



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**Πολυκριτήρια βελτιστοποίηση αυτόνομου φωτοβολταϊκού
συστήματος στη Κύπρο (Τεχνικό – Οικονομική ανάλυση)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Βογιατζόγλου Αθηνάς

Επιβλέπων : Ασκούνης Δημήτριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Πολυκριτήρια βελτιστοποίηση αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος στη Κύπρο (Τεχνικό – Οικονομική ανάλυση)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Βογιατζόγλου Αθηνάς

Επιβλέπων : Ασκούνης Δημήτριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Ιουλίου 2024.

.....
Δημήτριος Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ευάγγελος Μαρινάκης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2024

.....
Αθηνά Βογιατζόγλου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αθηνά Βογιατζόγλου, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα αναδεικνύονται ως οι πλέον προηγμένοι, αποδοτικοί και ταχέως αναπτυσσόμενοι μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εκμεταλλευόμενα την ανεξάντλητη ηλιακή ακτινοβολία και αποτελώντας φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις για το σύγχρονο ενεργειακό πρόβλημα. Παρά τα εμφανή πλεονεκτήματα τους, μειονεκτήματα όπως το υψηλό αρχικό κόστος και η χαμηλή ενεργειακή απόδοση πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά την κατασκευή τους. Παράγοντες όπως ο αριθμός και ο τύπος των πάνελ, ο αριθμός και η χωρητικότητα των μπαταριών, τα περιβαλλοντικά κριτήρια και οι συνθήκες της εκάστοτε περιοχής εγκατάστασης, καθώς και οι μαθηματικές σχέσεις και ο τρόπος διασύνδεσης των στοιχείων του συστήματος, πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά πριν από την τελική διαμόρφωση του συστήματος. Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια μέθοδο βελτιστοποίησης αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο, χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης, τον NSGA-II, τον DEMO και τον Particle Swarm Optimization, επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση δύο αντικειμενικών συναρτήσεων: της πιθανότητας απώλειας φορτίου (Loss of Load Probability, LLP) και του κόστους κύκλου ζωής (Life Cycle Cost, LCC). Αυτές οι συναρτήσεις εξαρτώνται από δύο μεταβλητές απόφασης: τον παράλληλο αριθμό φωτοβολταϊκών μονάδων (Npm) και τη συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας (Cbat). Στη συνέχεια, μέσω τριών πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων, της υβριδικής μεθόδου AHP-TOPSIS, της VIKOR και της PROMETHEE, επιλέγονται οι βέλτιστες λύσεις από το μέτωπο Pareto, ενώ ακολουθεί σύγκριση για το ποια από τις μεθόδους παρήγαγε τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς και ποιος τρόπος ελέγχει πιο αποτελεσματικά τα βάρη των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων και κατά συνέπεια το αποτέλεσμα. Το πλαίσιο εφαρμόζεται σε φωτοβολταϊκά συστήματα με χρήση αποθηκευτικής μπαταρίας που πρόκειται να κατασκευαστούν σε τρεις διαφορετικές πόλεις τις Κύπρου, ώστε να καλύψουν τρία διαφορετικά απαιτούμενα ενεργειακά φορτία, των 10, 15 και 20 kWh. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φανερώνουν την άμεση εξάρτηση του οικονομικού αλλά και ενεργειακού υποβάθρου, σε σχέση με το ποσοστό κάλυψης των αναγκών, με την αύξηση του φορτίου, ενώ αναδεικνύουν ως καλύτερο συνδυασμό αλγορίθμου και μεθόδου λήψης αποφάσεων, τον DEMO με την AHP-TOPSIS.

Λέξεις Κλειδιά:

Loss of Load Probability (LLP), Life Cycle Cost (LCC), αριθμός παράλληλων φωτοβολταϊκών μονάδων (Npm), χωρητικότητα συνολικής μπαταρίας συστήματος (Cbat), NSGA-II, DEMO, Particle Swarm Optimization (PSO).

Abstract

Photovoltaic systems are emerging as the most advanced, efficient, and rapidly evolving methods of electricity generation, as they take advantage of the inexhaustible solar radiation and providing environmentally friendly solutions to the modern energy problem. Despite their evident advantages, drawbacks such as high initial costs and low energy efficiency must be seriously considered during their construction. Factors such as the number and type of panels, the number and capacity of batteries, environmental criteria, and the conditions of the specific installation area, as well as the mathematical relationships and the interconnection methods of the system components, must be carefully examined before the final configuration of the system. This paper presents a two-stage optimization method for a standalone photovoltaic system. In the first stage, using three different optimization algorithms, namely NSGA-II, DEMO, and Particle Swarm Optimization, we aim to minimize two objective functions: the Loss of Load Probability (LLP) and the Life Cycle Cost (LCC). These functions depend on two decision variables: the parallel number of photovoltaic modules (N_{pm}) and the total battery capacity (C_{bat}). Subsequently, through three multi-criteria decision-making methods, the hybrid AHP-TOPSIS method, VIKOR, and PROMETHEE, the best solutions from the Pareto front are selected. A comparison follows to determine which method produced the most reliable results and which approach most effectively manages the weights of the two objective functions and consequently the outcome. The framework is applied to photovoltaic systems with storage batteries intended to be installed in three different cities in Cyprus to meet three different required energy loads of 10, 15, and 20 kWh. The results indicate the direct dependence of the economic and energy background on the coverage rate of needs as the load increases, highlighting the combination of the DEMO algorithm and the AHP-TOPSIS decision-making method as the most effective.

Keywords:

Loss of Load Probability (LLP), Life Cycle Cost (LCC), Number of parallel modules (N_{pm}), Capacity of battery bank (C_{bat}), NSGA-II, DEMO, Particle Swarm Optimization (PSO).

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνει επιτυχώς τον κύκλο σπουδών μου στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή αυτής της διπλωματικής εργασίας, κύριο Ασκούνη Δημήτριο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε προκειμένου να διεκπεραιώσω τη μελέτη.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Αλεξάκη Κωνσταντίνο, η στοχευμένη καθοδήγηση και γνώση του οποίου ήταν καθοριστικές για τη πορεία και το αποτέλεσμα αυτής της εργασίας, αφιερώνοντας αρκετό από τον προσωπικό του χρόνο και είμαι παραπάνω από ευγνώμων για τη πολύτιμη βοήθεια του.

Ευχαριστώ τους φίλους μου, εντός και εκτός σχολής, οι οποίοι με τον δικό τους τρόπο βοήθησαν στις πιο δύσκολες περιόδους αυτής της πορείας, καθώς και τους ανθρώπους που όλα αυτά τα χρόνια ήταν δίπλα μου και με στήριζαν.

Η διπλωματική εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου, την οποία ευχαριστώ για την ηθική συμπαράσταση, που είναι στο πλευρό μου και με στηρίζει θυσιάζοντας πολλά πράγματα ώστε να επιτύχω τους στόχους μου.

Αθήνα, Ιούνιος 2024

Αθηνά Βογιατζόγλου

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	14
1.1	Αντικείμενο Εργασίας	14
1.2	Διατύπωση Προβλήματος.....	15
1.3	Οργάνωση κειμένου	16
2	Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	18
2.1	Ενέργεια.....	18
2.1.1.	<i>Μη Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας</i>	<i>18</i>
2.1.2.	<i>Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας</i>	<i>20</i>
2.2	Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία.....	23
2.2.1.	Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	23
2.2.2.	Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	23
2.2.3.	Φωτοβολταϊκό στοιχείο	24
2.2.4.	Φωτοβολταϊκή μονάδα / πάνελ	25
2.2.5.	Φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array)	26
3	Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης	27
3.1	Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	27
3.2	Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων σε Πολυκριτηριακά Προβλήματα.....	29
3.3	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)	29
3.4	Particle Swarm Optimization (PSO)	31
3.5	Differential Evolution for Multi-Objective Optimization (DEMO).....	31
3.6	Μέτωπο Παρέτο (Pareto Front)	32
4	Πολυκριτηριακές Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων.....	33
4.1	Εισαγωγή	33
4.2	AHP-TOPSIS.....	34
4.2.1.	<i>Εισαγωγή</i>	<i>34</i>
4.2.2.	<i>AHP</i>	<i>35</i>
4.2.3.	<i>TOPSIS.....</i>	<i>35</i>

4.3	VIKOR	37
4.4	PROMETHEE.....	40
5	Μοντελοποίηση Προβλήματος.....	42
5.1	Τα στοιχεία του δικτύου	42
5.1.1.	Φωτοβολταϊκό πάνελ.....	42
5.1.2.	Μπαταρίες	43
5.1.3.	Μετατροπείς (Inverters)	45
5.1.4.	Ρυθμιστής φόρτισης (Charge Controller).....	46
5.2	Το μαθηματικό μοντέλο	47
5.2.1.	Μεταβλητές απόφασης του προβλήματος.....	47
5.2.2.	Αντικειμενικές συναρτήσεις.....	48
5.3	Σχετική Έρευνα.....	51
6	Δεδομένα	53
6.1	Εισαγωγή	53
6.2	Δεδομένα εισόδου	53
6.2.1.	Θερμοκρασία	53
6.2.2.	Ηλιακή ακτινοβολία	55
6.2.3.	Φορτίο	55
7	Αποτελέσματα.....	57
7.1	Εισαγωγή	57
7.2	Μετρήσεις Αλγορίθμων.....	58
7.3	Συμπεράσματα αλγορίθμων.....	65
7.4	Μετρήσεις Πολυκριτηριακών Μεθόδων	67
7.4.1.	Αποτελέσματα Πολυκριτηριακών μεθόδων	67
7.4.2.	Συμπεράσματα Πολυκριτηριακών μεθόδων	88
7.5	Συμπεράσματα	96
8	Επίλογος και Μελλοντικές Προσεγγίσεις	100
8.1	Γενικά Συμπεράσματα.....	100
8.2	Περιορισμοί	102
8.3	Μελλοντικές Προσεγγίσεις και Βελτιώσεις.....	103

Βιβλιογραφία.....	105
-------------------	-----

1

Εισαγωγή

1.1 *Αντικείμενο Εργασίας*

Ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα που απασχολούν την παγκόσμια κοινότητα είναι η συνεχής αναζήτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ως απόρροια της τεράστιας βιομηχανικής και αστικής ανάπτυξης, σε συνδυασμό με τα υπάρχοντα περιβαλλοντικά προβλήματα και των φαινομένων της κλιματικής αλλαγής. Οι νέες παγκόσμιες συνθήκες καθιστούν επιτακτική την ανάγκη αξιοποίησης μορφών ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η αιολική, οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον και έχουν αποδειχθεί κομβικοί παράγοντες ακόμα και για την οικονομία ολόκληρων χωρών. Η διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς, που έως πολύ πρόσφατα προερχόταν από ενέργεια παραγόμενη από συμβατικές μονάδες παραγωγής ορυκτών καυσίμων, είχε καθορισμένες τιμές που ορίζονταν από την κατανάλωση του φορτίου. Έτσι, αφού οι πόροι αυτοί εξαντλούνται, ενώ παράλληλα οι επιδράσεις αυτών στο περιβάλλον είναι αρνητικές, η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θεωρείται πλέον απαραίτητη για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος αξιοποίησης της ανεξάντλητης ηλιακής ενέργειας, ακολουθούμενη από τις ανεμογεννήτριες, οι οποίες εκμεταλλεύονται την αιολική ενέργεια, και τα υδροηλεκτρικά συστήματα. Η κατάλληλη επιλογή τοποθεσίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων για την μακροπρόθεσμη ανάπτυξη και σχεδιασμό ένταξης τους στο δίκτυο, αποτελεί ένα από τα βασικότερα μελήματα κατά την διαμόρφωση τους [1], [2]. Ωστόσο, για να υπάρχει η μέγιστη απόδοση τους, απαιτούνται συσκευές αποθήκευσης ώστε να καταστεί πιο αξιόπιστη η χρήση τους σε ορισμένες εφαρμογές. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να αποθηκεύουν το περιττό

παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα και να το απελευθερώνουν όταν η προσφορά ενέργειας είναι ανεπαρκής, ώστε να διασφαλίζεται η σταθερή έξοδος της ισχύος.

Χωρίς κάποιο σύστημα υποστήριξης ή αποθήκευσης, η ηλεκτροπαραγωγή με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, είναι πιθανό να αφήσει, πέρα από οικίες και αυτόνομες εγκαταστάσεις, ακόμα και μία ολόκληρη χώρα εκτεθειμένη σε σημαντικούς κινδύνους, όπως η διαρκής απώλεια παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, οιπτώσεις τάσης και η αδυναμία κάλυψης ενεργειακών αναγκών. Η εξάρτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποκλειστικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες μίας περιοχής, καθιστά έτσι απαραίτητη την χρήση εξαρτημάτων, που θα είναι σε θέση να αποθηκεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία, σε περιπτώσεις, περισσεύει.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, στόχος είναι η δημιουργία και η βελτιστοποίηση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με χρήση αποθηκευτικής μπαταρίας, σε τεχνικό και οικονομικό επίπεδο, ώστε να είναι σε θέση να καλύψει τρία διαφορετικά ενεργειακά φορτία σε καθημερινή βάση. Η μελέτη πραγματοποιείται σε τρεις πόλεις της Κύπρου, τη Λευκωσία, τη Λάρνακα και τη Λεμεσό, με τη βοήθεια Αλγορίθμων βελτιστοποίησης και Πολυκριτηριακών Μεθόδων Λήψης Αποφάσεων, για να προκύψουν τελικά οι βέλτιστες λύσεις ως προς τις καθορισμένες αντικειμενικές συναρτήσεις και τις μεταβλητές απόφασης και να πραγματοποιηθεί η κατασκευή του συστήματος υπό βέλτιστες συνθήκες.

1.2 Διατύπωση Προβλήματος

Για τη δημιουργία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι απαραίτητη η ακριβής διασταλότητα όλων των εξαρτημάτων του, καθώς και των αποθηκευτικών μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν. Για τον σκοπό αυτό, είναι σημαντικό να οριστούν παράμετροι, ενεργειακού ή οικονομικού υποβάθρου, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν βασικά στοιχεία των συστημάτων και θα αποτελέσουν τη βάση για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης και κατασκευής του φωτοβολταϊκού συστήματος. Παραδείγματα αυτών των παραμέτρων, είναι η πιθανότητα απώλειας φορτίου (Loss of Load Probability, LLP), η πιθανότητα απώλειας παροχής ενέργειας (Loss of Power Supply Probability, LPSP), ο ισοδύναμος συντελεστής απώλειας (Equivalent Loss Factor, ELF), η αναμενόμενη απώλεια φορτίου (Loss of Load Expected, LOLE), το επίπεδο κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy, LCOE), οι εκπομπές κύκλου ζωής (Life Cycle Emissions, LCE), το κόστος κύκλου ζωής (Life Cycle Cost, LCC), η καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value, NPV), το ετήσιο κόστος συστήματος (Annualized Cost of System, ACS) και πολλοί ακόμα.

