

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟΝ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ**

Μ. Καρμέλλος*, Π. Γεωργίου, Γ. Μαυρωτάς
Εργαστήριο Βιομηχανικής & Ενεργειακής Οικονομίας, Σχολή Χημικών Μηχανικών,
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα
(*mkarmellos@chemeng.ntua.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας (ΣΔΠΕ) μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην παροχή ενέργειας (ηλεκτρισμός, θερμότητα, ψύξη) σε τοπικό επίπεδο με μικρότερο συνολικό κόστος και μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Για την παροχή ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε συμβατικές είτε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Ο σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων μπορεί να υλοποιηθεί με μοντέλα Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού, ειδικότερα με χρήση του Πολυκριτηριακού Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (ΜΑΓΠ - *Multi-objective Mixed Integer Linear Programming*) με αντικειμενικές συναρτήσεις την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (κόστος κεφαλαίου, κόστος λειτουργίας και κόστος συντήρησης) και την ελαχιστοποίηση των εκπομπών CO₂. Επειδή όμως κατά τον ενεργειακό σχεδιασμό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα στις παραμέτρους, η παρούσα εργασία παρουσιάζει μία μεθοδολογία σχεδιασμού ΣΔΠΕ υπό αβεβαιότητα, με χρήση συγκεκριμένων τεχνικών όπως το κριτήριο *minimax regret* και η ανάλυση Monte Carlo. Η μεθοδολογία αυτή δίνει ως λύσεις τη διάταξη του δικτύου παροχής θερμότητας, τις τεχνολογίες που θα εγκατασταθούν σε κάθε κτήριο και την αντίστοιχη ισχύ τους, την ωριαία παραγωγή τους και τέλος την ανταλλαγή ηλεκτρισμού μεταξύ των κτηρίων και του εθνικού συστήματος ηλεκτρισμού (ή του μικροδικτύου αν επιλεγεί). Οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται σε μια μελέτη περίπτωσης και γίνεται σύγκριση μεταξύ των εύρωστων λύσεων που προκύπτουν.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός ενεργειακών συστημάτων που θα παρέχουν ενέργεια με οικονομικό και ταυτόχρονα περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο αποτελεί πρόκληση σε τοπικό, εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο. Στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης υπάρχει ανάγκη να γίνει μια στροφή προς τα βιώσιμα ενεργειακά συστήματα, τις πράσινες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας καθώς και μια ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Μια πιθανή λύση στην αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων είναι η ανάπτυξη των συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας (ΣΔΠΕ – *Distributed Energy Systems*), τα οποία έχουν το συγκριτικό πλεονέκτημα της παραγωγής ενέργειας σε τοπικό επίπεδο, επιτυγχάνοντας έτσι ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας λόγω μεταφοράς, και κατ' επέκταση την εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι η καλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και ο συνδυασμός τους με συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Τα ΣΔΠΕ μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες σε ηλεκτρισμό, θερμότητα και ψύξη, είτε πρόκειται για οικιστικά κτήρια, εμπορικά κτήρια ή βιομηχανικές μονάδες. Επίσης, μπορούν να σχεδιαστούν για να καλύψουν τις ανάγκες ενός κτηρίου ή για συμπλέγματα κτηρίων (π.χ. μια γειτονιά), ή ακόμη και σε επίπεδο πόλης, οπότε μπορούν να αποτελέσουν ένα πρότυπο για τον σχεδιασμό των μελλοντικών ενεργειακών συστημάτων σε αστικό επίπεδο (*urban energy systems*).

Για τον σχεδιασμό ΣΔΠΕ μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πληθώρα από μεθοδολογίες και τεχνικές όπως ο Μαθηματικός Προγραμματισμός (*Mathematical Programming*). Συχνά ο σχεδιασμός ενός ΣΔΠΕ αποτελεί ένα πρόβλημα μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού που βασίζεται στις

τρέχουσες τιμές συγκεκριμένων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα τα ενεργειακά φορτία, οι τιμές των καυσίμων (ηλεκτρισμός, φυσικό αέριο) και τα κλιματικά δεδομένα (ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου). Στην πραγματικότητα τέτοιες τιμές χαρακτηρίζονται από έναν βαθμό αβεβαιότητας, που μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα.

Στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται διάφορες εργασίες για τον σχεδιασμό ενός ΣΔΠΕ με χρήση Μαθηματικού Προγραμματισμού στις οποίες και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα. Πρόσφατα, έχουν αναπτυχθεί και μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό υπό καθεστώς αβεβαιότητας. Συγκεκριμένα, οι Mehleri et al. [1] προτείνουν μια μεθοδολογία για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό ενός ΣΔΠΕ σε τοπικό επίπεδο με την ανάπτυξη μικροδικτύου για ανταλλαγή ηλεκτρισμού. Οι Morvaj et al. [2] ανέπτυξαν ένα μοντέλο βασισμένο στον πολυ-κριτηριακό ΜΑΓΠ για τη βέλτιστη επιλογή και ταυτόχρονη διαστασιολόγηση τεχνολογιών. Οι Karmellos and Manrotas στο [3] ανέπτυξαν δύο μεθοδολογίες για τον βέλτιστο σχεδιασμό ΣΔΠΕ, με σκοπό τη σύγκριση των μεθόδων σχεδιασμού και την εφαρμογή τους σε μελέτη περίπτωσης στην Αθήνα. Όσον αφορά το σχεδιασμό ΣΔΠΕ υπό συνθήκες αβεβαιότητας, τα τελευταία χρόνια απαντάται ολοένα και περισσότερο στη βιβλιογραφία. Οι Akbari et al. εφάρμοσαν μεθόδους «εύρωστης βελτιστοποίησης» για τις περιπτώσεις ΣΔΠΕ σε ένα νοσοκομείο και σε μια γειτονιά, υποθέτοντας την ύπαρξη αβεβαιότητας στα ενεργειακά φορτία και στις τιμές ενέργειας [4,5]. Οι Manromatidis et al. ανέπτυξαν διάφορες μεθοδολογίες για την αξιολόγηση των αβέβαιων παραμέτρων, εφαρμόζοντας διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης [6,7].

Η παρούσα εργασία εφαρμόζει πολυ-κριτηριακό και μονο-κριτηριακό ΜΑΓΠ για τον σχεδιασμό ενός ΣΔΠΕ με έμφαση στην ευστάθεια των λύσεων χρησιμοποιώντας τεχνικές που ανήκουν στην κατηγορία της εύρωστης βελτιστοποίησης και της στοχαστικής βελτιστοποίησης. Ειδικότερα, και για λόγους σύγκρισης, εξετάζονται τρεις τεχνικές: (α) κριτήριο minimax regret (MMR), (β) minimax expected regret, και (γ) Ανάλυση Monte Carlo. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι υπάρχει αβεβαιότητα σε οικονομικές παραμέτρους όπως το επιτόκιο αναγωγής και οι τιμές ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου, στα ενεργειακά φορτία (ηλεκτρισμού, θερμότητας, και ψύξης) αλλά και σε κλιματικές παραμέτρους όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για τον σχεδιασμό ενός ΣΔΠΕ αρχικά χρησιμοποιείται ένα μοντέλο πολυ-κριτηριακού ΜΑΓΠ, όπως αναπτύχθηκε στο [3], με αντικειμενικές συναρτήσεις την ελαχιστοποίηση του συνολικού ετήσιου κόστους (ΣΕΚ - κόστος κεφαλαίου, κόστος λειτουργίας και κόστος συντήρησης) και την ελαχιστοποίηση των εκπομπών CO₂:

