ή κτηρίων για το σύνολο των κλιματικών ζωνών, αλλά και σε διαφορετικές χρήσεις, όπως η θέρμανση και η ψύξη των χώρων. Τέλος, η μείωση του χρονικού βήματος ανάλυσης, μπορεί να οδηγήσει στην αξιοποίηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας και των ευρημάτων σε προβλήματα ανάπτυξης αλγορίθμων βέλτιστου ελέγχου ενεργειακών συστημάτων.

Λέξεις Κλειδιά: βελτιστοποίηση, διατάξεις πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων, ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός, ζεστό νερό οικιακής χρήσης, ΑΠΕ.

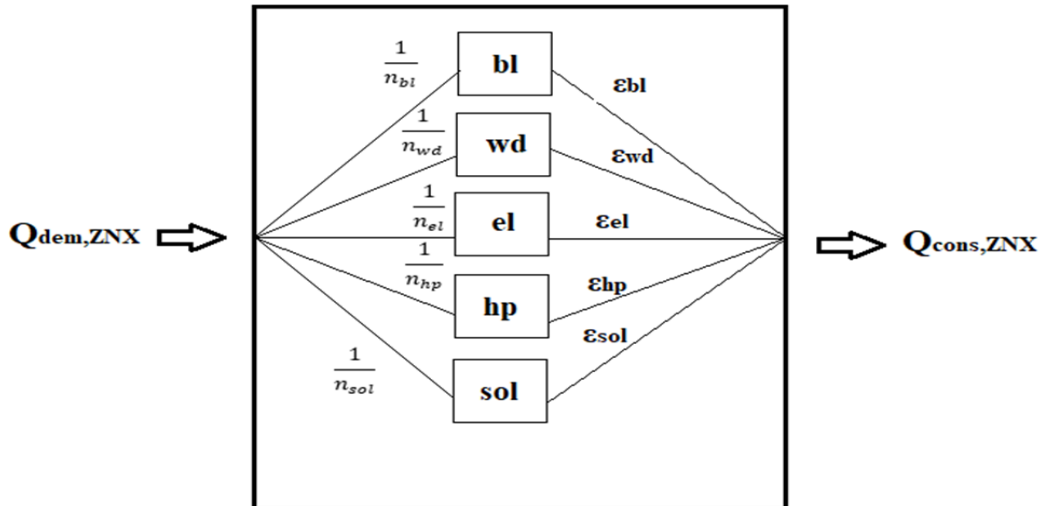
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα για την παγκόσμια κοινότητα, ειδικά τα τελευταία 20 χρόνια, είναι η αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας λόγω του μεγάλου πληθυσμού και της οικονομικής ανάπτυξης. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ-28), σύμφωνα με τα ετήσια ενεργειακά στοιχεία του 2018, τα κτήρια αντιπροσωπεύουν περίπου το 41% της συνολικής τελικής ενέργειας κατανάλωσης. Η ΕΕ δείχνει ιδιαίτερη μέριμνα στον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης κτηρίων με σημαντικότερη νομοθετική πρωτοβουλία την Οδηγία για την Ενεργειακή Αποδοτικότητα Κτηρίων [1] και την επικαιροποίηση αυτής [2]. Επίσης, η ΕΕ έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για τη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας που βασίζεται στην ορυκτή καύσιμη ύλη και κατ' επέκταση των συνεπακόλουθων εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα. Έτσι, όλα τα νέα κτήρια πρέπει να είναι σχεδόν μηδενικών ενεργειακών προδιαγραφών (near Zero Energy Building, nZEB) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2020. Οι στόχοι για το 2030 είναι αρχικά μια μείωση τουλάχιστον κατά 40% των αερίων του θερμοκηπίου συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990, η παραχώρηση μεριδίου τουλάχιστον 32% για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τουλάχιστον 32,5% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των χρησιμοποιούμενων συστημάτων [6].

Η κάλυψη των αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης για τις οικιακές εγκαταστάσεις αποτελεί έναν βασικό παράγοντα στις συνολικές ενεργειακές καταναλώσεις ενός κτηρίου. Αυτό αποδεικνύεται από στατιστικά δεδομένα, όπου διαπιστώνεται πως η κατανάλωση για τη θέρμανση του νερού χρήσης στα ελληνικά νοικοκυριά προσεγγίζει το 15% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας, το 56% είναι για την θέρμανση των χώρων, το 21% για τον ηλεκτροφωτισμό και τις ηλεκτρικές συσκευές, ενώ μικρά ποσοστά της τάξεως του 5% και 4% είναι για το μαγείρεμα και την ψύξη των χώρων, αντίστοιχα [10]. Παρατηρείται πως ανάλογα με τον αριθμό των κατοίκων και τον τύπο του κτηρίου, η θέρμανση του νερού είναι ένα βασικό οικονομικό και περιβαλλοντικό έξοδο που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση του οικονομικότερου και φιλικότερου στο περιβάλλον ενεργειακού συστήματος, εισάγοντας με αυτόν τον τρόπο την έννοια της βελτιστοποίησης. Παράλληλα, εισάγεται και η έννοια των διατάξεων πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων (multi energy systems), βάση της οποίας μπορεί να επιλεγεί το ποσοστό συμμετοχής του κάθε ενεργειακού συστήματος ανάλογα με την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιεί, μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης [7]. Το μοντέλο αυτό προκύπτει βάσει του σχηματισμού ενός ενεργειακού κόμβου (energy hub), το οποίο αποτελεί ένα σύνολο κατάλληλα διαμορφωμένων εξισώσεων ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα συστήματα, ανεπτυγμένων σε μητρώα που αφορούν τη ροή ενέργειας στην είσοδο και στην έξοδο του κόμβου. Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται με στόχο την επίτευξη του βέλτιστου τρόπου χρησιμοποίησης του κάθε συστήματος ανάλογα με το κριτήριο βελτιστοποίησης [8, 9].