Στη παρούσα εργασία, δίνεται έμφαση στις παραμέτρους LLP και LCC, με στόχο την ελαχιστοποίησή τους. Με τη χρήση μεταβλητών απόφασης, όπως ο αριθμός των παράλληλων φωτοβολταϊκών μονάδων (Number of parallel pv modules, N_{pm}) και η χωρητικότητα της συνολική μπαταρίας του συστήματος (Capacity of battery bank, C_{bat}), καθορίζεται ο τρόπος υπολογισμού των κριτηρίων, ή αντικειμενικών συναρτήσεων, LLP και LCC και τελικά προσδιορίζεται η βέλτιστη λύση ανάμεσα τους.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι και αλγόριθμοι που μπορούν να εφαρμοστούν για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων. Σε αυτή την εργασία, προτείνονται και εφαρμόζονται τρεις από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πολυκριτηριακών προβλημάτων, NSGA-II, DEMO και Particle Swarm Optimization (PSO), καθώς και τρεις μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων για την επιλογή των καλύτερων λύσεων που θα προκύψουν από τους αλγορίθμους. Αυτές είναι η υβριδική μέθοδος AHP-TOPSIS, η VIKOR και η PROMETHEE. Έτσι, προσδιορίζεται η βέλτιστη τιμή των κριτηρίων LLP και LCC, καθώς και ο αριθμός των N_{pm} και C_{bat} που αντιστοιχεί σε αυτές, επιτρέποντας τελικά την κατασκευή του φωτοβολταϊκού συστήματος.

1.3 Οργάνωση κειμένου

Στο 1^ο Κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μία γενική εισαγωγή του προσανατολισμού της μελέτης. Αναφέρονται κάποια βασικά προβλήματα τα οποία έχουν οδηγήσει στην εύρεση και αξιοποίηση πηγών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δίνεται έμφαση στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία και γίνεται μία σύντομη διατύπωση του αντικειμένου της εργασίας και των στόχων της.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικοί ορισμοί σημαντικών εννοιών ενέργειας που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια της εργασίας, καθώς και των εξαρτημάτων ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, ώστε να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας τους για τη συνέχεια.

Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στους Αλγορίθμους Βελτιστοποίησης και το πως λειτουργούν. Παρουσιάζονται τα διάφορα είδη αυτών, με έμφαση στην εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων στα πολυκριτηριακά προβλήματα, ενώ περιγράφονται πιο αναλυτικά οι αλγόριθμοι που θα εφαρμοστούν στη παρούσα εργασία, ο NSGA-II, DEMO και Particle Swarm Optimization (PSO) και τα βήματα που ο καθένας ακολουθεί για τη παραγωγή αποτελεσμάτων.

Το 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζει της Πολυκριτηριακές Μεθόδους Λήψης Αποφάσεων, το ρόλο τους στα προβλήματα βελτιστοποίησης και ορίζει τις μεθόδους που θα ακολουθήσει η εργασία για τη παραγωγή των βέλτιστων τελικών λύσεων. Αυτές είναι η υβριδική μέθοδος AHP-TOPSIS, η VIKOR και η PROMETHEE.

Στο 5^ο Κεφάλαιο γίνεται η μοντελοποίηση του προβλήματος κατασκευής και βελτιστοποίησης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Παρουσιάζονται οι μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν τα στοιχεία που αποτελούν το σύστημα, γίνεται ορισμός και περιγραφή του τρόπου υπολογισμού των αντικειμενικών συναρτήσεων του προβλήματος, ενώ ακόμα προσδιορίζονται οι μεταβλητές απόφασης και η οριοθέτηση των πιθανών τιμών τους.

Στο 6^ο Κεφάλαιο αναλύονται τα δεδομένα εισόδου του συστήματος. Συγκεκριμένα παρέχονται πληροφορίες για τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία και τις ενέργειες φορτίου, που είναι και οι βασικές μεταβλητές του συστήματος.

Το 7^ο Κεφάλαιο αποτελεί και το μεγαλύτερο κομμάτι της διπλωματικής εργασίας. Επικεντρώνεται στα χαρακτηριστικά των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, στα αποτελέσματα των Αλγορίθμων για όλες τις περιπτώσεις φορτίων και περιοχών, καθώς και στη τελική εξαγωγή βέλτιστων λύσεων από τις Πολυκριτηριακές Μεθόδους. Γίνεται λεπτομερής ανάλυση των αποτελεσμάτων και τελικά προκύπτουν συμπεράσματα για το ποιος συνδυασμός Αλγορίθμου και Μεθόδου παρέχει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Στο 8^ο Κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εκτέλεση όλων των παραπάνω και περιγράφονται πιθανές βελτιώσεις και προσθήκες που θα μπορούσαν να ενταχθούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Τέλος ακολουθεί η βιβλιογραφία της διπλωματικής εργασίας.

2

Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 *Ενέργεια*

2.1.1. Μη Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας

Κάθε φυσικός πόρος ο οποίος μας δίνει ενέργεια μπορεί να χαρακτηριστεί ως φυσική ενέργεια. Οι δύο μορφές ενέργειας που υπάρχει είναι οι ανανεώσιμες και οι μη ανανεώσιμες. Στις μη ανανεώσιμες συγκαταλέγονται εκείνες που αργά ή γρήγορα θα εξαντληθούν, λόγω παροχής τους από εξορύξεις και έλλειψης των αποθεμάτων τους, για παράδειγμα ο γαιάνθρακας, η πυρηνική ενέργεια και το πετρέλαιο.

2.1.1.1. Λιγνίτης (Γαιάνθρακας)

Ο λιγνίτης, γνωστός και ως γαιάνθρακας, είναι πέτρωμα οργανικής προελεύσεως, που έχει ως κύριο στοιχείο του τον άνθρακα σε ποσοστό έως και 30% [3], καθώς και το υδρογόνο και το οξυγόνο[4]. Οι λιγνίτες είναι το αποτέλεσμα μιας ιδιότυπης αποσύνθεσης φυτών, η οποία χαρακτηρίζεται με τον ειδικό όρο "εναθράκωση"[5]. Η διεργασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό των φυτικών υπολειμμάτων σε άνθρακα. Η μετατροπή των φυτών σε τύρφη και η μετάβαση από την τύρφη (αρχικό στάδιο εναθράκωσης) στον ανθρακίτη (τελικό στάδιο εναθράκωσης) είναι συνάρτηση της επίδρασης του χρόνου, της θερμοκρασίας και της πίεσης. Η μετατροπή της φυτικής ύλης σε άνθρακα ξεκίνησε πριν 400 περίπου εκατομμύρια χρόνια και βεβαίως συνεχίζεται μέχρι σήμερα.

Η μεταφορά του λιγνίτη δεν είναι εύκολη και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται από εργοστάσια που είναι κατασκευασμένα πολύ κοντά σε ορυχεία εξόρυξής του. Η δυσκολία

στην μεταφορά του έχει ως αποτέλεσμα, να μην αποτελεί συχνό εμπόρευμα στη παγκόσμια αγορά, αλλά να χρησιμοποιείται τοπικά από την κάθε χώρα εξόρυξης του. Από περιβαλλοντική άποψη, ο λιγνίτης είναι επικίνδυνος για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, καθώς από την καύση του προκαλείται μεγάλη ατμοσφαιρική ρύπανση. Θεωρείται ευρέως το χειρότερης ποιότητας καύσιμο άνθρακα. Ταυτόχρονα, η εξόρυξη του συχνά προκαλεί κοινωνικές συγκρούσεις, καθώς οι τοπικές κοινωνίες των περιοχών, που διαθέτουν κοιτάσματα λιγνίτη, συχνά εναντιώνονται στην διάνοιξη ορυχείων και στην εγκατάσταση εργοστασίων καύσης του [6].

2.1.1.2. Πυρηνική ενέργεια

Πυρηνική ενέργεια ή ατομική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν μετασχηματίζονται ατομικοί πυρήνες. Είναι δηλαδή η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλεισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που τα συνιστούν. Απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων και εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες (όπως συμβαίνει στην καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες[7].

Η πυρηνική ενέργεια έχει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Από άποψη αποτελεσματικότητας, είναι αξεπέραστη. Η ενέργεια που εκλύεται κατά την πυρηνική σχάση 1 g ουρανίου-235, για την πυρηνική σχάση υπολογίζεται σε $9,6 \times 10^7$ kJ. Η ενέργεια που εκλύεται κατά τη χημική αντίδραση καύσης 1 g άνθρακα σε μορφή ανθρακίτη είναι 34,3 kJ, δηλαδή σχεδόν 3 εκατομμύρια φορές μικρότερη[8].

Σήμερα, η πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη παραγωγή φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας. 32 χώρες διαθέτουν συνολικά 422 πυρηνικούς αντιδραστήρες σε λειτουργία παράγοντας το 14% του ηλεκτρισμού του κόσμου[9]. Ωστόσο, η ασφαλής λειτουργία ενός εργοστασίου πυρηνικής ενέργειας αποτελεί μια τεράστια πρόκληση. Μία από τις μεγαλύτερες εκρήξεις σε εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας συνέβη το 1986 στο Τσερνόμπιλ της Ουκρανίας, με βαρύτατες βραχυχρόνιες και μακροχρόνιες συνέπειες, όχι μόνο για την υγεία των ζωντανών οργανισμών κοντά στο εργοστάσιο, αλλά και σε ολόκληρη την Ευρώπη. Από τότε, έχει περιοριστεί σημαντικά η χρήση της για οποιοδήποτε σκοπό[8].

2.1.1.3. Πετρέλαιο

Το πετρέλαιο είναι ένα ορυκτό καύσιμο, με καστανό χρώμα, χαρακτηριστική δυσάρεστη οσμή και αδιάλυτο στο νερό. Αποτελείται από υδρογονάνθρακες (ενώσεις

άνθρακα και υδρογόνου) που βρίσκονται συγκεντρωμένοι σε διάφορα βάθη, κάτω από το έδαφος ή τη θάλασσα. Περιέχει επίσης σε μικρές ποσότητες οξυγόνο, σε μορφή ιδίως ναφθενικών οξέων, άζωτο και θείο που βρίσκεται είτε σε ελεύθερη μορφή, είτε σαν συστατικό οργανικών ενώσεων[10]. Η προέλευση του πετρελαίου δεν είναι εξακριβωμένη, είναι όμως γενικά αποδεκτό ότι το πετρέλαιο δημιουργήθηκε από την αποσύνθεση θαλάσσιων, κυρίως ζώων και φυτών που θάφτηκαν κάτω από διαδοχικές στοιβάδες λάσπης, πριν από 400-500 εκατομμύρια χρόνια[11]. Ανήκει όπως και τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για την αναγέννηση τους τα καθιστά εξαντλητά.

Το πετρέλαιο αποτελεί σημαντική πρώτη ύλη στην βιομηχανία των πετροχημικών, αλλά και την πρώτη ύλη για την παραγωγή πληθώρας χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων. Αποτελεί επίσης την κυριότερη πηγή ενέργειας, από την οποία εξαρτάται το παρόν και το μέλλον της παγκόσμιας οικονομίας[12].

Τα κοιτάσματα πετρελαίου είναι περιορισμένα σε σχέση με τις ανάγκες και δεν κατανέμονται με δημοκρατικό τρόπο στη γη. Λίγες χώρες παράγουν σημαντικές ποσότητες πετρελαίου, ενώ ακόμη λιγότερες έχουν κοιτάσματα που θα διαρκέσουν περισσότερο από 20 χρόνια από τώρα. Τα μεγαλύτερα αποθέματα πετρελαίου βρίσκονται στην Μέση Ανατολή. Εκτιμάται ότι τα παγκόσμια αποθέματα θα διαρκέσουν για περίπου 50 ακόμη χρόνια με τον τρέχοντα ρυθμό κατανάλωσης. Υπολογίζεται παρόλα αυτά ότι με νέες τεχνικές ανακάλυψης νέων αποθεμάτων και με καλύτερη ανάκτηση από τα ήδη υπάρχοντα κοιτάσματα, η διάρκεια αυτή θα μπορούσε να αυξηθεί για άλλα 20-40 χρόνια[12].

2.1.2. *Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας*

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), που συχνά αναφέρονται ως καθαρή ενέργεια, είναι οι μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αυτές δηλαδή που δεν κινδυνεύουν με εξαντάνιση. Προέρχονται από φυσικές πηγές ή διαδικασίες που ανανεώνονται συνεχώς και μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή ασφάλεια και στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Ορισμένα παραδείγματα ανανεώσιμων μορφών ενέργειας είναι η ηλιακή, η αιολική και η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια των κυμάτων, η παλιρροϊκή και η υδραυλική ενέργεια.

2.1.2.1. Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία καθαρή μορφή ενέργειας, καθώς δεν μολύνει τον αέρα, δεν παράγει διοξείδιο του άνθρακα ούτε απελευθερώνει επιβλαβή προϊόντα που μπορεί να προκαλέσουν περιβαλλοντική υποβάθμιση. Το φαινόμενο του ανέμου, προκαλείται από τις διαφορές στη θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα σε συνδυασμό με την περιστροφή της γης και τη γεωγραφία του πλανήτη. Συνεπώς, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και μία μορφή ηλιακής ενέργειας.

Τα αιολικά πάρκα συλλαμβάνουν την ενέργεια της ροής του ανέμου χρησιμοποιώντας στροβίλους και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Υπάρχουν διάφορα είδη συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική, όπως τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αιολική ισχύ, τα οποία μπορούν να τροφοδοτήσουν πολλούς αποδέκτες ταυτόχρονα, ή οι ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας, που χρησιμοποιούνται για τη συμπλήρωση προ υπάρχοντων ενεργειακών αναγκών.

Οι επενδύσεις στις τεχνολογίες που βασίζονται στην αιολική ενέργεια, συμβάλλουν στην αντιμετώπιση των ενεργειακών αναγκών που προκύπτουν καθημερινά. Όπως όλες οι τεχνολογίες, έτσι και αυτή, έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της. Δεδομένου ότι τα αιολικά πάρκα κατασκευάζονται σε αγροτικές περιοχές, η ενέργεια πρέπει να μεταφέρεται μέσω γραμμών μεταφοράς, αυξάνοντας το κόστος. Επιπλέον, αν και οι ανεμογεννήτριες παράγουν ελάχιστη ρύπανση και θόρυβο, αποτελούν κίνδυνο για την άγρια ζωή, όπως τα πτηνά, τα οποία μπορεί να παγιδευτούν ή να χτυπήσουν σε αυτές. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών αυτών, υπερτερούν κατά πολύ των μειονεκτημάτων τους[13].

2.1.2.2. Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα η οποία παγιδεύτηκε κάτω από τον φλοιό της γης κατά τον σχηματισμό της πριν από δισεκατομμύρια χρόνια. Αρκετές φορές, μεγάλες ποσότητες της θερμότητας αυτής διαφεύγει φυσικά και έτσι προκύπτουν περιστατικά όπως εκρήξεις ηφαιστείων ή θερμοπίδακες. Η θερμότητα αυτή, μπορεί να συλληφθεί και να χρησιμοποιηθεί μέσω του ατμού που προέρχεται από το θερμαινόμενο νερό που αντλείται κάτω από την επιφάνεια, που συχνά αναδύεται στην κορυφή, και στη συνέχεια χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, ανάλογα με τη θερμοκρασία της[14].