$$f_1 : C^T = C^C + C^O + C^M \quad (1)$$

$$f_2 : CARBON^T = CARBON^F + CARBON^E \quad (2)$$

Οι υποψήφιες τεχνολογίες είναι: (α) μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, (β) αντλίες θερμότητας, (γ) μονάδες ψύξης με απορρόφηση, (δ) λέβητες, (ε) ηλιακοί συλλέκτες, (στ) φωτοβολταϊκά, (ζ) ανεμογεννήτριες, (η) μονάδες αποθήκευσης θερμότητας, (θ) μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρισμού, (ι) δίκτυο διανομής θερμότητας και (κ) μικροδίκτυο. Τα αποτελέσματα δίνουν ως λύσεις τις τεχνολογίες που επιλέγονται να εγκατασταθούν σε κάθε κτήριο και την αντίστοιχη ισχύ τους, τη διάταξη του δικτύου διανομής θερμότητας (αν σχηματιστεί), το επιχειρησιακό προφίλ των τεχνολογιών, και την ανταλλαγή ηλεκτρισμού διαμέσου του μικροδικτύου καθώς και μεταξύ των κτηρίων και του εθνικού δικτύου ηλεκτρισμού. Έπειτα ο/η αποφασίζων θέτει ένα ανώτατο όριο για τις εκπομπές CO₂ σύμφωνα με τις προτιμήσεις του/της και το πρόβλημα μπορεί να μετατραπεί σε μονοκριτηριακό με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό ετήσιο κόστος και περιορισμό τις εκπομπές CO₂ ως με το αντίστοιχο άνω όριο.

Αναφορικά με την εφαρμογή του κριτηρίου MMR, γίνεται η παραδοχή ότι αβεβαιότητα υπάρχει μόνο στις οικονομικές παραμέτρους, εξετάζοντας πέντε σενάρια:

- Σενάριο R1: Ντετερμινιστικό
- Σενάριο R2: Υψηλές τιμές ενέργειας και υψηλό επιτόκιο αναγωγής
- Σενάριο R3: Υψηλές τιμές ενέργειας και χαμηλό επιτόκιο αναγωγής
- Σενάριο R4: Χαμηλές τιμές ενέργειας και υψηλό επιτόκιο αναγωγής
- Σενάριο R5: Χαμηλές τιμές ενέργειας και χαμηλό επιτόκιο αναγωγής

Το κριτήριο MMR υπολογίζεται σύμφωνα με τους Kouvelis and Yu [8]:

$$\begin{aligned} z_{MMR} &= \min [y] \\ &\text{s.t.} \\ f^s &\leq (1+y) \cdot z^s, s \in S \\ A^s x &\leq b^s \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Εναλλακτικά, σε περίπτωση που οι πιθανότητες να συμβεί κάποιο σενάριο (a_s) είναι γνωστές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κριτήριο minimax expected regret (MER) το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} z_{MER} &= \min \left[\sum_s a_s R_s \right] \\ &\text{s.t.} \\ f^s &\leq (1+R_s) \cdot z^s, s \in S \\ A^s x &\leq b^s \\ \sum_s a_s &= 1 \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Η τρίτη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον βέλτιστο σχεδιασμό υπό συνθήκες αβεβαιότητας, είναι η ανάλυση Monte Carlo, η οποία ανήκει στην κατηγορία της στοχαστικής βελτιστοποίησης. Για την περίπτωση αυτή κατασκευάζονται δυο σενάρια:

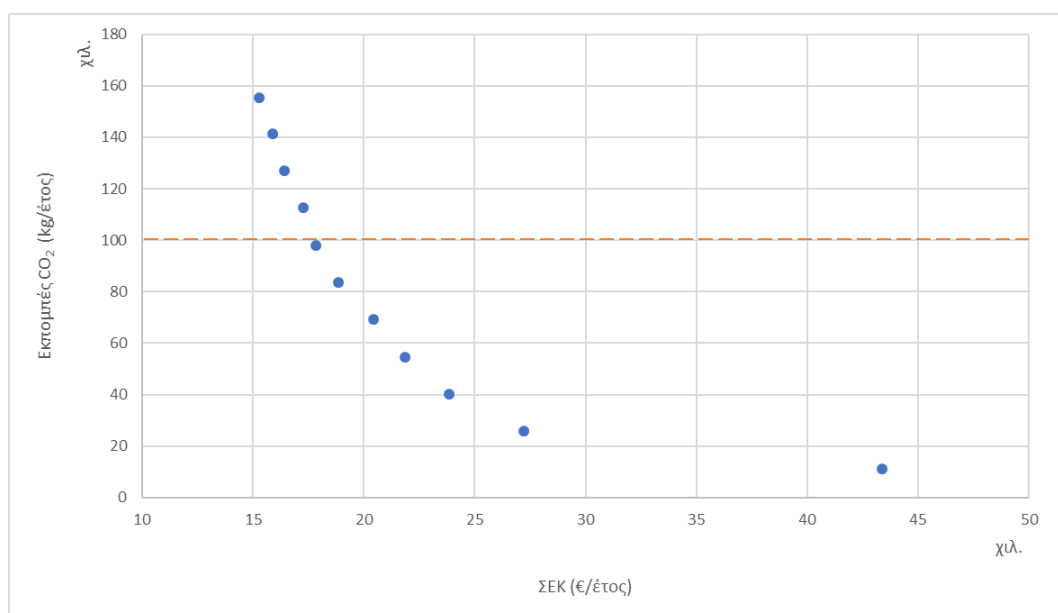
- Σενάριο MC1: Αβεβαιότητα στις οικονομικές παραμέτρους (τιμές ενέργειας και επιτόκιο αναγωγής)
- Σενάριο MC2: Αβεβαιότητα σε όλες τις παραμέτρους (τιμές ενέργειας, επιτόκιο αναγωγής, ενεργειακά φορτία, ηλιακή ακτινοβολία και ταχύτητα ανέμου).