Στην παρούσα εργασία διατυπώνονται μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης ως προς τον βαθμό συμμετοχής των ενεργειακών συστημάτων, σύμφωνα με τον ενεργειακό κόμβο της Εικόνας 1 για την κάλυψη των αναγκών ζεστού νερού χρήσης σε κτηριακή εγκατάσταση. Ο κόμβος αυτός βασίζεται στη χρήση διατάξεων πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο λέβητας βιομάζας (wd), ο λέβητας πετρελαίου (bl), ο ηλεκτρικός (el) και ηλιακός (sol) θερμοσίφωνας και η αντλία θερμότητας αέρα – νερού. Η εφαρμογή των μοντέλων γίνεται σε περίπτωση κτηρίου χρήσης κατοικίας, επιφάνειας 200m² τόσο για την κλιματική ζώνη Α όσο και για την Δ. Η διερεύνηση της βέλτιστης λύσης των μοντέλων γίνεται σε οικονομικό, ενεργειακό και περιβαλλοντικό επίπεδο σε ωριαία κλίμακα για ολόκληρο το έτος. Η μοντελοποίηση των προβλημάτων πραγματοποιείται με το λογισμικό GAMS και η επίλυση τους με τον λύτη αξιοποιώντας τις αρχές του γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού μέσα από διάφορες προσεγγίσεις κι μεθόδους ανάπτυξής τους.

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανάπτυξης των κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων που θα βελτιστοποιούν τον βαθμό συμμετοχής των ενεργειακών συστημάτων για την κάλυψη αναγκών σε ΖΝΧ. Αρχικά, γίνεται η επιλογή των κατάλληλα χρησιμοποιούμενων συστημάτων και ο καθορισμός των βασικών χαρακτηριστικών τους, όπως το κόστος, οι βαθμοί απόδοσης, κ.α. Στη συνέχεια, διατυπώνονται οι βασικές παράμετροι με τον υπολογισμό των ενεργειακών μεγεθών, αλλά και της ισχύος. Τέλος, παρατίθεται η μεθοδολογία ανάπτυξης του βασικού μοντέλου, καθώς και των υπόλοιπων κατηγοριών και μεθόδων των μοντέλων, καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυσή τους.



Εικόνα 1: Ενεργειακός κόμβος διάταξης πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Διατύπωση παραμέτρων προβλήματος

2.1.1. Χαρακτηριστικά των διατάξεων πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων

Τα ενεργειακά συστήματα που επιλέγονται για την κάλυψη των αναγκών σε ZNX χρησιμοποιούνται σε πολλές κτηριακές εγκαταστάσεις και αξιοποιούν συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές για την άντληση της απαιτούμενης ενέργειας.

Οι τιμές του κόστους διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: τα ενεργειακά κόστη, τα κόστη εγκατάστασης που σχετίζονται με την εγκατεστημένη ισχύ και τα περιβαλλοντικά κόστη που αφορούν στην ποσοτικοποίηση εκλυόμενων ρύπων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που αποτελεί αέριο του φαινομένου του θερμοκηπίου. Οι μοναδιαίες τιμές του κόστους βασίζονται σε έρευνα αγοράς για τυπικά συστήματα, καθώς και σε τρέχουσες τιμές των παρόχων ή προμηθευτών και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Οι βαθμοί απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων είναι οι τυπικοί που διατίθενται τόσο στη βιβλιογραφία όσο και στην αγορά. Για τα περισσότερα συστήματα οι αποδόσεις είναι σταθερές, όμως, για την αντλία θερμότητας συμπεριλήφθηκε η εξάρτηση της απόδοσής της από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Συνεπώς, υπολογίζονται οι θερμοκρασίες του αέρα του περιβάλλοντος σε ωριαίο επίπεδο σύμφωνα με τη Σχέση 1 [5], ώστε στη συνέχεια να υπολογιστούν και οι ωριαίες τιμές των συντελεστών απόδοσης σύμφωνα με τη Σχέση 2, όπου υπολογίζεται ο μέσος βαθμός απόδοσης της αντλίας θερμότητας [11].

$$T_{o,t} = T_{o,max} - (P\%) \cdot DR \quad (1)$$

όπου:

- $T_{o,t}$: οι ωριαίες θερμοκρασίες.
- $T_{o,max}$: η μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία 24ώρου για τον κάθε μήνα.
- $P\%$: το ποσοστό μεταβολής της θερμοκρασίας ανά ώρα.
- DR : η μηνιαία διακύμανση της θερμοκρασίας 24ώρου.

$$COP = 0,001 \cdot \Delta T^2 - 0,1534 \cdot \Delta T + 7,3775 \quad (2)$$

όπου:

- ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος με τη θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου (νερού), όπου θεωρείται στους 50°C [5].

Πίνακας 1: Βαθμοί απόδοσης, διάρκεια ζωής και κόστη για κάθε ενεργειακό σύστημα.