Η γεωθερμική ενέργεια δεν είναι τόσο συνηθισμένη όσο και οι άλλοι τύποι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά έχει σημαντικό ενεργειακό δυναμικό, και δεδομένου ότι αναπληρώνεται φυσικά, δεν διατρέχει κίνδυνο εξάντλησης. Αποτελεί μία ήπια μορφή

ανανεώσιμης ενέργειας, η οποία λόγω του ελάχιστου, αν όχι μηδενικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος που έχει, μπορεί να συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην ενεργειακή αυτονομία και κατά συνέπεια στην ενεργειακή ασφάλεια ακόμα και μίας ολόκληρης χώρας. Ωστόσο, στα κύρια μειονεκτήματα της, συγκαταλέγεται το γεγονός πως αποτελεί μία άκρως δαπανηρή επένδυση όσον αφορά την κατασκευή της υποδομής και εμφανίζει ευπάθεια σε σεισμούς.

2.1.2.3. Υδραυλική Ενέργεια

Αυτή η μορφή ενέργειας είναι εκείνη που αποταμιεύεται ως δυναμική μέσω μεγάλων ποσοτήτων νερού που, εξαιτίας της δυναμικής της βαρύτητας, πέφτουν από μεγάλο υψόμετρο. Στηρίζεται δηλαδή, στην εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του νερού των υδάτινων ροών, και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση στροβίλων ή ηλεκτρογεννητριών. Η ενέργεια που προκύπτει χρησιμοποιείται είτε αυτούσια επί τόπου (νερόμυλοι) είτε χρησιμοποιείται συμπληρωματικά ως προς άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας. Βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης εναλλακτικής μορφής ενέργειας, είναι πως διαταράσσει τις πλωτές οδούς, αλλάζοντας τα επίπεδα του νερού και τα ρεύματα, ενώ αρκετές φορές η κατασκευή υδραυλικών έργων μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικές καταστροφές, λόγω πλημμυρών που μπορεί να προκληθούν [15].

2.1.2.4. Ηλιακή Ενέργεια

Ο ήλιος αποτελεί μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και ζωής. Η ανάγκη και οι προσπάθειες για την ανάπτυξη εφαρμογών αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας έχουν τις ρίζες τους στα βάθη των αιώνων και συνεχίζονται αδιάκοπα έως και σήμερα, λόγω και των φαινομένων της κλιματικής αλλαγής. Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιεί το φως και τη θερμότητα του ήλιου για να παράγει ανανεώσιμη ή «πράσινη» ισχύ.

Τα συστήματα που έχουν δείξει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είναι τα εξής: τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, τα παθητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία αποτελούν το βασικό μέρος της παρούσας εργασίας.

Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα είναι αυτοτελείς διατάξεις, με βασικό χαρακτηριστικό τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μεταφορά της σε μορφή θερμότητας σε νερό, αέρα ή σε οποιοδήποτε ρευστό. Είναι δυνατό να εξυπηρετούν ένα κτίριο αλλά και να παράγουν αυτοτελών ενέργεια, που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια όπου είναι απαραίτητο ανάλογα με τις απαιτήσεις. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα, συλλέγουν την

ηλιακή ενέργεια μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Μέσω της κατάλληλης αρχιτεκτονικής διάταξης ενός κτιρίου, η ενέργεια αποθηκεύεται και στη συνέχεια μεταφέρεται όπου χρειάζεται. Διακρίνονται σε συστήματα άμεσου κέρδους, έμμεσου κέρδους και απομονωμένου κέρδους, ανάλογα με το τρόπο συλλογής και αποθήκευσης και μετάδοσης της θερμότητας[16].

2.2 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

2.2.1. Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το 1839 ο Becquerel ήταν ο πρώτος που διαπίστωσε πως η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά πλαίσια προκαλεί την κίνηση των ηλεκτρονίων, γεγονός που ονομάζεται φωτοβολταϊκή μετατροπή[17]. Όλα τα φωτοβολταϊκά κατασκευάζονται από διαφορετικούς ημιαγωγούς, με έναν από αυτούς να τοποθετείται πάντα στην κορυφή του συστήματος ώστε να προσπίπτει εκεί η ηλιακή ακτινοβολία.

Έστω ότι υπάρχουν δύο στρώσεις ημιαγωγών τύπου p και n και ο ημιαγωγός τύπου n, είναι εκείνος που εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Μέσω της επαφής p-n τα ηλεκτρόνια τύπου n αποκτούν τη δυνατότητα να κινηθούν προς τον ημιαγωγό τύπου p, με αποτέλεσμα να μπαίνουν τελικά μέσα στη επαφή φωτόνια με την κατάλληλη ενέργεια, τα οποία απορροφώνται από τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους και στη συνέχεια εντάσσονται στη ζώνη αγωγιμότητας. Ως αποτέλεσμα έχουμε τη δημιουργία αντίστοιχου αριθμού οπών στη ζώνη σθένους.

Σκοπός της παραπάνω διαδικασίας είναι να δημιουργηθεί τελικά ηλεκτρική τάση στα άκρα της επαφής p-n. Για να προκύψει αυτό, θα πρέπει τα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών που δημιουργήθηκαν, να βρεθούν στα σημεία που υπερτερούν και οι αντίστοιχοι φορείς. Με αυτό το τρόπο, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο μετατρέπει την ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια και θα συνεχίσει να το κάνει για όσο το φως του ηλίου προσπίπτει σε αυτό[18], [19].

2.2.2. Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Φωτοβολταϊκά Συστήματα, είναι αυτά τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια, ως αποτέλεσμα του φωτοβολταϊκού φαινομένου, το οποίο παρουσιάζεται στα ημιαγωγικά υλικά όταν αυτά εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία. Τα συστήματα αυτά έχουν ως βασικό πλεονέκτημα το γεγονός ότι είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Η αθόρυβη

λειτουργία τους, η υψηλή διάρκεια ζωής, η μηδενική εκπομπή ρύπων στον αέρα και στο έδαφος και η δυνατότητα εγκατάστασης τους σε οροφές κτηρίων και αυτόνομης λειτουργίας τους, αποτελούν επίσης κάποια από τα αμέτρητα πλεονεκτήματά τους.

Στα μειονεκτήματά τους, από την άλλη, συγκαταλέγεται το υψηλό κόστος επένδυσης και η δημιουργία ορισμένων περιβαλλοντικών προβλημάτων, τα οποία σχετίζονται με τη χρήση μεγάλων εκτάσεων γης σε συστήματα υψηλότερα του MW, με άμεσες επιπτώσεις στα οικοσυστήματα. Ακόμη, κατά την δημιουργία και εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, χρησιμοποιούνται κάποια επικίνδυνα και πιθανόν τοξικά υλικά, για την διεργασία έντασης της ενέργειας, διαδικασία οι οποία ενέχει και αυτή επιπτώσεις[20].

Μία κλασική διάταξη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ ή πλαίσια (modules) φωτοβολταϊκών (ή αλλιώς ηλιακών) στοιχείων (cells), συνδεδεμένα με τις κατάλληλες συσκευές και διατάξεις για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή. Η ηλεκτρική ενέργεια η οποία παράγεται από ένα τέτοιο σύστημα, είναι συνεχούς ρεύματος (DC). Με τη δημιουργία και χρήση ειδικών συσκευών, των αναστροφέων (inverters), η έξοδος συνεχούς τάσης μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη τάση – εναλλασσόμενο ρεύμα (AC).

2.2.3. Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (cells) είναι συσκευές οι οποίες παράγουν ηλεκτρισμό απευθείας από το ηλιακό φως. Τα στοιχεία αυτά έχουν την ιδιότητα να συγκεντρώνουν πολύ εύκολα θερμότητα, ενώ αυτό γίνεται ακόμα ευκολότερα, όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι έντονη και δεν υπάρχει άνεμος.

Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται δύο είδη πυριτίου: το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο, όπου το τελευταίο διακρίνεται σε μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό και η λειτουργία τους βασίζεται εξ' ολοκλήρου στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο[21]. Για να ενσωματωθεί ένα τέτοιο στοιχείο σε ένα οποιοδήποτε κύκλωμα, χρειάζονται μεταλλικές επαφές εκατέρωθεν του στοιχείου, σε κάθε πλευρά δηλαδή της ένωσης. Οι επαφές αυτές λειτουργούν ως δρόμος, στη συνέχεια, για τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, που θα παραχθεί από την πρόσκρουση των φωτονίων στην επάνω επιφάνεια του ηλιακού στοιχείου. Στη συνέχεια, η ηλεκτρική ενέργεια που θα παραχθεί, μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί άμεσα είτε να αποθηκευτεί σε μπαταρίες.

Ο βαθμός απόδοσης ηλιακών στοιχείων εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια σε αυτό. Υπολογίζεται ως το πηλίκο

της ισχύς εξόδου και της συνολικής ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο πάνελ. Μία τυπική τιμή του εκτιμάται από 13% έως και 19%, ο οποίο παραμένει αρκετά μικρός σε σχέση με την απόδοση ολόκληρου του συστήματος[22].

2.2.4. Φωτοβολταϊκή μονάδα / πάνελ

Λόγω της χαμηλής τάσης εξόδου των ηλιακών στοιχείων (περίπου 0.6-0.7 V), εφαρμόζεται κατάλληλη συνδεσμολογία τους σε σειρά και τοποθέτηση πολλών σε αριθμό στοιχείων, έτσι ώστε αυτή η χαμηλή τάση εξόδου να μπορέσει να αξιοποιηθεί σωστά. Μία τέτοια διάταξη δημιουργεί μία ενιαία μονάδα (module), υπό μορφή φωτοβολταϊκού πάνελ. Τυπικές τιμές ονομαστικής τάσης εξόδου πάνελ είναι 12, 24 και 48 V, με ισχύ εξόδου που ποικίλει κατά περίπτωση[23].

Για να έχουμε τη μέγιστη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας, τοποθετείται γυαλί πάνω από το πάνελ, με στόχο να δώσει μηχανική αντοχή στα φωτοβολταϊκά στοιχεία και να περιοριστούν οι αντανakλάσεις. Το γυαλί που χρησιμοποιείται είναι υψηλής διαπερατότητας του φωτός και καθαρότητας, ενώ η τοποθέτηση γίνεται με χρήση διαφανούς υλικού προσκόλλησης. Ωστόσο, παρόλη την επιθυμία για μέγιστη δυνατή απορρόφηση ακτινοβολίας, τελικά από όλη τη ποσότητα ενέργειας που προσπέσει πάνω στο πάνελ, ένα μόνο μικρό ποσοστό της θα απορροφηθεί και θα μετατραπεί τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια. Το ποσοστό που χάνεται, συνήθως είναι φωτόνια με υπερβολικά υψηλή ή χαμηλή ενέργεια ή λόγω επανένωσης φορέων (ηλεκτρόνια ενώνονται ξανά με οπές, αντί να δημιουργήσουν ρεύμα).

Για να μπορεί να γίνεται σύγκριση μεταξύ διαφορετικών πάνελ και κατασκευαστών, ορίζονται οι κανονικές συνθήκες ελέγχου, γνωστές ως πρότυπο STC, στις οποίες τα φωτοβολταϊκά εκτίθενται και διαστασιολογούνται με βάση την ισχύ εξόδου τους. Οι συνθήκες αυτές είναι:

1. Ακτινοβολία $1\text{kW} \cdot \text{m}^2$
2. Θερμοκρασία ηλιακού στοιχείου 25°C
3. Φασματική κατανομή AM 1,5 (A.M.: συντελεστής αέριας μάζας)

Με βάση αυτές, καθορίζεται η μέγιστη ισχύς εξόδου του κάθε πάνελ και αποτελεί πρακτικά τη μέγιστη ισχύ που είναι σε θέση να δώσει. Έτσι, με κριτήριο αυτή τη τιμή της ισχύος επιλέγεται και το επιθυμητό πάνελ για κάθε περίπτωση κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Ωστόσο, πιθανές υψηλές θερμοκρασίες είναι υπεύθυνες για τη μείωση της παραγωγής, με αποτέλεσμα τα μην φτάνουν οι πραγματικές τις ονομαστικές τιμές

εξόδου ισχύος που αναγράφονται. Η θερμοκρασία δηλαδή των φωτοβολταϊκών επιδρά πολύ έντονα στην απόδοση του[24].

2.2.5. Φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array)

Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία (ή ηλιακή συστοιχία) είναι μια συνδεδεμένη συλλογή ηλιακών πάνελ. Τα στοιχεία σε μια φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορούν να συνδεθούν είτε σε σειρά είτε παράλληλα, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση και ρεύμα εξόδου. Οι περισσότερες φωτοβολταϊκές συστοιχίες χρησιμοποιούν έναν μετατροπέα για να μετατρέψουν τη συνεχόμενη τάση που παράγεται από τα στοιχεία σε εναλλασσόμενη τάση, η οποία μπορεί να τροφοδοτήσει φώτα, κινητήρες και άλλες συσκευές που τη χρειάζονται για να λειτουργήσουν.

3

Αλγόριθμοι

Βελτιστοποίησης

3.1 *Γενετικοί Αλγόριθμοι*

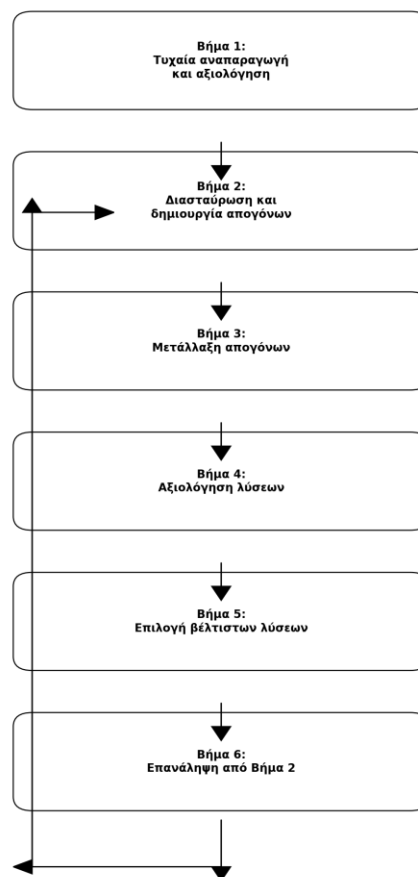
Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Γ.Α.) εμπνεύστηκαν από τη θεωρία της εξέλιξης που εξηγεί την προέλευση των ειδών. Στη φύση, τα ισχυρά είδη έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να περάσουν τα γονίδια τους στις μελλοντικές γενιές μέσω την αναπαραγωγής, ενώ τα πιο αδύναμα είδη, έρχονται αντιμέτωπα με το κίνδυνο της εξαφάνισης. Μακροπρόθεσμα, τα είδη τα οποία φέρουν το σωστό συνδυασμό γονιδίων γίνονται κυρίαρχα στο πληθυσμό και στο περιβάλλον τους.

Ορισμένες φορές, κατά τη διάρκεια της αργής και πολύχρονης διαδικασίας της εξέλιξης, μπορεί να συμβούν τυχαίες αλλαγές στα γονίδια. Αν αυτές οι αλλαγές προσφέρουν επιπλέον πλεονεκτήματα στη μάχη για επιβίωση, νέα είδη εξελίσσονται και κυριαρχούν. Αντίθετα, αν αυτοί οι συνδυασμοί γονιδίων που θα προκύψουν είναι ανεπιτυχείς, εξαλείφονται και υπάρχει πλέον αδυναμία για επιβίωση των ειδών.