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η μεθοδολογία η οποία προτείνεται, έχει εφαρμοστεί σε μια μελέτη περίπτωσης για έξι κτήρια μιας γειτονιάς στην Αττική εκ των οποίων τα κτήρια i1 – i4 αποτελούν κατοικίες, το κτήριο i5 είναι ένα μικρό εμπορικό κτήριο ενώ το κτήριο i6 αντιστοιχεί σε σχολείο. Τα δεδομένα που αφορούν τις τεχνολογίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Ως πρώτο βήμα εφαρμόζεται ο πολυ-κριτηριακός ΜΑΓΠ για το ντετερμινιστικό πρόβλημα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο AUGMECON2 [9], και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Η πορτοκαλί γραμμή αντικατοπτρίζει το ανώτατο όριο που θέτει ο αποφασίζων για τις εκπομπές CO₂, και ανέρχεται στα 100.000 kg/έτος.

Πίνακας 1. Τεχνολογικά χαρακτηριστικά υποψήφιων τεχνολογιών

Τεχνολογία	Όρια	Απόδοση
ΣΗΘ	5 – 50 kW	$n_{el}=0.25$ $n_{th}=0.50$
Αντλία Θερμότητας	5 – 50 kW	$COP^h=3.5$ $COP^c=3.0$
Ψύκτης απορρόφησης	5 – 50 kW	0.87
Λέβητας	5 – 50 kW	0.9
Ανεμογεννήτριες	6 kW 10 kW	-
Φωτοβολταϊκά	≤ 10 kW	0.16
Ηλιακοί συλλέκτες	-	0.6
Μονάδα αποθήκευσης θερμότητας	≤ 100 kWh	-
Μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρισμού	≤ 100 kWh	0.9 (in) 0.85 (out)

**Σχήμα 1.** Διάγραμμα μετώπου Pareto του ντετερμινιστικού προβλήματος

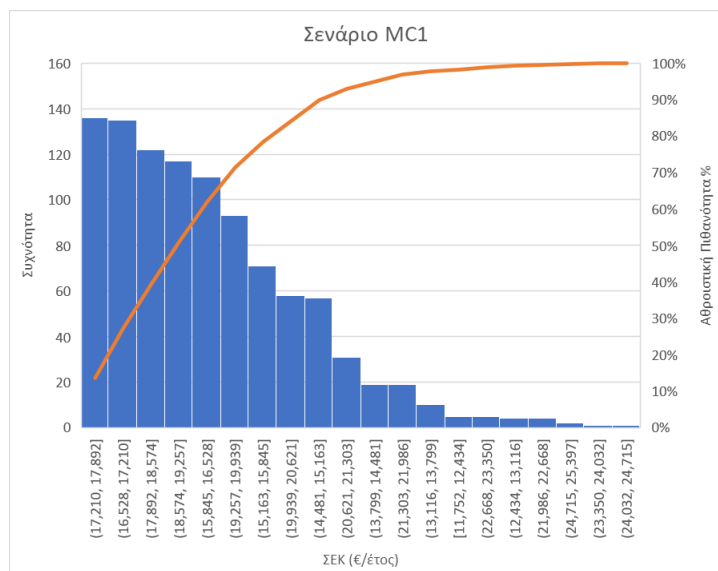
Για την εφαρμογή του MMR υπολογίζεται αρχικά το συνολικό ετήσιο κόστος για κάθε σενάριο R1-R5, έπειτα εφαρμόζεται η εξίσωση (3) και το MMR υπολογίζεται ίσο με 0,02. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακας 2. Αυτή είναι μια χαμηλή τιμή που δείχνει ότι η αβεβαιότητα στις οικονομικές παραμέτρους δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά παρατηρούνται αλλαγές τόσο στη διάταξη του συστήματος όσο και στο προφίλ λειτουργίας των τεχνολογιών που εγκαθίστανται.