Συστήματα	Βαθμός απόδοσης (%)	Ενεργειακό κόστος (€/kWh)	Κόστος εγκατάστασης (€/kW)	Περιβαλλοντικό κόστος (€/kW)	Διάρκεια ζωής (έτη)
bl	80	0,025/0,1	100	0,04	20
wd	90	0,04	250	0	15
el	95	0,05-0,15	100	0,065	15
hp	μεταβάλλεται	0,05-0,15	250	0,065	15
sol	95	0	450 (€/m ²)	0,004	15

Οι διπλές τιμές στα κόστη οφείλονται σε εκπτώσεις για ορισμένους μήνες, αλλά και ώρες της ημέρας. Για το πετρέλαιο θεωρήθηκε μία έκπτωση τους μήνες από Μάιο μέχρι Αύγουστο, ενώ για το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος θεωρείται το νυχτερινό τιμολόγιο. Αυτό έγινε με σκοπό να διερευνώνται οι επιπτώσεις που έχουν στα τελικά αποτελέσματα, πιθανές διαφοροποιήσεις στις τιμές των παραμέτρων.

2.1.2. Ενεργειακά μεγέθη

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των ενεργειακών απαιτήσεων σε μηνιαίο επίπεδο για τις δύο κλιματικές ζώνες σύμφωνα με τη Σχέση 3 [3], οι οποίες ανάγονται σε ωριαίο επίπεδο για κάθε μήνα.

$$Q_{ZNX} = V_W \cdot N_{day,i} \cdot \frac{\rho \cdot c}{3600} \cdot (\theta_{ZNX,i} - \theta_{w,i}) \quad (3)$$

όπου:

- Q_{ZNX} [kWh]: το μηνιαίο απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο για την κάλυψη των αναγκών σε ZNX.
- V_W $\left[\frac{Lt}{\mu\epsilon\rho\sigma\alpha}\right]$: η ημερήσια ογκομετρική παροχή του νερού.
- $N_{day,i}$: ο αριθμός των ημερών του κάθε μήνα.
- $\rho = 1 \frac{kg}{Lt}$: η πυκνότητα του νερού.
- $c = 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$: η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού.
- $\theta_{ZNX,i} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$: η απαιτούμενη θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης.
- $\theta_{w,i}$: η θερμοκρασία του νερού δικτύου της περιοχής για τον κάθε μήνα.

Στη συνέχεια, ανάλογα με τους βαθμούς απόδοσης του κάθε συστήματος υπολογίζονται οι ενεργειακές καταναλώσεις σε ωριαίο επίπεδο σύμφωνα με τη Σχέση 4 [3]. Με βάση τις τιμές αυτές υπολογίζονται τόσο τα ενεργειακά, όσο και τα περιβαλλοντικά κόστη.

$$Q_{cons} = \frac{Q_{dem}}{n \text{ ή COP}} \quad (4)$$

Τέλος, αναφορικά με τον υπολογισμό της εγκατεστημένης ισχύος του κάθε ενεργειακού συστήματος, αυτή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις ωριαίες ενεργειακές απαιτήσεις για την κάλυψη του φορτίου σε πέντε ώρες λειτουργίας ημερησίως, όπως ορίζει η τεχνική οδηγία TOTEE [3]. Ειδικά για τον ηλιακό θερμοσίφωνα, η διαστασιολόγηση γίνεται με την εύρεση της επιφάνειας των θερμικών ηλιακών συλλεκτών αξιοποιώντας τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία σε μηνιαίο επίπεδο.

$$A_{sol} = \frac{E_{solHW}}{CF_{sol} \cdot H_{sol}} = \frac{Q_{dem,sol}}{n_{sol} \cdot CF_{sol} \cdot H_{sol}} \quad (5)$$

όπου:

- E_{solHW} [kWh]: ωφέλιμη ενέργεια από τον συλλέκτη, που αντιπροσωπεύει την ενέργεια που καταναλώνει ο συλλέκτης για ZNX.

- $CF_{sol} = 0,4$: ο συντελεστής αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, δηλαδή ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη σε μηνιαίο επίπεδο.
- $A_{sol} [m^2]$: η επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη.
- $H_{sol} \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$: η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία σε μηνιαία βάση [5].

2.2. Μοντελοποίηση

Το αναπτυσσόμενο μοντέλο θα επιλέγει ποιο σύστημα είναι κατάλληλο να χρησιμοποιείται και σε τι βαθμό συμμετοχής ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος. Αυτό γίνεται με τον καθορισμό του ενεργειακού κόστους της κάθε πηγής, μέσα από τις καταναλώσεις, με την εισαγωγή του βαθμού συμμετοχής του καθενός. Επιπλέον, στο μοντέλο προστίθεται και το κόστος εγκατάστασης που σχετίζεται με τη διαστασιολόγηση των συστημάτων σε ωριαίο επίπεδο, συμπεριλαμβανομένης της διάρκειας ζωής του κάθε συστήματος. Το κόστος αυτό αποτελεί ένα σταθερό κόστος στη συνολική εξίσωση, το οποίο συνυπολογίζεται μόνο όταν ευνοείται η χρήση του εκάστοτε συστήματος. Για τον λόγο αυτό εισάγονται περαιτέρω δυαδικές μεταβλητές, όπως φαίνεται στη Σχέση 6, που αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης του κόστους.