Στην ορολογία των Γ.Α., κάθε πιθανή λύση αντιπροσωπεύεται από ένα άτομο. Το κάθε άτομο, αποτελείται από διακριτές μονάδες που ονομάζονται γονίδια, όπου το κάθε ένα ελέγχει ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά του ατόμου. Η συλλογή των πιθανών λύσεων του γενετικού αλγορίθμου, ή η συλλογή των ατόμων, ονομάζεται πληθυσμός. Η αρχικοποίηση του πληθυσμού γίνεται συνήθως τυχαία, και καθώς η αναζήτηση εξελίσσεται, περιλαμβάνει ολοένα και καλύτερες λύσεις, όπου τελικά συγκλίνει και κυριαρχείται από μία και μόνο λύση ή από ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων[25].

Η πιο γενική και βασική μεθοδολογία των Γ.Α., αποτελείται από δύο βήματα: τη μετάλλαξη και τη διασταύρωση. Κατά την μετάλλαξη (mutation) εισάγονται τυχαίες αλλαγές στα χαρακτηριστικά των ατόμων και με αυτό το τρόπο επανεισάγεται γενετική ποικιλότητα στον πληθυσμό. Τις περισσότερες φορές, ο ρυθμός μετάλλαξης, η πιθανότητα δηλαδή αλλαγής των χαρακτηριστικών ενός γονιδίου και κατ' επέκταση ατόμου, είναι πολύ μικρός. Συνεπώς το νέο άτομο που θα παραχθεί δεν θα είναι πολύ διαφορετικό από το αρχικό. Στη διασταύρωση (crossover), δύο άτομα, που ονομάζονται γονείς, συνδυάζονται για να σχηματιστούν νέα άτομα, οι απόγονοι. Η επιλογή των γονέων γίνεται τυχαία, από τα ήδη υπάρχοντα άτομα του πληθυσμού. Με την επαναληπτική εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης, τα γονίδια των καλών ατόμων τείνουν να εμφανίζονται πιο συχνά στον πληθυσμό, οδηγώντας τελικά σε μία συνολικά καλή λύση[25].

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής παρουσιάζεται μία ενδεικτική σειρά βημάτων που ακολουθούνται κατά τη διάρκεια ενός γενετικού αλγορίθμου:



Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής βασικών βημάτων Γενετικού Αλγορίθμου

3.2

Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων σε

Πολυκριτηριακά Προβλήματα

Ως προσέγγιση που βασίζεται σε πληθυσμούς, οι Γ.Α. είναι σε ιδιαίτερα κατάλληλοι και έχουν καταστεί η πιο δημοφιλής μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων σχεδίασης και βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών λειτουργιών[25]. Η ικανότητα των Γ.Α. να αναζητούν, δηλαδή, ταυτόχρονα διαφορετικές περιοχές ενός χώρου λύσεων, καθιστά δυνατό να βρεθεί ένα διαφοροποιημένο σύνολο λύσεων και για πιο δύσκολα προβλήματα.

Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι εξελικτικοί αλγόριθμοι πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Κάποιοι από τους βασικότερους είναι ο Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA), ο Random Weighted Genetic Algorithm (RWGA), ο Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), ο Particle Swarm Optimization, ο Multi-Objective Evolutionary Algorithm (MEA), Differential Evolution for Multi-objective Optimization (DEMO), Pareto Archived Evolution Strategy (PAES) και πολλές παραλλαγές των παραπάνω[26]. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν πολλοί ακόμα διαφορετικοί αλγόριθμοι και πολλές τροποποιήσεις των παραπάνω, αυτοί είναι οι πλέον γνωστοί και αξιόπιστοι που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές και συγκριτικές μελέτες. Ακόμη, πολλοί ερευνητές έχουν προτιμήσει να σχεδιάσουν τους δικούς τους αλγορίθμους, συνδυάζοντας στρατηγικές από διάφορους Γ.Α.

Στην παρούσα εργασία, γίνεται εφαρμογή τριών εκ των πιο διαδεδομένων Γενετικών Αλγορίθμων για προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Αυτοί είναι οι NSGA-II, Particle Swarm Optimization και DEMO. Στη συνέχεια περιγράφονται πιο αναλυτικά οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι.

3.3

Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

(NSGA-II)

Η αρχική πρόταση του αλγορίθμου γενετικής μη-κυριαρχίας (NSGA) αποδείχθηκε αναποτελεσματική σε μεταγενέστερα στάδια των προβλημάτων, λόγω του ότι είχε υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα, εξάρτηση από παραμέτρους κατανομής και χρήση μη ελιτιστικής προσέγγισης. Αναπτύχθηκε, έτσι, η δεύτερη φάση του αλγορίθμου, γνωστή ως NSGA-II, για να αποφευχθούν οι παραπάνω δυσκολίες[27].

Ο NSGA-II χρησιμοποιεί έναν «χειριστή σύγκρισης με συνωστισμό» (crowded comparison operator), ο οποίος είναι ανεξάρτητος από οποιαδήποτε παράμετρο, για να διατηρήσει την ποικιλομορφία. Η μεθοδολογία, είναι αρκετά εύκολη στη κατανόηση: κατά τη διαδικασία της ελιτιστικής προσέγγισης, οι λύσεις των γονέων και των απογόνων συνδυάζονται για να παρέχουν έναν πληθυσμό διπλής ισχύος. Τελικά, οι υποψήφιοι για το μέτωπο Παρέτο επιλέγονται ένας προς ένας, με βάση τη τεχνική γρήγορης μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα προκύπτει όταν η επιλογή ατόμων από ένα συγκεκριμένο μέτωπο δεν απαιτεί να συμπληρωθούν όλες οι λύσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιείται η σύγκριση με συνωστισμό για να επιλεγούν τα καλύτερα διαφοροποιημένα άτομα.

Το πρώτο βήμα σε αυτόν τον αλγόριθμο είναι η δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού. Οι πραγματικοί αριθμοί που αντιστοιχούν στις μεταβλητές σχεδίασης θα μετατραπούν σε δυαδικούς αριθμούς και κάθε δυαδική ακολουθία καλείται άτομο. Ο αρχικός πληθυσμός θα δημιουργηθεί από άτομα που παράγονται τυχαία, ενώ ταυτόχρονα η καταλληλότητα του κάθε ατόμου αξιολογείται με βάση τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Στη συνέχεια, μέσω της διαδικασίας της μετάλλαξης και της διασταύρωσης ατόμων, δημιουργούνται νέοι πληθυσμοί, οι οποίοι και συνδυάζονται. Η επιλογή και η μείωση ατόμων θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια της μεθόδου κατάταξης Παρέτο και τελικά, μία νέα γενιά ατόμων θα παραχθεί από άτομα της προηγούμενης γενιάς. Αυτή η διαδικασία θα επαναληφθεί μέχρι να φτάσει η συνάρτηση στη προκαθορισμένη τιμή.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του NSGA-II είναι η μέθοδος επιλογής του, κατά την οποία θα ελεγχθεί η κυριαρχία του κάθε ατόμου για να διαπιστωθεί αν ανήκει στο μέτωπο Παρέτο. Το δεύτερο μέτωπο Παρέτο θα σχηματιστεί από άτομα που κυριαρχούνται. Η διαδικασία αυτή επίσης επαναλαμβάνεται έως ότου όλα τα άτομα έχουν τοποθετηθεί σε διαφορετικά μέτωπα Παρέτο με διαφορετικές κατατάξεις. Επιπλέον, η κατάταξη των ατόμων βασίζεται στην απόσταση τους από τον πλησιέστερο γείτονα. Αυτή η κατάταξη γίνεται για να υπάρχει ομοιομορφία στο Παρέτο.

Ο NSGA-II αποτελεί σημαντική βελτίωση του αρχικού NSGA και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η αποδοτικότητα του και η ικανότητα του να διατηρεί τη ποικιλομορφία τον καθιστούν ιδανικό για μία ποικιλία εφαρμογών σε διάφορους τομείς της επιστήμης και της μηχανικής.

3.4

Particle Swarm Optimization (PSO)

Η μέθοδος βελτιστοποίησης Particle Swarm Optimization (PSO) έχει τις ρίζες της στη θεωρία των κοπαδιών των πουλιών, του σχηματισμού κοπαδιών των ψαριών και στη θεωρία του σμήνους ειδικότερα[28]. Έχει ωστόσο δεσμούς και κοινά τόσο με τους γενετικούς αλγορίθμους όσο και με τις στρατηγικές εξέλιξης. Παρόλη την απλότητα της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση πολλών από τα ίδια είδη προβλημάτων με τους γενετικούς αλγορίθμους, λόγω του ότι διαθέτει μνήμη[29].

Κάθε δυνητική λύση στη μέθοδο PSO λαμβάνει μία τυχαία ταχύτητα και στην συνέχεια, οι δυνητικές λύσεις, που ονομάζονται σωματίδια, «πετούν» μέσα στον υπερχώρο. Κάθε σωματίδιο παρακολουθεί τις συντεταγμένες του, διότι σχετίζονται με την καλύτερη λύση (καταλληλότητα) που έχει επιτύχει μέχρι εκείνη τη στιγμή. Η τιμή δηλαδή αυτής της καταλληλότητας αποθηκεύεται και ονομάζεται pbest (personal best), ενώ παράλληλα παρακολουθείται μία άλλη καλύτερη τιμή. Τελικά, προκύπτει μία καλύτερη συνολική τιμή και θέση, που έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής από οποιοδήποτε σωματίδιο στον πληθυσμό, και ονομάζεται gbest (global best).

Η έννοια της βελτιστοποίησης PSO περιλαμβάνει σε κάθε χρονικό βήμα, την αλλαγή της ταχύτητας, δηλαδή την επιτάχυνση, κάθε σωματιδίου προς την κατεύθυνση των pbest και gbest. Η επιτάχυνση επιβαρύνεται από έναν τυχαίο όρο, με διαφορετικούς τυχαίους αριθμούς να δημιουργούνται για την επιτάχυνση προς το pbest και το gbest. Τέλος, κάθε σωματίδιο παρακολουθεί και μία ακόμα μεταβλητή, την καλύτερη λύση που επιτυγχάνεται εντός μίας τοπολογικής «γειτονιάς» σωματιδίων και ονομάζεται lbest[30].

3.5

Differential Evolution for Multi-Objective

Optimization (DEMO)

Ο Differential Evolution for Multi-objective Optimization (DEMO) είναι ένας απλός αλγόριθμος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων που χρησιμοποιεί τη διαφορική εξέλιξη (DE) για να εξερευνήσει τον χώρο των αποφάσεων και, αρχικά, τη μη δεσμευμένη ταξινόμηση και την απόσταση συμφόρησης, όπως ο NSGA-II, για να επιλέξει τις καλύτερες λύσεις για την επόμενη γενιά. Ο DEMO, όπως και ο DE, λειτουργεί με έναν πληθυσμό λύσεων. Ο πρώτος πληθυσμός αρχικοποιείται τυχαία και από την πρώτη γενιά και μετά, ο χώρος στην περιοχή ενδιαφέροντος επεκτείνεται.

Σε κάθε βήμα του DEMO, μία νέα λύση κατασκευάζεται από τρεις υπάρχουσες λύσεις και μία λύση-γονέα. Για τη διαδικασία αυτή, χρησιμοποιείται η μέθοδος της μετάλλαξης και της διασταύρωσης. Συγκεκριμένα, ο παράγοντας κλίμακας F της μετάλλαξης, καθορίζει πόσο μακριά από τις τρέχουσες λύσεις θα τοποθετηθεί η νέα λύση, με τις μικρότερες τιμές του παράγοντα να τη τοποθετούν πιο κοντά σε αυτές, ενώ οι μεγαλύτερες τιμές του, πιο μακριά. Η πιθανότητα διασταύρωσης CR καθορίζει την πιθανότητα η νέα λύση να μη κληρονομήσει τιμές μεταβλητών από τον γονέα της. Αυτό σημαίνει ότι οι μικρές τιμές του CR έχουν ως αποτέλεσμα η νέα λύση να είναι πολύ παρόμοια με τον γονέα της. Οι τιμές και των δύο παραμέτρων παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του αλγορίθμου[31].

3.6 *Μέτωπο Παρέτο (Pareto Front)*

Το μέτωπο Παρέτο αποτελείται από τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων για ένα σύνολο λύσεων που δεν κυριαρχούνται από άλλες λύσεις. Σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις, μία λύση θεωρείται ότι κυριαρχεί μία άλλη, εάν είναι εξίσου καλή ή καλύτερη σε όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις και αυστηρά καλύτερη σε τουλάχιστον μία από αυτές. Έτσι, οι λύσεις που βρίσκονται στο μέτωπο Παρέτο είναι αυτές που δεν μπορούν να βελτιωθούν σε μία αντικειμενική συνάρτηση χωρίς να επιδεινωθούν οι άλλες. Αυτό το χαρακτηριστικό τις καθιστά εξαιρετικά σημαντικές, καθώς αντιπροσωπεύουν τους καλύτερους δυνατούς συμβιβασμούς μεταξύ των κριτηρίων.

Ο κύριος στόχος σε κάθε πρόβλημα πολλαπλών κριτηρίων είναι να βρεθεί το μέτωπο Παρέτο, το οποίο περιλαμβάνει τις μη κυριαρχούμενες λύσεις. Η αναπαράσταση της έννοιας του μετώπου Παρέτο σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων διατυπώνεται ως εξής[32]:

Μία λύση x βρίσκεται στο μέτωπο Παρέτο αν και μόνο αν ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες:

$$f_i(x) \leq f_i(x') \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (3.1)$$

Και για τουλάχιστον ένα j , $1 \leq j \leq n$:

$$f_j(x) < f_j(x') \quad (3.2)$$

4

Πολυκριτηριακές Μέθοδοι

Λήψης Αποφάσεων

4.1 Εισαγωγή

Η τεχνική λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (Multi Criteria Decision Making, MCDM) είναι ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων της επιχειρησιακής έρευνας και αφορά την εύρεση των βέλτιστων εναλλακτικών μεταξύ διαφορετικών επιλογών και αντικρουόμενων κριτηρίων[33]. Βρίσκει εφαρμογή στη μηχανική, την ιατρική, τα κοινωνικά ζητήματα και πολλούς άλλους τομείς.

Η MCDM χωρίζεται σε 3 μέρη: επιλογή εναλλακτικών λύσεων και κριτηρίων, προσδιορισμός βαρών των κριτηρίων και κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. Υπάρχουν διάφορες MCDM τεχνικές όπως η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP), η Μέθοδος οργάνωσης προτίμησης για Εμπλουτισμένες Αξιολογήσεις (PROMETHEE), η Πολύ-Αντικειμενική Βελτιστοποίηση με Βάση την Ανάλυση Αναλογίας (MOORA), η Αναλυτική Δικτυακή Διαδικασία (ANP), η Τεχνική Προτίμησης και Ομοιότητας προς την Ιδανική Λύση (TOPSIS), η Βελτιστοποίηση Πολλαπλών Κριτηρίων με Συμβιβαστική Λύση (VIKOR) και πολλές άλλες[33].