Στην περίπτωση που γίνεται εφαρμογή του MER, κάνοντας την υπόθεση ότι η πιθανότητα για το Σενάριο R1 είναι 50%, για το R2 20% και για τα Σενάρια R3-R5 10% αντίστοιχα, τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται αρκετά. Το MER υπολογίζεται να είναι ίσο με 0,002, τιμή κατά πολύ μικρότερη από εκείνη στο κλασικό MMR, με συνέπεια αντίστοιχες διαφορές στη διάταξη και τη λειτουργία των τεχνολογιών.

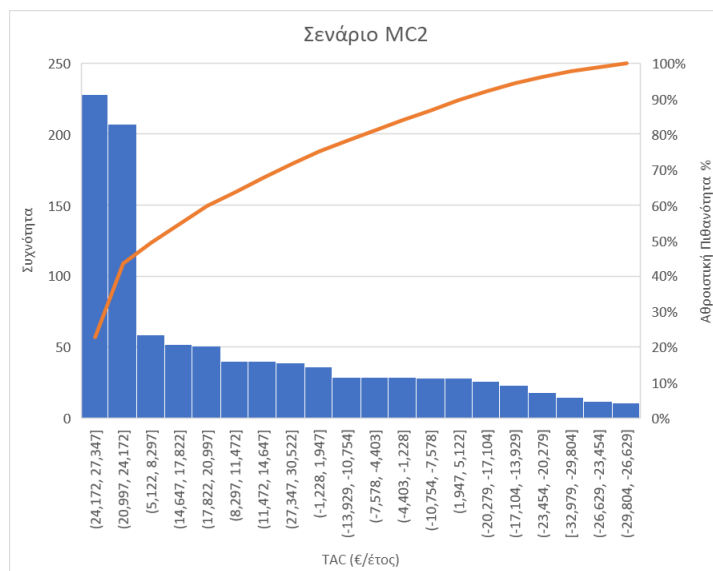
Πίνακας 2. Αποτελέσματα συνολικού ετήσιου κόστους για κάθε σενάριο *s* και MMR

Σενάριο	Τιμές ενέργειας	Επιτόκιο Αναγωγής	ΣΕΚ _s (€/έτος)	ΣΕΚ _s (€/έτος) - MMR
R1	Ντετ.	Ντετ.	17,734	17,761
R2	Υψηλές	Υψηλό	24,322	24,378
R3	Υψηλές	Χαμηλό	14,608	14,702
R4	Χαμηλές	Υψηλό	20,846	21,215
R5	Χαμηλές	Χαμηλό	11,337	11,538

Τέλος, για τη μέθοδο Monte Carlo, γίνονται οι εξής υποθέσεις: (α) η τιμή του ηλεκτρισμού ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή, (β) η τιμή του φυσικού αερίου τριγωνική κατανομή, (γ) το επιτόκιο αναγωγής, τα ενεργειακά φορτία και η ακτινοβολία ακολουθούν κανονική κατανομή και (δ) η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί την κατανομή Weibull. Τα αποτελέσματα των δύο σεναρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Στο σενάριο MC2 παρατηρείται μεγαλύτερο εύρος για το συνολικό ετήσιο κόστος και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να είναι μεγαλύτερο από ότι στο MC1, λόγω της αβεβαιότητας σε όλες τις παραμέτρους και ειδικότερα στην τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό οδηγεί σε πολύ αρνητικές ή υψηλές τιμές λόγω της μεταβολής του κόστους λειτουργίας κυρίως από την αγορά/πώληση ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, χρήσιμα αποτελέσματα δίνονται σχετικά με την πιθανότητα να εγκατασταθεί κάποια τεχνολογία σε κάποιο κτήριο.