$$E_{encost} = \frac{Q_{dem} \cdot cost_{bl}}{n_{bl}} \cdot \varepsilon_{bl} + \frac{Q_{dem} \cdot cost_{wd}}{n_{wd}} \cdot \varepsilon_{wd} + \frac{Q_{dem} \cdot cost_{el}}{n_{el}} \cdot \varepsilon_{el} + \frac{Q_{dem} \cdot cost_{HP}}{n_{HP}} \cdot \varepsilon_{HP} + \frac{Q_{dem} \cdot cost_{sol}}{n_{sol}} \cdot \varepsilon_{sol} + \frac{P_{bl} \cdot inct_{bl}}{y_{bl}} \cdot \alpha + \frac{P_{wd} \cdot inct_{wd}}{y_{wd}} \cdot \beta + \frac{P_{el} \cdot inct_{el}}{y_{el}} \cdot \gamma + \frac{P_{HP} \cdot inct_{HP}}{y_{HP}} \cdot \delta + \frac{A_{sol} \cdot inct_{sol}}{y_{sol}} \cdot \varepsilon \quad (6)$$

όπου οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος είναι:

- $\varepsilon_{bl}, \varepsilon_{wd}, \varepsilon_{el}, \varepsilon_{GHP}, \varepsilon_{HP}, \varepsilon_{sol}$: τα ποσοστά συμμετοχής του κάθε συστήματος (ποσοστιαίες μεταβλητές απόφασης).
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$: δυαδικές μεταβλητές απόφασης του κάθε συστήματος που καθορίζουν το κόστος εγκατάστασης.

Βέβαια, είναι απαραίτητο να διατυπωθούν ορισμένοι περιορισμοί, οι τύποι και η ερμηνεία των οποίων περιγράφεται παρακάτω.

- Περιορισμοί μη αρνητικότητας και ποσοστού συμμετοχής.

$$0 \leq \varepsilon_{bl} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{wd} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{el} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{HP} \leq 1, 0 \leq \varepsilon_{sol} \leq 1 \quad (7)$$

- Περιορισμός πλήρους κάλυψης των απαιτήσεων.

$$\varepsilon_{bl} + \varepsilon_{wd} + \varepsilon_{el} + \varepsilon_{HP} + \varepsilon_{sol} = 1 \quad (8)$$

- Περιορισμοί συμμετοχής του κόστους εγκατάστασης.

$$\varepsilon_{bl} \leq \alpha, \varepsilon_{wd} \leq \beta, \varepsilon_{el} \leq \gamma, \varepsilon_{HP} \leq \delta, \varepsilon_{sol} \leq \varepsilon \quad (9)$$

2.3. Κατηγορίες μοντέλων βελτιστοποίησης

2.3.1. Ενεργειακό μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους

Το παρόν μοντέλο διαφοροποιείται από το πρωταρχικό (Σχέση 6) καθώς το ενεργειακό κόστος των ηλιακών συλλεκτών λαμβάνεται μηδενικό αφού θεωρείται ότι είναι ΑΠΕ. Το μοντέλο αυτό μελετάται για τις κλιματικές ζώνες Α και Δ για τα πέντε ενεργειακά συστήματα που προαναφέρθηκαν, αλλά και για την περίπτωση χωρίς τον λέβητα βιομάζας.

2.3.2. Περιβαλλοντικό μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους

Στο μοντέλο αυτό περιλαμβάνονται τα περιβαλλοντικά κόστη και προφανώς δε συνυπολογίζονται τα κόστη εγκατάστασης, με αποτέλεσμα να απαλείφονται οι δυαδικές μεταβλητές. Στο μοντέλο αυτό, η διερεύνηση αφορά στις ίδιες περιπτώσεις με το ενεργειακό μοντέλο.

2.3.3. Πολυκριτηριακό μοντέλο

Πρόκειται για γραμμικό μοντέλο δύο αντικειμενικών συναρτήσεων – κριτηρίων, όπου συνδυάζεται το ενεργειακό με το περιβαλλοντικό μοντέλο. Στην περίπτωση αυτή μελετάται μόνο η περίπτωση της Δ κλιματικής ζώνης χωρίς να συμπεριλαμβάνεται ο λέβητας βιομάζας. Διερευνήθηκαν τρεις τύποι μοντέλων αυτής της κατηγορίας. Αρχικά μελετήθηκε το μοντέλο χωρίς βαρύτητες όπου η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει ισόποσα το ενεργειακό (E_{encost}) και περιβαλλοντικό κόστος ($E_{envcost}$) (Σχέση 10) και στη συνέχεια μελετήθηκαν δύο μοντέλα με βαρύτητες, το μοντέλο με 70% βαρύτητα στο ενεργειακό και 30% στο περιβαλλοντικό κριτήριο (Σχέση 11), αλλά και το μοντέλο με 30% βαρύτητα στο ενεργειακό και 70% στο περιβαλλοντικό (Σχέση 12).

$$E_{costs} = E_{encost} + E_{envcost} \quad (10)$$

$$E_{costs} = 0,7 \cdot E_{encost} + 0,3 \cdot E_{envcost} \quad (11)$$

$$E_{costs} = 0,3 \cdot E_{encost} + 0,7 \cdot E_{envcost} \quad (12)$$

2.3.4. Μοντέλο προγραμματισμού στόχων

Ο προγραμματισμός στόχων (Goal Programming) είναι μια μέθοδος επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, οι οποίες τίθενται ως περιορισμοί με την εισαγωγή μεταβλητών απόκλισης από τον στόχο του κάθε περιορισμού. Η αντικειμενική συνάρτηση απαιτεί την ελαχιστοποίηση των μεταβλητών απόκλισης από τους στόχους. Οι περιορισμοί στη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης είναι οι αντικειμενικές συναρτήσεις των κλασικών μοντέλων που αναλύθηκαν παραπάνω, δηλαδή οι ενεργειακοί και περιβαλλοντικοί στόχοι, μαζί με τις μεταβλητές απόκλισης. Οι στόχοι εκφράζονται ως ισότητες για τα ωριαία ελάχιστα κόστη που προέκυψαν από την επίλυση των κλασικών μοντέλων. Με τη μέθοδο αυτή αναπτύχθηκαν δύο τύποι προβλημάτων: το κλασικό μοντέλο (Σχέση 13) και το αντίστοιχο με βαρύτητες, όπου το ενεργειακό κριτήριο έχει διπλάσια βαρύτητα από το περιβαλλοντικό (Σχέση 14). Στα μοντέλα αυτά ισχύουν οι βασικοί περιορισμοί που περιεγράφηκαν στα αρχικά μοντέλα και προστίθενται οι παρακάτω περιορισμοί με τις μεταβλητές απόκλισης (Σχέσεις 15 και 16) [12].