Η ολοκληρωμένη προσέγγιση που ακολουθεί η MCDM απέναντι σε όλα τα κριτήρια ενός προβλήματος εξασφαλίζει μια ισορροπημένη αξιολόγηση, αποτρέποντας οποιοδήποτε μεμονωμένο κριτήριο από το να κυριαρχήσει στις επιλογές. Με τη μέθοδο, διευκολύνεται η σύγκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών και μεταβλητών απόφασης, με αποτέλεσμα να καταλήγουμε τελικά σε βέλτιστες επιλογές και βέλτιστη απόδοση.

Η παρούσα εργασία υλοποιεί τρεις πολυκριτηριακές μεθόδους, την υβριδική AHP-TOPSIS, την VIKOR και την PROMETHEE. Η επιλογή αυτών των μεθόδων βασίζεται στη συγκρίσιμη δομή και τρόπο εξαγωγής αποτελεσμάτων που διαθέτουν, χρησιμοποιώντας βέβαια, η κάθε μία, διαφορετικές προσεγγίσεις για τη κατάταξη των τελικών λύσεων. Επιπλέον, σε προηγούμενες μελέτες επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης, οι συγκεκριμένοι μέθοδοι έχουν επιδείξει ικανοποιητικά και αξιόπιστα αποτελέσματα. Για παράδειγμα οι Rao, Balic και Rai εξετάζουν τη διαδικασία κατεργασίας με χρήση λειαντικού υδροβολής, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Java και τη μέθοδο PROMETHEE, με στόχο τη επίλυση βέλτιστης λύσης από τον αλγόριθμο, παρουσιάζοντας μία αξιόπιστη προσέγγιση στη βελτιστοποίηση πολυπλοκών διαδικασιών κατεργασίας [34]. Οι Chang Ong, Leong, Wan και Chew, εφαρμόζουν δύο τεχνικές πολυκριτήριας βελτιστοποίησης, μία εκ των οποίων είναι η VIKOR, πάνω σε ένα σύστημα ανακύκλωσης στη βιομηχανία παραγωγής γαντιών από καουτσούκ, με τη VIKOR να αποδίδει πολύ αξιολόγα αποτελέσματα, επιτρέποντας την κατάταξη και αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων βάσει προτιμήσεων [35]. Τέλος, οι Muhsen, Nabil, Haider και Khatib παρουσιάζουν τη βελτιστοποίηση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος στη Βαγδάτη με χρήση ενός τροποποιημένου αλγορίθμου DEMO, συνδυαστικά με την υβριδική μέθοδο AHP-TOPSIS, η εργασία δηλαδή πάνω στην οποία βασίστηκε και η ιδέα της παρούσας μελέτης [36]. Βεβαίως, υπάρχουν ακόμα πολλά παραδείγματα εργασιών με την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων. Ως εκ τούτου, η σύγκριση τους στη παρούσα εργασία αποσκοπεί στο να αναδείξει ποια από τις τρεις μεθόδους παρουσιάζει την υψηλότερη απόδοση.

4.2 AHP-TOPSIS

4.2.1. Εισαγωγή

Για την ταξινόμηση των διατάξεων του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, ο συνδυασμός των μεθόδων AHP και TOPSIS έχει διαπιστωθεί πως έχει μεγάλη αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα [37], [38], [36]. Η μέθοδος AHP χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει το κατάλληλο βάρος για κάθε κριτήριο στη μήτρα αποφάσεων, και στη συνέχεια τα βάρη χρησιμοποιούνται με τη μέθοδο TOPSIS για να ληφθεί η απόφαση σχετικά με τη προτιμητέα σειρά των βέλτιστων διατάξεων. Το συγκεκριμένο μοντέλο συζητείται λεπτομερώς στην επόμενη υποενότητα.

4.2.2. AHP

Σε πολλές μεθόδους Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Λήψης Αποφάσεων, το βάρος παίζει ουσιώδη ρόλο για να αποτυπώσει τη σημαντικότητα προτεραιότητας κάθε κριτηρίου που κυριαρχεί στην απόδοση των υποψήφιων λύσεων. Η μέθοδος AHP είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους, για αυτό το σκοπό.

Η AHP χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την αξιολόγηση των προτιμήσεων μεταξύ των κριτηρίων που κυριαρχούν στην απόδοση του προβλήματος MCDM, μέσω συγκρίσεων μεταξύ ζευγών μεταξύ των κριτηρίων. Για παράδειγμα, ένα πρόβλημα με n -κριτήρια χρειάζεται $n*(n-1)/2$ συγκρίσεις ζευγών[36].

Η μέθοδος βασίζεται στη κλίμακα εννέα σημείων που ανέπτυξε ο Saaty[39], για να επιτευχθούν οι συγκρίσεις και να διαπιστωθεί πόσες φορές προτιμάται ένα κριτήριο περισσότερο ή λιγότερο από ένα άλλο. Ο βαθμός σημαντικότητας των κριτηρίων και η αξιολόγησή τους από τους αξιολογητές του κάθε πειράματος, σημειώνονται σε ένα πίνακα προτιμήσεων, ενώ στη συνέχεια βάσει αυτού κατασκευάζεται ένας πίνακας συγκρίσεων, ο οποίος και κανονικοποιείται. Ο κανονικοποιημένος πίνακας δημιουργείται όταν κάθε στοιχείο αυτού είναι το αντίστοιχο κάθε στοιχείου του πίνακα συγκρίσεων διαιρούμενο με το άθροισμα κάθε στήλης. Έπειτα, τα στοιχεία του διανύσματος συγκέντρωσης υπολογίζονται συγκεντρώνοντας την αντίστοιχη γραμμή του κανονικοποιημένου πίνακα.

Τέλος, τα στοιχεία του διανύσματος συγκέντρωσης διαιρούνται με το άθροισμα των στοιχείων για να προκύψουν τα βάρη. Αξίζει να αναφερθεί πως το συνολικό άθροισμα των βαρών των κριτηρίων θα πρέπει να διέπεται από τον περιορισμό:

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1 \quad (4.1)$$

Όπου W_j το βάρος του j -κριτηρίου, ενώ n είναι ο συνολικός αριθμός των κριτηρίων που κυριαρχούν στην απόδοση του προβλήματος MCDM[33].

4.2.3. TOPSIS

Η μέθοδος TOPSIS (τεχνική προτίμησης με ομοιότητα προς την ιδανική λύση), αναπτύχθηκε από τους Yoo και Hwang το 1980[40]. Βασική ιδέα της μεθόδου είναι πως η επιλεγμένη εναλλακτική λύση πρέπει να έχει τη μικρότερη απόσταση από την ιδανική λύση και τη μεγαλύτερη απόσταση από την αρνητική-ιδανική λύση, σε κάποια γεωμετρική έννοια. Η TOPSIS υποθέτει πως κάθε αντικειμενική συνάρτηση έχει τη τάση να αυξάνει ή να μειώνει μονοτονικά την ωφελιμότητα, συνεπώς ορίζονται εύκολα οι ιδανικές και αρνητικές-ιδανικές λύσεις. Η προσέγγιση της ιδανικής Ευκλείδειας λύσης από την άλλη, προτάθηκε για την αξιολόγηση της σχετικής εγγύτητας των εναλλακτικών λύσεων στην ιδανική λύση. Έτσι η

σειρά προτίμησης των εναλλακτικών λύσεων μπορεί να προκύψει από μία σειρά συγκρίσεων αυτών των σχετικών αποστάσεων.

Τα βασικά βήματα της μεθόδου TOPSIS είναι τα παρακάτω:

Βήμα 1: Δημιουργία Κανονικοποιημένου Πίνακα Αποφάσεων: Οι διάφορες διαστάσεις των κριτηρίων μετατρέπονται σε μη διαστασιοποιημένα κριτήρια.

Βήμα 2: Δημιουργία του Σταθμισμένου Κανονικοποιημένου Πίνακα: Ένα σύνολο βαρών w , ορίζεται από τον λήπτη αποφάσεων και χρησιμοποιείται με τον πίνακα αποφάσεων για να δημιουργηθεί ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας.

Βήμα 3: Προσδιορισμός Ιδανικών και Αρνητικών-Ιδανικών Λύσεων: Οι ιδανικές (A^*) ή πιο προτιμητέες λύσεις και οι αρνητικές-ιδανικές (A^-) ή λιγότερο προτιμητέες εναλλακτικές λύσεις ορίζονται ως:

$$A^* = \{ (\max v_{ij} | j \in J), (\min v_{ij} | j \in JI), i = 1, 2, 3, \dots, m \} = \{v1^*, v2^*, \dots, vn^*\} \quad (4.2)$$

$$A^- = \{ (\min v_{ij} | j \in J), (\max v_{ij} | j \in JI), i = 1, 2, 3, \dots, m \} = \{v1^-, v2^-, \dots, vn^-\} \quad (4.3)$$

όπου: $J = \{j = 1, 2, 3, \dots, n \text{ και } j \text{ σχετίζεται με τα κριτήρια ωφέλειας}\}$, $JI = \{j = 1, 2, 3, \dots, n \text{ και } j \text{ σχετίζεται με τα κριτήρια κόστους/απώλειας}\}$.

Οι εναλλακτικές λύσεις είναι πλασματικές, ωστόσο υποθέτουμε πως ο λήπτης αποφάσεων θέλει να έχει τη μέγιστη δυνατή τιμή μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων.

Βήμα 4: Υπολογισμός μέτρου διαχωρισμού: Εφαρμόζεται η Ευκλείδεια μέθοδος απόστασης για να μετρήσει τις αποστάσεις διαχωρισμού κάθε εναλλακτικής λύσης από την ιδανική και την αρνητική-ιδανική λύση. Έτσι για τις αποστάσεις από την ιδανική λύση έχουμε:

$$Si^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, \text{ για } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.4)$$

Όπου Si^* η απόσταση, με την Ευκλείδεια έννοια, κάθε εναλλακτικής λύσης από την ιδανική λύση.

Για τις αποστάσεις από την αρνητική-ιδανική λύση έχουμε:

$$Si^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \text{ για } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.5)$$

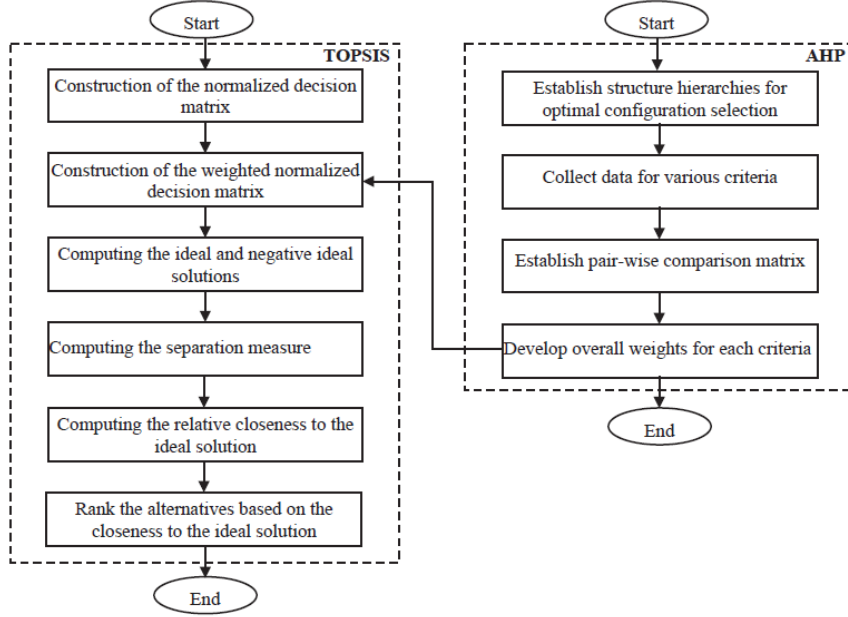
Όπου Si^- η απόσταση, με την Ευκλείδεια έννοια, κάθε εναλλακτικής λύσης από την αρνητική-ιδανική λύση.

Βήμα 5: Υπολογισμός της Σχετικής Εγγύτητας στην Ιδανική Λύση: Η σχετική εγγύτητα μίας εναλλακτικής λύσης A_i σε σχέση με την ιδανική λύση A^* ορίζεται ως:

$$Ci^* = \frac{S_i^*}{Si^* + S_i^-}, \text{για } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.6)$$

Προφανώς, $Ci^* = 1$, αν $Ai = A^*$, και $Ci^- = 0$, αν $Ai = A^-$.

Βήμα 6: Κατάταξη της σειράς Προτίμησης: Η καλύτερη (βέλτιστη) εναλλακτική λύση μπορεί τώρα να αποφασιστεί σύμφωνα με το Ci^* . Συνεπώς, η καλύτερη λύση είναι αυτή που έχει τη μικρότερη απόσταση από την ιδανική λύση[36].



Εικόνα 2: Διάγραμμα ροής υβριδικής μεθόδου AHP-TOPSIS [36]

4.3 VIKOR

Η μέθοδος VIKOR εστιάζει στην κατάταξη και την επιλογή από ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων με αντικρουόμενα κριτήρια και καθορίζει τη λύση συμβιβασμού με βάση ένα συγκεκριμένο μέτρο. Υποθέτοντας ότι κάθε εναλλακτική λύση αξιολογείται σύμφωνα με κάθε συνάρτηση κριτηρίου, η κατάταξη συμβιβασμού μπορεί να παρουσιαστεί συγκρίνοντας τον βαθμό εγγύτητας προς την ιδανική εναλλακτική λύση. Η λύση συμβιβασμού, είναι μία εφικτή λύση που είναι η πλησιέστερη προς την ιδανική.

Το πολυκριτηριακό μέτρο για την κατάταξη συμβιβασμού αναπτύσσεται από τη μετρική L_p που χρησιμοποιείται ως συνάρτηση συσσώρευσης σε μία μέθοδο προγραμματισμού συμβιβασμού ορισμένη ως:

$$Lp, i = \left[\sum_{j=1}^n \left[W_j * \frac{F_j - F_{ij}}{F_j^+ - F_j^-} \right]^p \right]^{\frac{1}{p}}, 1 \leq p \leq \infty \quad (4.7)$$

Όπου το $L_{1,i}$ ορίζεται ως η μέγιστη ομαδική χρησιμότητα και το $L_{\infty,i}$ η ελάχιστη ατομική μεταμέλεια του αντιπάλου[41].