(α)



(β)

Σχήμα 2. Αποτελέσματα της ανάλυσης Monte Carlo για: (α) Σενάριο MC1 και (β) Σενάριο MC2

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει και συγκρίνει τρεις τεχνικές για τον σχεδιασμό ΣΔΠΕ υπό συνθήκες αβεβαιότητας, με σκοπό τον εντοπισμό των εύρωστων λύσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εκτίμηση αβεβαιότητας μόνο σε οικονομικές παραμέτρους δεν είναι ικανοποιητική. Αντίθετα, όταν ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα σε όλες τις παραμέτρους (τιμές ενέργειας, επιτόκιο αναγωγής, ενεργειακά φορτία, ηλιακή ακτινοβολία και ταχύτητα ανέμου) τότε το συνολικό ετήσιο κόστος αυξάνεται σημαντικά. Παράλληλα, κάθε τεχνική δίνει λύσεις αναφορικά με τη διάταξη του συστήματος και το επιχειρησιακό προφίλ των τεχνολογιών που διαφέρουν. Επίσης, αλλαγές παρατηρούνται και στον σχεδιασμό του δικτύου μεταφοράς θερμότητας. Η χρήση κάθε τεχνικής προσφέρει εύρωστες λύσεις και η εργασία καταλήγει στο βασικό συμπέρασμα, ότι είναι αναγκαίο να γίνεται εκτίμηση της αβεβαιότητας κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενός ΣΔΠΕ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο πρώτος συγγραφέας θέλει να ευχαριστήσει το ΙΚΥ για την υποτροφία που έλαβε για τη διδακτορική του διατριβή, η οποία χρηματοδοτήθηκε από την Πράξη «Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών για μεταπτυχιακές σπουδές δεύτερου κύκλου σπουδών» από πόρους του ΕΠ «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», 2014-2020 με τη συγχρηματοδότηση του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου (Ε.Κ.Τ.) και του Ελληνικού Δημοσίου»,



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Mehleri ED, Sarimveis H, Markatos NC, Papageorgiou LG. Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector. *Renew Energy* 2013;51:331–42. doi:10.1016/j.renene.2012.09.009.
- [2] Morvaj B, Evins R, Carmeliet J. Optimising urban energy systems: Simultaneous system sizing, operation and district heating network layout. *Energy* 2016;116:619–36. doi:10.1016/j.energy.2016.09.139.
- [3] Karmellos M, Mavrotas G. Multi-objective optimization and comparison framework for the design of Distributed Energy Systems. *Energy Convers Manag* 2019;180:473–95. doi:10.1016/j.enconman.2018.10.083.
- [4] Akbari K, Nasiri MM, Jolai F, Ghaderi SF. Optimal investment and unit sizing of distributed energy systems under uncertainty: A robust optimization approach. *Energy Build* 2014;85:275–86. doi:10.1016/j.enbuild.2014.09.009.
- [5] Akbari K, Jolai F, Ghaderi SF. Optimal design of distributed energy system in a neighborhood under uncertainty. *Energy* 2016;116:567–82. doi:10.1016/j.energy.2016.09.083.
- [6] Mavromatidis G, Orehounig K, Carmeliet J. Comparison of alternative decision-making criteria in a two-stage stochastic program for the design of distributed energy systems under uncertainty. *Energy* 2018;156:709–24. doi:10.1016/J.ENERGY.2018.05.081.
- [7] Mavromatidis G, Orehounig K, Carmeliet J. Design of distributed energy systems under uncertainty: A two-stage stochastic programming approach. *Appl Energy* 2018;222:932–50. doi:10.1016/j.apenergy.2018.04.019.
- [8] Kouvelis P, Yu G. *Robust Discrete Optimization and Its Applications*. vol. 14. Boston, MA: Springer US; 1997. doi:10.1007/978-1-4757-2620-6.
- [9] Mavrotas G, Florios K. An improved version of the augmented e-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Appl Math Comput* 2013;219:9652–69. doi:10.1016/j.amc.2013.03.002.