$$\min z = n_1^- + p_1^+ + n_2^- + p_2^+ \quad (13)$$

$$\min z = \frac{2}{E_{encost}} \cdot n_1^- + \frac{2}{E_{encost}} \cdot p_1^+ + \frac{1}{E_{envcost}} \cdot n_2^- + \frac{1}{E_{envcost}} \cdot p_2^+ \quad (14)$$

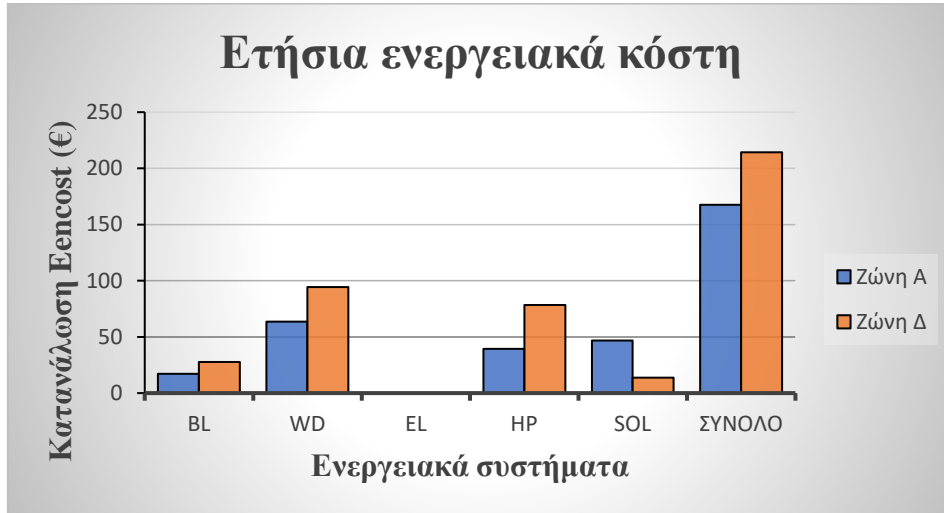
$$\text{s.t. } x_1 \cdot e_{bl} + x_2 \cdot e_{el} + x_3 \cdot e_{hp} + x_4 \cdot e_{sol} + k_1 \cdot \alpha + k_2 \cdot \beta + k_3 \cdot \gamma + n_1^- - p_1^+ = E_{encost} \quad (15)$$

$$y_1 \cdot e_{bl} + y_2 \cdot e_{el} + y_3 \cdot e_{hp} + y_4 \cdot e_{sol} + n_2^- - p_2^+ = E_{envcost} \quad (16)$$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

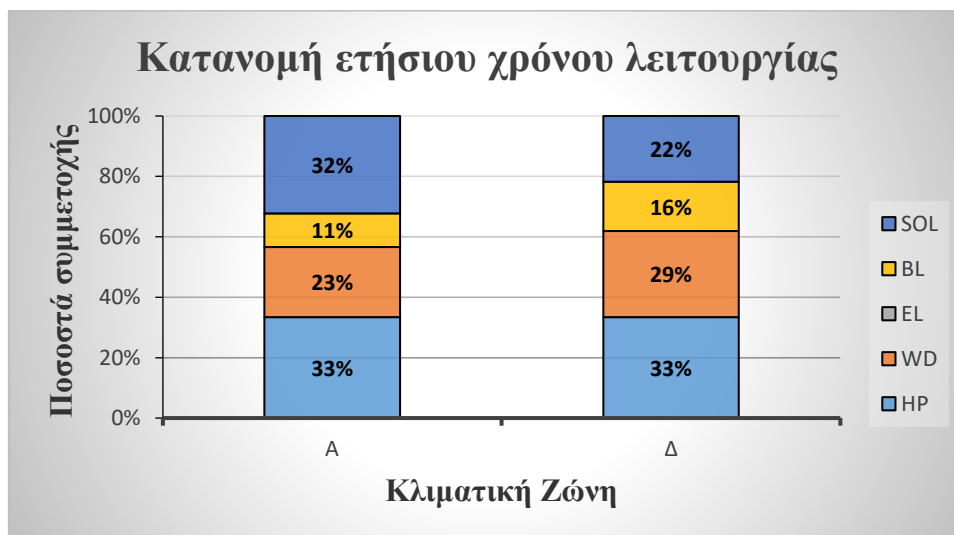
Τα αποτελέσματα δίνονται σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων σε ετήσιο επίπεδο, όπως αυτά προέκυψαν από την ωριαία ανάλυση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα μαζί με τα βασικότερα συμπεράσματα παρουσιάζονται για κάθε κατηγορία μοντέλου.

3.1. Αποτελέσματα ενεργειακού μοντέλου ελαχιστοποίησης κόστους



Εικόνα 2: Ελαχιστοποιημένα συνολικά κόστη σε € σε ετήσιο επίπεδο για κάθε ενεργειακό σύστημα για τις δύο κλιματικές ζώνες.