Για ένα πρόβλημα Πολυκριτηριακής Λήψης Αποφάσεων που περιλαμβάνει m εναλλακτικές λύσεις και n κριτήρια, όπου οι αποδόσεις των λύσεων εκφράζονται, με τη βοήθεια των διπολικών συνόλων ως:

$$\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m\} = \{\psi_i : i = 1, 2, \dots, m\} \quad (4.8) \text{ και}$$

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\} = \{C_j : j = 1, 2, \dots, n\} \quad (4.9)$$

Τα οποία είναι τα σύνολα των εναλλακτικών και των κριτηρίων που καθορίζονται από τον λήπτη αποφάσεων, αντίστοιχα. Οι αξιολογήσεις κάθε εναλλακτική λύσης i για κάθε κριτήριο C_j δίνονται από ένα διπολικό ασαφές σύνολο $Fi = \{(i, f_{ij}) \mid j=1,2,\dots,n\}$, όπου $f_{ij} = (\mu_{ij}, \nu_{ij})$ αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα, το βαθμό ικανοποίησης ($\mu_{ij} \in [0,1]$) και το βαθμό δυσaréσκειας ($\nu_{ij} \in [-1,0]$) που καθορίζονται για την εναλλακτική i σε σχέση με το κριτήριο C_j . Τώρα, η καλύτερη τιμή f_j^* και τη χειρότερη τιμή f_j^- όλων των συναρτήσεων κριτηρίων, $j=1,2,\dots,n$ ως εξής:

$$f_j^* = \begin{cases} (\max \mu_{ij}, \min \nu_{ij}), & \text{for the benefit criterion} \\ (\min \mu_{ij}, \max \nu_{ij}), & \text{for the cost criterion} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.10)$$

$$f_j^- = \begin{cases} (\min \mu_{ij}, \max \nu_{ij}), & \text{for the benefit criterion} \\ (\max \mu_{ij}, \min \nu_{ij}), & \text{for the cost criterion} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.11)$$

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη το μέτρο απόστασης για τις συναρτήσεις κάθε εναλλακτικής $f_{ij} = (\mu_{ij}, \nu_{ij})$ και την καλύτερη τιμή f_j^* και τη χειρότερη τιμή f_j^- όλων των συναρτήσεων κριτηρίων προκύπτουν οι:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \left[\frac{d(f_j^*, f_{ij})}{d(f_j^*, f_j^-)} \right] \quad (4.12)$$

$$R_i = \max_j w_j \left[\frac{d(f_j^*, f_{ij})}{d(f_j^*, f_j^-)} \right] \quad (4.13)$$

Όπου S_i το $L_{1,i}$ και R_i το $L_{\infty,i}$, που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση μέτρων κατάταξης και w_j τα βάρη των κριτηρίων, για τα οποία ισχύει η (4.1).

Ο βαθμός εγγύτητας κάθε λύσης i σε σχέση με τα S_i και R_i δίνεται από την:

$$Q_i = \left[u * \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} \right] + \left[\frac{(1 - u)(R_i - R^*)}{R^- - R^*} \right] \quad (4.14)$$

Όπου $S^+ = \min_i S_i$, $S^- = \max_i S_i$, και $R^+ = \min_i R_i$, $R^- = \max_i R_i$. Οι παράμετροι u και $(1-u)$ είναι τα βάρη για τη στρατηγική της μέγιστης ομαδικής και ατομικής χρησιμότητας, αντίστοιχα. Συνήθως, η τιμή του u μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι $u = 0.5$. Τα Q_i αντιπροσωπεύουν την απόσταση της εναλλακτικής i από την καλύτερη λύση "συμβιβαστική λύση". Έτσι, η εναλλακτική που έχει την ελάχιστη τιμή στο Q_i θα είναι η συμβιβαστική λύση, εάν πληρούνται οι ακόλουθες δύο προϋποθέσεις:

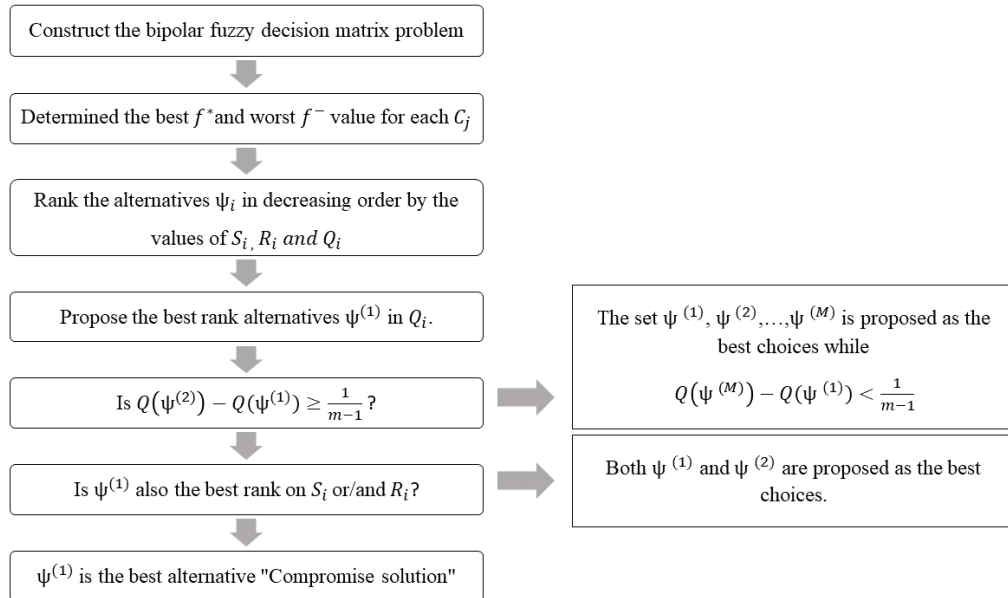
Πρώτον,

$$Q(\psi^{(2)}) - Q(\psi^{(1)}) \geq \frac{1}{m-1} \quad (4.15)$$

Όπου $\psi^{(1)}$, $\psi^{(2)}$ οι δύο πρώτες εναλλακτικές στο Q_i και m ο αριθμός των λύσεων και δεύτερον η συμβιβαστική λύση θα πρέπει να είναι η καλύτερη κατάταξη σύμφωνα με το S_i και / ή το R_i . Αν μία από τις προϋποθέσεις δεν πληρείται, τότε προτείνεται ένα σύνολο συμβιβαστικών λύσεων, το οποίο αποτελείται από:

$\psi^{(1)}$ και $\psi^{(2)}$ αν δεν πληρείται η δεύτερη προϋπόθεση ή $\psi^{(1)}$, $\psi^{(2)}, \dots, \psi^{(M)}$ αν δεν πληρείται η πρώτη. Σε αυτή τη περίπτωση, το $\psi^{(M)}$ καθορίζεται από [42]:

$$Q(\psi^{(M)}) - Q(\psi^{(1)}) < \frac{1}{m-1} \quad (4.16)$$



Εικόνα 3: Διάγραμμα ροής μεθόδου VIKOR [42]

4.4

PROMETHEE

Η μέθοδος PROMETHEE είναι μία μέθοδος υπερβαθμολόγησης για πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης και αναπτύχθηκε από τους Brans et al. [43] και τους Brans και Vincke [44]. Τα δεδομένα εισόδου είναι παρόμοια με αυτά των μεθόδων VIKOR και TOPSIS, αλλά ο χρήστης της μεθόδου PROMETHEE πρέπει να εισάγει επιπλέον μεταβλητές ανάλογα με την επιλογή της συνάρτησης προτίμησης.

Στην PROMETHEE, ένας βαθμός προτίμησης είναι μια έκφραση του πώς μια δράση προτιμάται έναντι μιας άλλης. Για μικρές αποκλίσεις μεταξύ των αξιολογήσεων ενός ζεύγους κριτηρίων, ο λήπτης αποφάσεων μπορεί να αποδώσει μια μικρή προτίμηση. Αν η απόκλιση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, αυτό μπορεί επίσης να μοντελοποιηθεί στην PROMETHEE. Το ακριβώς αντίθετο ισχύει για μεγάλες αποκλίσεις, όπου ο λήπτης αποφάσεων πρέπει να αποδώσει μια μεγάλη προτίμηση της μιας δράσης έναντι της άλλης. Αν η απόκλιση υπερβαίνει μια ορισμένη τιμή που καθορίζεται από τον λήπτη, τότε υπάρχει απόλυτη προτίμηση της μιας δράσης έναντι της άλλης. Αυτός ο βαθμός προτίμησης είναι ένας πραγματικός αριθμός πάντα μεταξύ 0 και 1.

Συνεπώς, η συνάρτηση προτίμησης, αν το κριτήριο πρέπει να μεγιστοποιηθεί, μπορεί να οριστεί ως:

$$P_j(a, b) = F_j(d_j(a, b)), \forall a, b \in A \quad (4.17)$$

όπου $d_j(a, b)$ είναι η διαφορά των αξιολογήσεων μεταξύ δύο δράσεων (σύγκριση ανά ζεύγος):

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (4.18)$$

και ο βαθμός προτίμησης είναι πάντα μεταξύ 0 και 1:

$$0 \leq P_j(a, b) \leq 1 \quad (4.19)$$

Αν το κριτήριο g πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, τότε πρέπει να μεγιστοποιηθεί το $-g$.

Προτείνονται συνολικά έξι διαφορετικοί τύποι συναρτήσεων προτίμησης, οι οποίοι έχουν γίνει αποδεκτοί και χρησιμοποιούνται εκτενώς[45]. Η λογική της συνάρτησης προτίμησης είναι να μοντελοποιήσει τον τρόπο με τον οποίο ο λήπτης αποφάσεων προτιμά μια δράση έναντι μιας άλλης. Στην πραγματικότητα είναι μια προσπάθεια να μοντελοποιηθεί η αντίληψή του για το πρόβλημα που έχει στα χέρια του.

Οι συνολικοί δείκτες προτίμησης μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$\begin{cases} \pi(a, b) = \sum_{j=1}^n P_j(a, b)w_j \\ \pi(b, a) = \sum_{j=1}^n P_j(b, a)w_j \end{cases} \quad (4.20)$$

όπου $(a,b) \in A$ και το $\pi(a,b)$ δείχνει πόσο προτιμάται η δράση a σε σχέση με τη δράση b σε όλα τα κριτήρια, ενώ το $\pi(b,a)$ δείχνει πόσο προτιμάται η δράση b σε σχέση με τη δράση a . Οι παρακάτω ιδιότητες ισχύουν για όλα τα $(a,b) \in A$:

$$\begin{cases} \pi(a,a) = 0 \\ 0 \leq \pi(a,b) \leq 1 \text{ και } 0 \leq \pi(b,a) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(a,b) + \pi(b,a) \leq 1 \end{cases} \quad (4.21)$$

Κάθε δράση συναγωνίζεται με τις $(m-1)$ άλλες δράσεις στο σύνολο A . Η μονοκριτηριακή θετική ροή κάθε δράσης στο A είναι ένας αριθμός μεταξύ 0 και 1 και είναι ένας δείκτης του πόσο προτιμάται αυτή η δράση σε σχέση με όλες τις άλλες δράσεις στο A . Όσο υψηλότερη είναι αυτή η τιμή, τόσο πιο προτιμητέα είναι αυτή η δράση για τον συγκεκριμένο λήπτη. Συνεπώς, ο ορισμός για τη θετική ροή υπεροχής είναι:

$$\varphi^+(a) = \frac{1}{m+1} \sum_{x \in A} \pi(a,x) \quad (4.22)$$

Από την άλλη πλευρά, η αρνητική ροή υπεροχής είναι ένας δείκτης του πόσο όλες οι άλλες δράσεις προτιμώνται σε σχέση με αυτή τη συγκεκριμένη δράση και σε συμφωνία με τη θετική ροή ορίζεται ως:

$$\varphi^-(a) = \frac{1}{m+1} \sum_{x \in A} \pi(x,a) \quad (4.23)$$

5

Μοντελοποίηση Προβλήματος

5.1 Τα στοιχεία του δικτύου

5.1.1. Φωτοβολταϊκό πάνελ

Όταν μοντελοποιούμε μία φωτοβολταϊκή διάταξη σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, το πιο σύνηθες μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι αυτό της μονάδας φωτοβολταϊκών με μία διόδο επειδή προσφέρει ισορροπία απλότητας και ακρίβειας. Η εξίσωση που διέπει τα γραμμικά χαρακτηριστικά IV της μονάδας είναι η εξής:

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{aKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (5.1)$$

Όπου I το ρεύμα εξόδου της μονάδας (A), V είναι η τάση εξόδου της μονάδας (V), I_{ph} είναι το φωτορεύμα (A), I_o το ρεύμα κορεσμού της διόδου (A), R_s και R_p οι τιμές των σειριακών και παράλληλων αντιστάσεων της μονάδας φωτοβολταϊκών (Ω) αντίστοιχα, a είναι ο παράγοντας ιδανικότητας της διόδου, q το φορτίο ηλεκτρονίου, K η σταθερά Boltzmann και T η θερμοκρασία του κυττάρου σε K[46]. Οι 5 παράμετροι I_{ph} , I_o , R_s , R_p , a , δίνονται [47]. Έτσι η έξοδος της φωτοβολταϊκής διάταξης θα είναι:

$$P_{pv} = IV \quad (5.2)$$

Ωστόσο, παρά την αρχική υπόθεση πως η συγκεκριμένη μέθοδος θα απέφερε αξιόπιστα αποτελέσματα, τα ευρήματα δεν ήταν επαρκώς ακριβή, στην πράξη, για να

υποστηρίζουν τη συνέχεια του πειράματος και την υλοποίηση του φωτοβολταϊκού. Συνεπώς, διερευνήθηκε μία άλλη μέθοδος υπολογισμού της ισχύος της φωτοβολταϊκής διάταξης.

Γνωρίζοντας την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο της επιφάνειας για όλες τις ηλιακές ώρες ενός τυπικού μετεωρολογικού έτους, είναι δυνατό να υπολογιστεί η αναμενόμενη ωριαία και συσσωρευμένη ηλεκτρική παραγωγή όλων των φωτοβολταϊκών μονάδων στην επιφάνεια. Αρχικά, τα δεδομένα θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ωριαίας θερμοκρασίας κάθε μονάδας με βάση την εξίσωση:

$$T_{pv,m} = T + \frac{T_{noct} - 20^{\circ}C}{800 Wm^{-2}} G \quad (5.3)$$

Όπου T η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε $^{\circ}C$, T_{noct} είναι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του κάθε φωτοβολταϊκού κυττάρου και G η ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2 [48]. Στη συνέχεια, μετά από τον υπολογισμό του ρεύματος τάσης κάθε μονάδας, υπολογίζεται και η ισχύς εξόδου κάθε φωτοβολταϊκής μονάδας, σύμφωνα με τις:

$$I_{pv,m} = I_{ph} * \frac{G}{G_{ref}} \quad (5.4)$$

$$V_{pv,m} = V_{oc} + temp_{coefficient} * (T_{pv,m} - T_{ref}) \quad (5.5)$$

$$P_{pv,m} = V_{pv,m} * I_{pv,m} * A_{pv,m} \quad (5.6)$$

Όπου G_{ref} η ακτινοβολία αναφοράς, που συνήθως έχει τιμή $1000 W/m^2$, V_{oc} η τάση ανοικτού κυκλώματος μονάδας, T_{ref} η θερμοκρασία αναφοράς, που συνήθως έχει τιμή ίση με 298.15 ($273.15 + 25^{\circ}C$), $A_{pv,m}$ η συνολική επιφάνεια κάθε μονάδας σε m^2 και $temp_coefficient$ ο συντελεστής θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται[49].

Έτσι τελικά, προκύπτει η συνολική ισχύς εξόδου του συστήματος πολλαπλασιάζοντας την ισχύ εξόδου κάθε μονάδας με τον συνολικό τελικό αριθμό των παράλληλων φωτοβολταϊκών μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν:

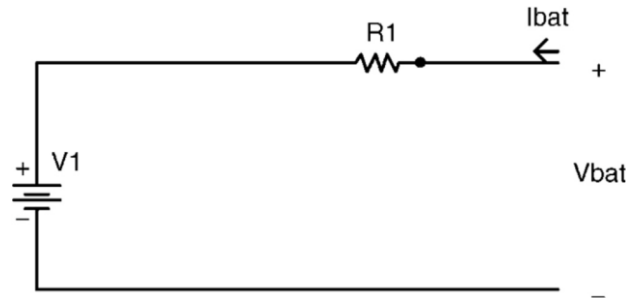
$$Power = P_{pv,m} * N_{pm} \quad (5.7)$$

5.1.2. Μπαταρίες

Για την προσομοίωση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, έχει αποδειχθεί πως οι μπαταρίες μόλυβδου – οξέος είναι οι καταλληλότερες. Το μοντέλο αυτό, ενώ αγνοεί τις λειτουργίες υπερφόρτισης και υπερβολικής εκφόρτισης, εξακολουθεί να αποδίδει καλά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα

έχουν ρυθμιστές φόρτισης που εμποδίζουν την μπαταρία να φτάσει σε επικίνδυνα χαμηλά και υψηλά επίπεδα φόρτισης.

Όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, το μοντέλο αυτό αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία, την πηγή τάσης V1 και έναν σειριακό αντιστάτη R1, για να ληφθεί υπόψη η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας.



Εικόνα 4: Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου μπαταρίας

Τα δύο σύνολα εξισώσεων στο μοντέλο είναι οι εξισώσεις κατά τη φόρτιση και οι εξισώσεις κατά την εκφόρτιση. Για τη διαδικασία της φόρτισης έχουμε τα εξής:

$$V1 = (2 + 0.148B)ns \quad (5.8)$$

$$B = \frac{SOC}{SOC_{max}} \quad (5.9)$$

$$R1 = \frac{0.758 + \left(\frac{0.1309}{1.06 - B} \right)}{SOC_{max}} ns \quad (5.10)$$

$$SOC_{min} = (1 - DOD)C_{bat} \quad (5.11)$$

Όπου V1 είναι η τάση πηγής στη λειτουργία φόρτισης (V), ns είναι ο αριθμός των σειριακών κυψελών της μπαταρίας, SOC_{max} είναι η μέγιστη επιτρεπτή κατάσταση φόρτισης (Wh), SOC είναι η στιγμιαία τιμή της φόρτισης της μπαταρίας σε Wh, SOC_{min} είναι η ελάχιστη επιτρεπτή κατάσταση φόρτισης (Wh), Ibat και Vbat είναι το ρεύμα (A) και η τάση (V) της κυψέλης της μπαταρίας, αντίστοιχα, DOD είναι το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης (%) και Cbat είναι η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας σε Wh.

Όσον αφορά τη λειτουργία της εκφόρτισης, οι εξισώσεις για το V1 και το R1 παρουσιάζονται ως εξής:

$$V1 = (1.962 + 0.124B)ns \quad (5.12)$$

$$R1 = \frac{0.19 + \left(\frac{0.1037}{B - 0.14} \right)}{SOC_{max}} ns \quad (5.13)$$

Σημειώνεται πως το I_{bat} είναι θετικό στη λειτουργία φόρτισης και αρνητικό στην λειτουργία εκφόρτισης. Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας δίνεται από:

$$SOCn(t) = SOCn(t-1) + \frac{1}{SOCmax} \int (kV1I_{bat}) - (D * SOCn(t-1)SOCmax) dt \quad (5.14)$$

Όπου $SOCn(t-1)$ είναι απλά το $SOCn(t)$ του προηγούμενου χρονικού βήματος, k είναι η απόδοση της φόρτισης-εκφόρτισης και D είναι ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης (hr^{-1}). Τέλος, η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης, ανάλογα με τη λειτουργία δίνεται από:

$$P_{bat} = I_{bat} * V_{bat} \quad (5.15)$$

Σε κάθε χρονικό βήμα, η ωριαία ισχύς του συστήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{net} = \frac{P_{pv} - P_{load}}{n_{inv}} \quad (5.16)$$

Όπου P_{pv} είναι η έξοδος ισχύος της φωτοβολταϊκής διάταξης, P_{load} είναι η ωριαία ισχύς ζήτησης φορτίου και n_{inv} είναι η απόδοση του μετατροπέα. Εννοιολογικά, το P_{net} μπορεί να είναι θετικό, αρνητικό ή μηδενικό. Μία θετική τιμή του, δείχνει πως η ισχύς της διάταξης υπερβαίνει τη ζήτηση φορτίου. Η καθαρή ισχύς φορτίζει την μπαταρία, όπου η κατάσταση φόρτισης της είναι κάτω από το μέγιστο επίπεδο. Αν η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας φτάσει ή έχει ήδη φτάσει στην προοριζόμενη τιμή SOC_{max} , τότε το P_{net} απορρίπτεται. Το ποσό του P_{net} που απορρίπτεται κάθε ώρα αποθηκεύεται ως απορριπτόμενη ισχύς, P_{dump} . Αντίθετα, η αρνητική τιμή του P_{net} σημαίνει πως υπάρχει περισσότερη ζήτηση φορτίου από όση μπορεί να καλύψει η διάταξη. Έτσι προκύπτουν δύο σενάρια: είτε η έλλειψη ισχύος λαμβάνεται από την μπαταρία αν η κατάσταση φόρτισης της τελευταίας είναι πάνω από την προοριζόμενη τιμή SOC_{min} , είτε η μπαταρία απομονώνεται από το φορτίο για να αποφευχθεί περαιτέρω εκφόρτιση και το P_{net} αποθηκεύεται ως έλλειμμα ισχύος, P_{def} . Για τη περίπτωση του τελευταίου σεναρίου, όταν το P_{net} είναι μηδενικό, η ζήτηση του φορτίου καλύπτεται πλήρως από τη φωτοβολταϊκή διάταξη και η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας παραμένει όπως είναι, εκτός από μία μικρή αυτοεκφόρτιση[36].

5.1.3. Μετατροπείς (Inverters)

Οι μετατροπείς είναι κρίσιμα εξαρτήματα σε συστήματα που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο βασικός τους ρόλος αφορά τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (DC), που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ ή αποθηκεύεται σε μπαταρίες, σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), το οποίο χρησιμοποιείται στη συνέχεια από τις ηλεκτρικές συσκευές και τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται με

τη βοήθεια διακοπών ισχύος που ελέγχουν τη κατεύθυνση του ρεύματος, ενώ βασικό μέλημα κατά τον σχεδιασμό τους είναι το να παρέχουν σταθερή τιμή τάσης στην έξοδο, παρά τις διακυμάνσεις στην είσοδο του DC ή τις αλλαγές στα φορτία[50].

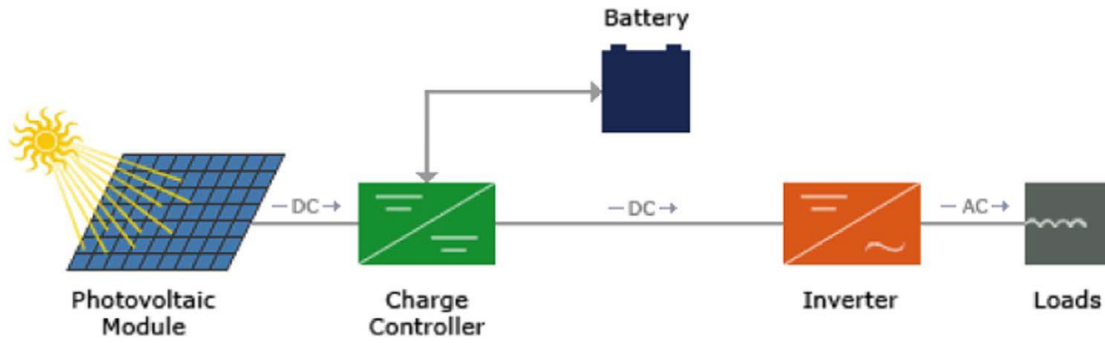
Ένας μετατροπέας, επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να χειρίζεται τη μέγιστη αναμενόμενη ισχύ των φορτίων εναλλασσόμενου ρεύματος. Συνεπώς, κατά την επιλογή του ελέγχεται πάντα το αν είναι τουλάχιστον 20% υψηλότερος από τη συνολική ονομαστική ισχύ των απαιτούμενων φορτίων[51].

Η απόδοση ενός μετατροπέα ορίζεται ως η αναλογία της παραγόμενης AC ισχύος προς την εισερχόμενη DC ισχύ. Οι υψηλής απόδοσης μετατροπείς ελαχιστοποιούν τις ενεργειακές απώλειες, βελτιώνοντας τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος, ενώ ακόμη οι ποιοτικοί μετατροπείς είναι κατασκευασμένοι για να παρέχουν αξιόπιστη λειτουργία για πολλαπλά έτη, μειώνοντας την ανάγκη για συχνές επισκευές και αντικαταστάσεις. Τυπικές αποδόσεις των σύγχρονων μετατροπέων κυμαίνονται μεταξύ 90% και 98%.

5.1.4. Ρυθμιστής φόρτισης (Charge Controller)

Ο ρυθμιστής φόρτισης της μπαταρίας χρησιμοποιείται σε φωτοβολταϊκά συστήματα για την ασφαλή φόρτιση των μπαταριών και την αποφυγή υπερφόρτισης τους. Βοηθά επίσης στη μακροχρόνια διάρκεια ζωής των μπαταριών. Ο αλγόριθμος ενός ρυθμιστή φόρτισης δείχνει την αποδοτικότητα της χρήσης του φωτοβολταϊκού συστήματος και της φόρτισης της μπαταρίας, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής των μπαταριών και την ικανότητα του συστήματος να καλύψει τις απαιτήσεις των φορτίων. Επιπλέον, πρέπει να είναι σε θέση να χειρίζεται το ρεύμα βραχυκυκλώματος του συστήματος, ενώ το κύριο καθήκον τους είναι να διατηρούν τις μπαταρίες στην υψηλότερη δυνατή κατάσταση φόρτισης, προστατεύοντας τις από υπερβολική εκφόρτιση λόγω των φορτίων και του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα αρκετές φορές υπερβαίνει τις απαιτήσεις των φορτίων κατά τη διάρκεια κυρίως των καλοκαιρινών μηνών, όταν η ακτινοβολία είναι υψηλή. Έτσι, ένας ρυθμιστής φόρτισης πρέπει να χρησιμοποιείται για να διατηρεί τις μπαταρίες ασφαλείς από υπερφόρτιση. Η ικανότητα του αυτή, πρέπει να παραμένει αμετάβλητη παρά τις εποχιακές αλλαγές στη ζήτηση των φορτίων, το μέγεθος του συστήματος ή την ηλιακή ακτινοβολία[51].



Εικόνα 5: Αναπαράσταση αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με μπαταρία [51]

5.2 Το μαθηματικό μοντέλο

5.2.1. Μεταβλητές απόφασης του προβλήματος

Για την κατασκευή και βελτιστοποίηση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, ως μεταβλητές απόφασης επιλέχθηκαν ο αριθμός των παράλληλων φωτοβολταϊκών μονάδων (N_{pm}) και η χωρητικότητα της συνολικής μπαταρίας που θα χρησιμοποιηθεί στο σύστημα (C_{bat}). Για τον υπολογισμό και την οριοθέτηση αυτών, οφείλουμε αρχικά να καθορίσουμε τον αριθμό των φωτοβολταϊκών μονάδων σε σειρά (N_{sm}) καθώς και των μπαταριών σε σειρά (N_{sb}):

$$N_{sm} = \frac{V_{dc}}{V_{mp}} \quad (5.17), \quad N_{sb} = \frac{V_{dc}}{V_b} \quad (5.18)$$

Όπου το V_{mp} είναι η ονομαστική τάση του φωτοβολταϊκού μοντέλου και V_b η ονομαστική τάση της μπαταρίας.

Ο καθορισμός των ορίων των μεταβλητών απόφασης N_{pm} και C_{bat} , συναρτήσει μετεωρολογικών αλλά και τεχνικών συνθηκών είναι:

Για τον αριθμό των παράλληλων φωτοβολταϊκών μονάδων:

$$P = \frac{El}{n_{pv} * n_w * n_{inv} * A_{pv} * PSH} Sf \quad (5.19)$$

Όπου P είναι η εκτιμώμενη τιμή του συνολικού αριθμού των μονάδων, El η μέση ημερήσια ενέργεια φορτίου, n_{pv} είναι η απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ, n_w η απόδοση των καλωδίων, n_{inv} η απόδοση του μετατροπέα, A_{pv} είναι η συνολική επιφάνεια του φωτοβολταϊκού μοντέλου σε τετραγωνικά μέτρα (m^2), PSH (Peak Sun Hours) είναι ο ρυθμός των ωρών ανά ημέρα κατά τις οποίες είναι διαθέσιμη η ηλιακή ακτινοβολία 1000 W/m^2 και το Sf είναι ένας συντελεστής ασφαλείας που καθορίζεται σύμφωνα με τον σχεδιαστή του

συστήματος. Το Sf δηλαδή χρησιμοποιείται για να ληφθούν υπόψη οι απώλειες των φωτοβολταϊκών μονάδων, όπως η μείωση της απόδοσης λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, της συσσώρευσης σκόνης ή της σκίασης. Μία τυπική τιμή του Sf είναι 1,5, ωστόσο αυτό ποικίλει ανάλογα με το σύστημα[36].

Για τον υπολογισμό των ορίων της χωρητικότητας της μπαταρίας λαμβάνουμε υπόψη την ημερήσια ενεργειακή παραγωγή και τις ενεργειακές ανάγκες. Για την ακρίβεια, η απαιτούμενη χωρητικότητα της μπαταρίας υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της ημερήσιας ενεργειακής ανάγκης και της ελάχιστης ημερήσιας παραγωγής ενέργειας, πολλαπλασιαζόμενη με το βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας (Depth Of Discharge, DOD). Η αποτελεσματική χωρητικότητα της μπαταρίας είναι η απαιτούμενη διαιρώντας την με το βάθος εκφόρτισης και μετατρέποντας την από kWh σε Wh. Το ανώτατο όριο της χωρητικότητας της μπαταρίας καθορίζεται ως το πενταπλάσιο της αποτελεσματικής απαιτούμενης χωρητικότητας.