Από την Εικόνα 2, όπου στις στήλες του διαγράμματος αποτυπώνονται τα βέλτιστα ενεργειακά κόστη του κάθε συστήματος, παρατηρείται πως το συνολικό ελάχιστο κόστος είναι μεγαλύτερο στην Δ κλιματική ζώνη, εξαιτίας των δυσμενέστερων κλιματικών συνθηκών. Βέβαια, και στις δύο ζώνες κυριαρχεί ο λέβητας βιομάζας, κυρίως λόγω του χαμηλότερου ενεργειακού κόστους της βιομάζας, που ακολουθείται από την αντλία θερμότητας στην Δ ζώνη και τον ηλιακό συλλέκτη στην Α ζώνη.



Εικόνα 3: Κατανομή ετήσιου χρόνου λειτουργίας για τις δύο κλιματικές ζώνες.

Στην Εικόνα 3 φαίνονται τα αποτελέσματα σε επίπεδο ωρών λειτουργίας, όπου παρατηρείται ότι η αντλία θερμότητας κυριαρχεί και στις δύο κλιματικές ζώνες, ακολουθούμενη από την βιομάζα στη ζώνη Δ και τον ηλιακό συλλέκτη στην Α. Ο χρόνος λειτουργίας της αντλίας θερμότητας είναι σταθερός και μέγιστος και στις δύο κλιματικές ζώνες σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα, εξαιτίας του χαμηλού ενεργειακού κόστους κατά την παραδοχή του νυχτερινού τιμολογίου. Αυτό ισχύει και για τον ηλεκτρικό θερμοσίφωνα,

όπου όμως η κατανάλωση ενέργειας, και κατά συνέπεια το κόστος λειτουργίας του, είναι υψηλότερα σε σχέση με την περίπτωση της αντλίας θερμότητας.

Για το ίδιο μοντέλο χωρίς να περιλαμβάνεται ο λέβητας βιομάζας στην διερεύνηση, προκύπτει αύξηση του συνολικού ελαχιστοποιημένου κόστους κατά 12% σε ετήσια βάση, εξαιτίας του χαμηλού κόστους της βιομάζας. Το μερίδιο της βιομάζας επιμερίζεται κατά κύριο λόγο στην αντλία θερμότητας και τον ηλιακό συλλέκτη.

3.2. Αποτελέσματα περιβαλλοντικού μοντέλου ελαχιστοποίησης κόστους

Στο μοντέλο αυτό τα ΑΠΕ συστήματα επιλέγονται ως οι βέλτιστες λύσεις, δηλαδή ο λέβητας βιομάζας και ο ηλιακός συλλέκτης και για τις δύο κλιματικές ζώνες. Λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο που δε συμπεριλαμβάνεται η βιομάζα, οι θερμικού ηλιακοί συλλέκτες κυριαρχούν σε ποσοστό 100%.

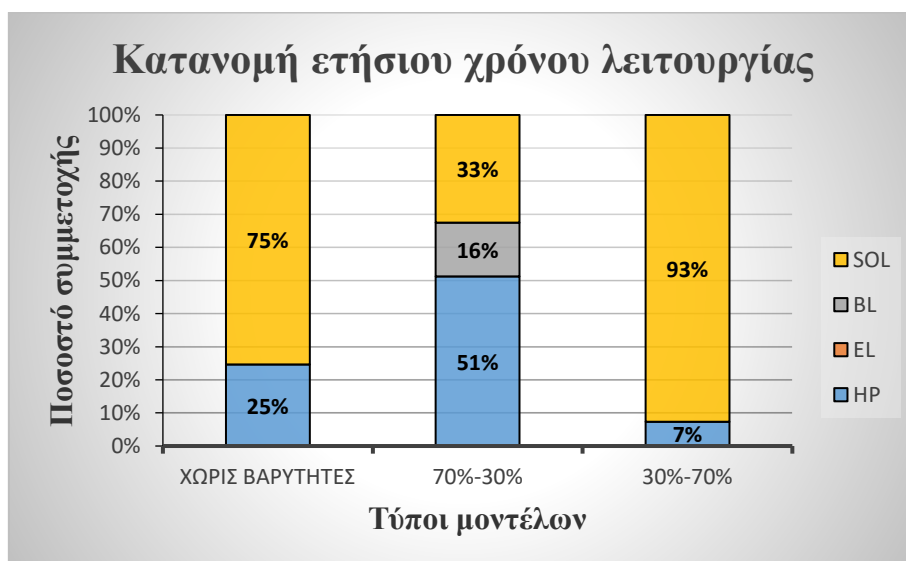
3.3. Αποτελέσματα πολυκριτηριακού μοντέλου ελαχιστοποίησης κόστους

Στα μοντέλα αυτά η μελέτη αφορά σε κτήριο της Δ κλιματικής ζώνης, χωρίς να συνυπολογίζεται ο λέβητας βιομάζας. Έτσι, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα στον Πίνακα 2, για τους τρεις τύπους μοντέλων που αναπτύχθηκαν.

Πίνακας 2: Ελαχιστοποιημένα κόστη σε € σε ετήσιο επίπεδο για τα μοντέλα πολλαπλών κριτηρίων..

Μοντέλα	Ελαχιστοποιημένα κόστη (€)				Σύνολο
	bl	el	hp	sol	
Χωρίς βαρύτητες	0	0	111,6	219,1	330,7
70%-30%	0	0	110,8	86,5	197,3
30%-70%	0	0	13,8	103,5	117,3

Για το μοντέλο χωρίς βαρύτητες, υπολογίζεται πως στο τελικό ενεργειακό μίγμα συμμετέχουν μόνο η αντλία θερμότητας και ο ηλιακός συλλέκτης προκειμένου να ελαχιστοποιείται το κόστος. Βέβαια, προκύπτει ότι το συνολικό ετήσιο κόστος είναι αυξημένο κατά 40% περίπου σε σχέση με τα αρχικά μοντέλα, γεγονός που οφείλεται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της καταναλισκόμενης συμβατικής ενέργειας και κυρίως στην ηλεκτρική ενέργεια των αντλιών θερμότητας.



Εικόνα 4: Κατανομή ετήσιου χρόνου λειτουργίας για τους τρεις τύπους μοντέλων.

Από τον Πίνακα 2 και την Εικόνα 4, όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα αναφορικά με τα κόστη και την κατανομή των χρόνων λειτουργίας αντίστοιχα, φανερώνεται πως για τα μοντέλα με τις βαρύτερες όταν η βαρύτητα δίνεται στο ενεργειακό κριτήριο, τότε αυξάνεται το συνολικό κόστος και από τους χρόνους λειτουργίας, φανερώνεται μείωση της αξιοποίησης των ΑΠΕ συστημάτων. Σε αυτά τα μοντέλα δεν ευνοείται η λειτουργία ούτε του λέβητα πετρελαίου ούτε του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα.

3.4. Αποτελέσματα μοντέλου προγραμματισμού στόχων ελαχιστοποίησης κόστους

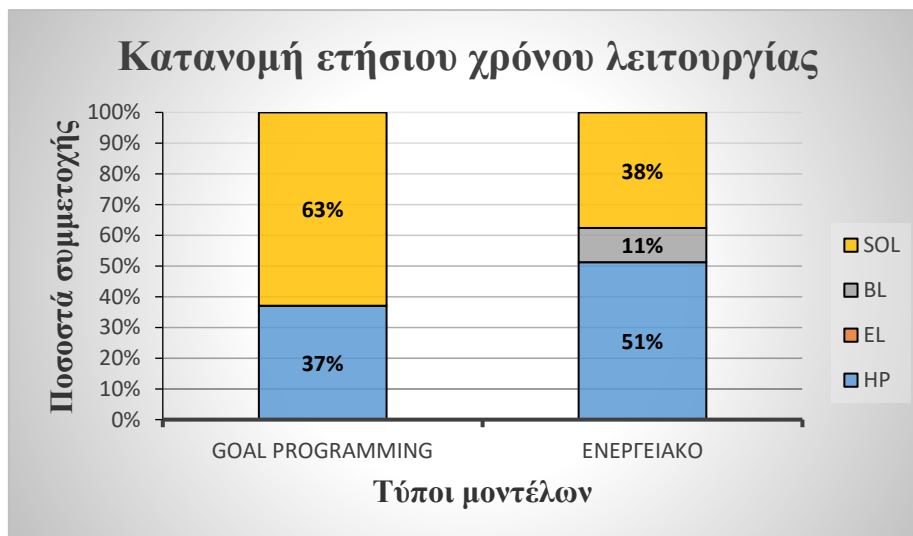
Στον Πίνακα 3 απεικονίζονται τα ελαχιστοποιημένα κόστη σε ετήσιο επίπεδο, όπως αυτά υπολογίστηκαν με ωριαία ανάλυση των δεδομένων, τόσο για το κλασικό πρόβλημα, όπου όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το ενεργειακό και το περιβαλλοντικό κριτήριο έχουν την ίδια βαρύτητα, όσο και για το πρόβλημα όπου το ενεργειακό κριτήριο έχει διπλάσια βαρύτητα σε σχέση με το περιβαλλοντικό. Ο πίνακας δείχνει την κατανομή του κόστους στο ενεργειακό και στο περιβαλλοντικό κριτήριο. Τα μοντέλα αυτά αναλύθηκαν μόνο για την κλιματική ζώνη Δ χωρίς τη συμμετοχή της βιομάζας.

Πίνακας 3: Ελαχιστοποιημένα ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη σε € σε ετήσιο επίπεδο για τα μοντέλα προγραμματισμού στόχου.

Μοντέλα	Ενεργειακό κόστος (€)	Περιβαλλοντικό κόστος (€)	Σύνολο (€)
Κλασικό	258,3	69,9	328,2
Βαρυτήτων	347,7	23	370,7

Για το κλασικό μοντέλο παρατηρείται πως τα συνολικά κόστη είναι αυξημένα σε σχέση με τα κόστη του γραμμικού ενεργειακού και περιβαλλοντικού μοντέλου, επειδή οι στόχοι είναι πλέον περισσότερο χαλαροί και αυξάνεται η συμμετοχή των ΑΠΕ συστημάτων, δηλαδή των ηλιακών συλλεκτών. Τα μόνα συστήματα που ευνοείται η χρήση τους είναι κυρίως οι ηλιακοί συλλέκτες και σε μικρότερο ποσοστό οι αντλίες θερμότητας. Αυτό αποδεικνύεται από τους χρόνους λειτουργίας των συστημάτων, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.

Όσον αφορά το μοντέλο βαρυτήτων, αν συγκριθεί με το πολυκριτηριακό με αντίστοιχες βαρύτερες 70-30%, φαίνεται πως ευνοείται η χρήση των περισσότερο αποδοτικών οικονομικά και περιβαλλοντικά τεχνολογιών (ηλιακός συλλέκτης και αντλία θερμότητας).



Εικόνα 5: Κατανομή ετήσιου χρόνου λειτουργίας για το ενεργειακό και το Goal programming μοντέλο..

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης στο σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων πολλαπλών πηγών, παρέχει αφενός τη δυνατότητα εις βάθος ανάλυσης των παραμέτρων του προβλήματος σε ενεργειακό και περιβαλλοντικό επίπεδο, και αφετέρου την δυνατότητα αξιολόγησης των αποτελεσμάτων για τον περιορισμό των πηγών, σύμφωνα με τις υποδείξεις των υπολογιζόμενων βαθμών συμμετοχής.

Σύμφωνα με την παρούσα διερεύνηση, για εφαρμογή Ζεστού Νερού Χρήσης, στην περίπτωση του ενεργειακού κριτηρίου κυριαρχεί η βιομάζα (ή η Α/Θ όταν αυτή δε συμπεριλαμβάνεται), με αύξηση συμμετοχής των ηλιακών συλλεκτών όταν εισάγεται και ο παράγοντας του περιβαλλοντικού κριτηρίου. Επιπλέον, η συμμετοχή των ΑΠΕ (ηλιακό σύστημα) ενισχύεται και στην περίπτωση του προγραμματισμού στόχων λόγω της δυνατότητας αποκλίσεων από τους πρωταρχικούς στόχους. Τέλος, παρατηρήθηκε πως σε ωριαία κλίμακα, το κλασικό μοντέλο προγραμματισμού στόχων δίνει πλουραλιστικές λύσεις για τον βαθμό συμμετοχής του κάθε ενεργειακού συστήματος.

Περαιτέρω έρευνα μπορεί να εστιάσει στην αξιοποίηση μεγαλύτερου εύρους μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού, αλλά και στην επίλυση του προβλήματος με μικρότερο χρονικό βήμα, σημειώνοντας πως η σημαντική μείωση του χρονικού βήματος μπορεί να μετατρέψει το συγκεκριμένο πρόβλημα σχεδιασμού σε πρόβλημα ελέγχου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΕΕ, 2002. Οδηγία 2002/91/ΕΚ του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου της 16ης Δεκεμβρίου 2002 για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων 2002/91/ΕΕ. Βρυξέλλες.
- [2] ΕΕ, 2010. Οδηγία 2010/31/ΕΚ του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου της 19ης Μαΐου 2010 για την ενεργειακή απόδοση κτηρίων. Βρυξέλλες.
- [3] ΤΕΕ, 2017α. ΤΟΤΕΕ20701-1: Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης. Αθήνα.
- [4] ΤΕΕ, 2017β. ΤΟΤΕΕ 20701-2. Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων. Αθήνα.
- [5] ΤΕΕ, 2017γ. ΤΟΤΕΕ 20701-3. Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών. Αθήνα.
- [6] European Commission. 2014. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030. Brussels.
- [7] Fabrizio E., Corrado V., Filippi M., 2009. A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage. *Renewable Energy* 35(3), 644-655.
- [8] Manwell JF., 2004. Hybrid energy systems. In: Cleveland CJ, editor. *Encyclopedia of energy*, vol. 3. London: Elsevier, 215–29.
- [9] Ooka R, Komamura K., 2009. Optimal design method for building energy systems using genetic algorithms. *Build Environ* 44,1538–44.
- [10] Eurostat, 2020. Energy Balance Sheets 2018. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances>. Brussels.
- [11] Mouzeviris G., Papakostas K., 2021. Comparative Analysis of Air-to-Water and Ground Source Heat Pumps Performances. *International Journal of Sustainable Energy* 40, 69-84.
- [12] Charnes A., Cooper W.W., 1981. *Management models and industrial applications of linear programming*. John Wiley & Sons. New York.

OPTIMIZATION OF MULTI ENERGY SYSTEMS FOR DOMESTIC HOT WATER USES

Vasileios Kilis^{1*}, Georgios Panaras¹, Nikolaos Ploskas²

¹ Dept. of Mechanical Engineering, University of Western Macedonia

² Dept. of Electrical & Computer Engineering, University of Western Macedonia
e-mail: mpl00012@uowm.gr

ABSTRACT

The burden that has come upon the environment, combined with the ever declining fossil fuel reserves, has led to drastic decisions to reduce conventional energy consumption in buildings, including the growing admission of renewable energy systems. This paper deals with the optimization of multi energy systems, in order to cover the needs of hot water in domestic use. In particular, mathematical models of integer and linear programming are formulated and the optimal solutions are explored under an economic, energetic and environmental point of view, under the optimization of the grade of participation of the multi energy systems. As far as models are concerned, simple approaches are built such as linear objective functions, multiple objective functions with or without weights and structures based on goal programming. The modeling and problem solving is done with GAMS operating system.

The application is done in case of a residential building, with an area of 200 m², located in the A and D climate zones. As far as cover loads are concerned, both conventional and RES systems are selected (solar thermal systems with biomass boilers). The analysis step is 1 hour, for annual operation. According to the results, in the case of the energy criterion, biomass predominates or heat pumps when biomass is not included, with an increase in participation of solar panels when the environmental criterion factor is introduced. The participation of solar systems is also reinforced in the case of target programming, because of the possibility of divergence from the targets set in the beginning.

The analysis showed that the existing methodological tools of whole linear programming can be used for investigating problems of multiple energy systems or comparing subsystems. The investigation can be extended to different types of energy systems, or buildings for all climatic zones, but also to different uses, such as space heating and cooling. Finally, the reduction of analysis step time, can lead to the utilization of the proposed methodology and the findings in development problems of optimal control systems or energy systems.

Keywords: *optimization, multi energy systems, linear programming, domestic hot water, renewable energy systems*