5.2.2. Αντικειμενικές συναρτήσεις

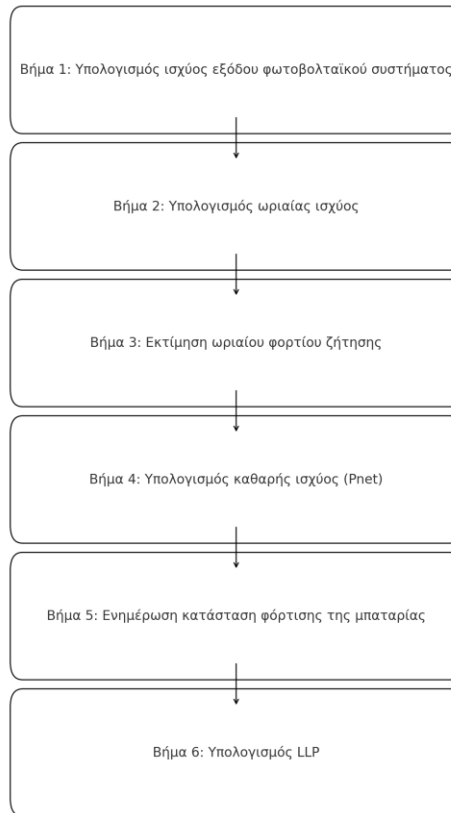
5.3.2.1. Πιθανότητα απώλειας φορτίου (Loss of Load Probability, LLP)

Για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, ως προς τη κάλυψη της ζήτησης φορτίου οποιαδήποτε στιγμή, η πιο συνηθισμένη παράμετρος που χρησιμοποιείται είναι η πιθανότητα απώλειας φορτίου. Η LLP ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του ελλείμματος ενέργειας και της ζήτησης ενέργειας για ένα συγκεκριμένο φορτίο κατά τη διάρκεια του συνολικού χρόνου λειτουργίας της εγκατάστασης, όπως εκφράζεται στην παρακάτω εξίσωση[52]:

$$LLP = \frac{\int \text{Energy deficit}}{\int \text{Energy demand}} \quad (5.20)$$

Έπειτα από εκτεταμένη αναζήτηση και πειραματισμό με διάφορες μεθόδους για τον εντοπισμό της καταλληλότερης και πιο αξιόπιστης μεθόδου υπολογισμού του LLP, καθώς και τον υπολογισμό της ισχύος εξόδου της φωτοβολταϊκής διάταξης και του ελλείμματος ενέργειας σε καθημερινή και ωριαία βάση, διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένη και γενικά αποδεκτή μέθοδος για αυτό το σκοπό. Συγκεκριμένα, η εκτίμηση του κατά πόσο η ενέργεια που παράγεται από το σύστημα είναι επαρκής για να καλύψει τη ζήτηση, αποτελεί συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό σύστημα. Ως εκ τούτου, δεν υπάρχουν συγκεκριμένες μαθηματικές εξισώσεις που να καταδεικνύουν τη σύνδεση όλων αυτών των παραμέτρων.

Συνεπώς, ακολουθώντας το πρότυπο των μπαταριών που παρουσιάστηκε παραπάνω για το τρόπο υπολογισμού της ωριαίας ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης, καθώς και τη νέα μέθοδο εύρεσης της ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού πάνελ, τα βήματα που προέκυψαν για τον υπολογισμό του LLP παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής:



Εικόνα 6: Διάγραμμα ροής υπολογισμού LLP

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, το LLP παρέχει μία ποσοτική εκτίμηση της αξιοπιστίας του φωτοβολταϊκού συστήματος σε συνδυασμό με το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

5.2.2.2. Κόστος Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost, LCC)

Η ανάλυση του κόστους κύκλου ζωής (LCC) πραγματοποιείται για να εκτιμηθεί το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, με χρήση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Μπορεί να οριστεί ως η παρούσα αξία όλων των δαπανών ενός συστήματος κατά την διάρκεια της ζωής του[53]. Το LCC είναι το άθροισμα τεσσάρων κοστών: του

αρχικού κόστους, του κόστους συντήρησης, του κόστους αντικατάστασης και της υπολειμματικής αξίας.

Το αρχικό κόστος (C_{CAP}) περιέχει το αρχικό κόστος όλων των εξαρτημάτων του συστήματος (πάνελ, μπαταρίες, μετατροπείς, ρυθμιστές φόρτισης), καθώς και το κόστος εγκατάστασης αυτών. Το αρχικό κόστος είναι ήδη στην παρούσα αξία του, ωστόσο τα υπόλοιπα κόστη εξαρτώνται από την μελλοντική αξία τους[53].

Το κόστος διατήρησης οφείλει να πληρώνεται κάθε χρόνο κατά τη διάρκεια ολόκληρης της ζωής του συστήματος. Το αρχικό ετήσιο κόστος διατήρησης κάθε εξαρτήματος υπολογίζεται ως εξής:

1. Αρχικά υπολογίζεται το ετήσιο κόστος διατήρησης των φωτοβολταϊκών μονάδων ως γινόμενο του ετήσιου ρυθμού συντήρησης των φωτοβολταϊκών μονάδων, του τελικού συνολικού αριθμού παράλληλων μονάδων (N_{pm}) και της ισχύς ανά μονάδα. Αντίστοιχα, υπολογίζεται και το ετήσιο κόστος διατήρησης της μπαταρίας, πολλαπλασιάζοντας τον ετήσιο ρυθμό συντήρησής της με τη συνολική τελική χωρητικότητα της (C_b).
2. Στη συνέχεια, για κάθε χρόνο που περνά υπολογίζεται ο συντελεστής προεξόφλησης ως εξής:

$$discount_factor = \frac{1}{((1 + dr)^{year})} \quad (5.21)$$

Όπου το dr είναι το επιτόκιο προεξόφλησης[54], η τιμή του οποίου επιλέχθηκε ίση με 3,5% [55], λιγότερο υψηλότερη από μία συνηθισμένη τιμή για τις συνθήκες της Ευρώπης σήμερα. Ο χρόνος αναφέρεται στο κάθε έτος που περνά στο διάστημα της ζωής του συστήματος. Ο συντελεστής αυτός στη συνέχεια, πολλαπλασιάζεται με το ετήσιο κόστος διατήρησης κάθε εξαρτήματος, και προκύπτει η αξία της διατήρησης τους για το εκάστοτε έτος. Για κάθε χρόνο που περνάει, δηλαδή, μειώνεται η αρχική αξία διατήρησης των εξαρτημάτων που επιδέχονται διατήρησης

3. Τέλος, τα ετήσια κόστη στη συνέχεια προστίθενται, έτσι ώστε να υπολογιστεί το ολικό κόστος διατήρησης (C_M) των εξαρτημάτων του συστήματος ανά τα χρόνια.

Το κόστος αντικατάστασης, αντιμετωπίζεται επίσης ως επαναλαμβανόμενη πληρωμή. Από τη στιγμή που δεν χρειάζεται κάθε χρόνο να αντικαθίσταται κάποιο εξάρτημα, το κόστος αντικατάστασης υπολογίζεται, παρόμοια με το κόστος συντήρησης, όπου το αρχικό κόστος του εκάστοτε εξαρτήματος που πρέπει να αντικατασταθεί πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή προεξόφλησης του έτους, όπου γίνεται η αλλαγή. Στη συνέχεια, αυτά τα κόστη για το κάθε έτος αντικατάστασης προστίθενται, για να προκύψει ξανά το συνολικό

κόστος αντικατάστασης (C_{REP}) των εξαρτημάτων που χρειάστηκαν αλλαγή, κατά τη διάρκεια της ζωής του συστήματος.

Τέλος, η υπολειμματική αξία (C_S) είναι το έσοδο που προέρχεται από την πώληση των «απορριμμάτων» του συστήματος στο τέλος της ζωής του. Η αξία αυτή θεωρείται ότι είναι το 0.14% της συνολικής παρούσας αξίας του συστήματος.

Συνεπώς, έχουμε πως το συνολικό κόστος κύκλου ζωής υπολογίζεται ως εξής[36]:

$$LCC = C_{CAP} + C_M + C_{REP} - C_S \quad (5.22)$$

5.3 Σχετική Έρευνα

Παρόμοιες μελέτες βελτιστοποίησης αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων, διαφορετικών στη μοντελοποίηση και στη κατασκευή τους, υπάρχουν πολλές. Οι Merei, Berger και Uwe Sauer πραγματοποιούν της μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος ενέργειας, που αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτρια, γεννήτρια πετρελαίου και μπαταρίες για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας, στο τέλος της οποίας προκύπτει πως η χρήση μπαταριών σε συνδυασμό με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οικονομικά και οικολογικά αποδοτική [56]. Η μελέτη των Kumari και Geethanjali αφορά την εξαγωγή παραμέτρων σχεδιασμού φωτοβολταϊκών κυψελών χρησιμοποιώντας μία βελτιωμένη εξελικτική υπολογιστική μέθοδο βασισμένη σε έναν προσαρμοστικό γενετικό αλγόριθμο (AGA) και στόχος είναι να βρεθούν οι βέλτιστες παράμετροι των κυψελών με την εφαρμογή πολλαπλών κριτηρίων, όπως η ελαχιστοποίηση μέσο τετραγωνικού σφάλματος (LSE) και η βελτιστοποίηση σφάλματος Pearson (PRO) [57]. Οι Chel, Tiwari και Chandra αξιολογούν το μέγεθος και το κόστος των συστατικών ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος και ενός ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος σε κτίριο, αναλύοντας σε εκτεταμένο βαθμό τον συντελεστή κόστους κύκλου ζωής (LCC), και πως αυτός επηρεάζεται και βελτιστοποιείται [53]. Οι Khatib, Ibrahim και Mohamed πραγματοποιούν μία ανασκόπηση μεθοδολογιών για το προσδιορισμό του μεγέθους της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και της μπαταρίας σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, με χρήση διάφορων κριτηρίων [58], ενώ οι Muhesen, Khatib και Haider παρουσιάζουν μία μελέτη σκοπιμότητας και ανάλυσης ευαισθησίας φορτίου ενός φωτοβολταϊκού συστήματος άντλησης νερού με αποθήκευση σε μπαταρία και γεννήτρια πετρελαίου, αποδεικνύοντας πως η

διαμόρφωση του συστήματος και η αρχική κατάσταση της δεξαμενής αποθήκευσης είναι πολύ σημαντική παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη [59].

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα και μελέτες που εξετάζουν το ζήτημα βελτιστοποίησης φωτοβολταϊκών συστημάτων, ωστόσο σε αυτή την εργασία η βασική ιδέα προήλθε από τους Muhssen, Nabil, Haider και Khatib οι οποίοι πραγματοποίησαν βελτιστοποίηση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος στη Βαγδάτη, χρησιμοποιώντας μία εξελεγμένη μορφή του αλγορίθμου DEMO και στη συνέχεια την υβριδική μέθοδο πολυκριτήριας ανάλυσης AHP-TOPSIS, ώστε να ληφθούν τελικά οι βέλτιστες λύσεις των κριτηρίων και των μεταβλητών απόφασης για τη βέλτιστη κατασκευή του φωτοβολταϊκού [36].

6

Δεδομένα

6.1 *Εισαγωγή*

Το υπό μελέτη σύστημα, είναι ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, το οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί σε περιοχές της Κύπρου. Για την κατασκευή του, έπεται από την χρήση των μαθηματικών σχέσεων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο για τα διάφορα εξαρτήματα που το αποτελούν και τη διασύνδεση τους, επόμενο βήμα είναι εισαγωγή των δεδομένων εισόδου σε αυτά, ώστε να ελεγχθεί η λειτουργικότητα, η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα του προς κατασκευή φωτοβολταϊκού. Τα δεδομένα εισόδου που λήφθηκαν είναι η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και το ηλεκτρικό φορτίο που καλείται να καλύψει το σύστημα σε καθημερινή βάση.

6.2 *Δεδομένα εισόδου*

6.2.1. Θερμοκρασία

Όλα τα δεδομένα θερμοκρασίας λήφθηκαν από τον ιστότοπο NSRDB: National Solar Radiation Database. Οι περιοχές που επιλέχθηκαν για την κατασκευή και εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι τρεις πόλεις της Κύπρου: η Λεμεσός, η Λάρνακα και η Λευκωσία. Η χώρα της Κύπρου επιλέχθηκε λόγω της μεγάλης ηλιοφάνειας που παρουσιάζει κατά τη διάρκεια σχεδόν ολόκληρου του χρόνου, καθώς και των υψηλών θερμοκρασιών της. Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν τη κατανομή της θερμοκρασίας για κάθε μήνα του

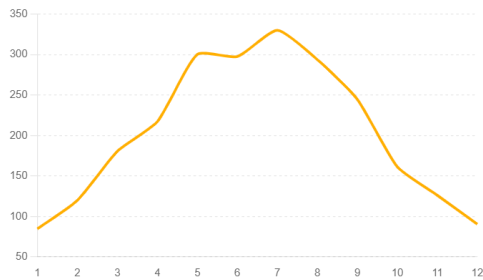
έτους 2019, καθώς και το πότε παρουσιάστηκαν οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια αυτή:



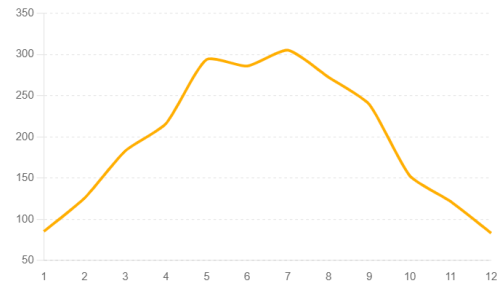
Παρατηρούμε πως το μέγιστο των θερμοκρασιών, και στις τρεις πόλεις παρουσιάζεται τον όγδοο μήνα του έτους, τον Αύγουστο. Πιο συγκεκριμένα, στη Λευκωσία η μέγιστη θερμοκρασία παρουσιάζεται στις 11 Αυγούστου και ώρα 13:30, με τιμή 36.1° C, στη Λεμεσό 11 Αυγούστου και ώρα 11:30 με μέγιστη τιμή 34.1° C, ενώ στη Λάρνακα στις 12 Αυγούστου και ώρα 12:30, με τιμή 35.3° C. Αντίθετα, η ελάχιστες τιμές των θερμοκρασιών παρουσιάζονται και στις 3 περιπτώσεις την 9^η Ιανουαρίου και ώρα 05:30, με τιμές 7.7° C, 9.0°C και 8.8° C αντίστοιχα.

6.2.2. Ηλιακή ακτινοβολία

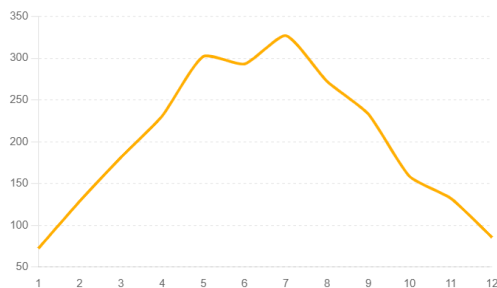
Τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας των επιμέρους πόλεων, λήφθηκαν επίσης από τον ίδιο ιστότοπο για το έτος 2019, και παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 13: Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία Λευκωσίας, 2019



Εικόνα 14: Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία Λάρνακας, 2019



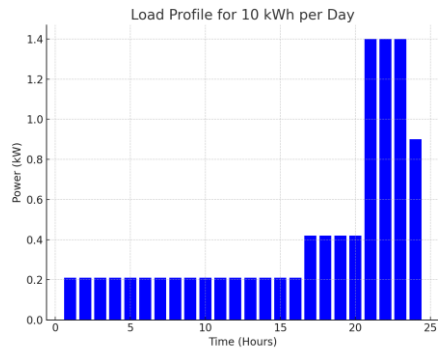
Εικόνα 15: Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία Λεμεσού, 2019

Η μονάδα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2). Στη συγκεκριμένη περίπτωση των τριών πόλεων, υψηλότερες τιμές παρουσιάζονται όπως είναι φυσικό, τους καλοκαιρινούς μήνες του χρόνου, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, ενώ πιο συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή της για κάθε πόλη είναι: για την Λευκωσία έχουμε μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία την 1^η Ιουλίου και ώρα 11:30, με τιμή 1024 W/m^2 , στη Λεμεσό για την ίδια ημερομηνία και ώρα, με τιμή 1016 W/m^2 , ενώ για τη Λάρνακα πάλι στις 2 Ιουλίου και ώρα 11:30 με τιμή 1016 W/m^2 . Η ελάχιστη ηλιακή ακτινοβολία είναι και για τις τρεις περιπτώσεις μηδενική, κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών.

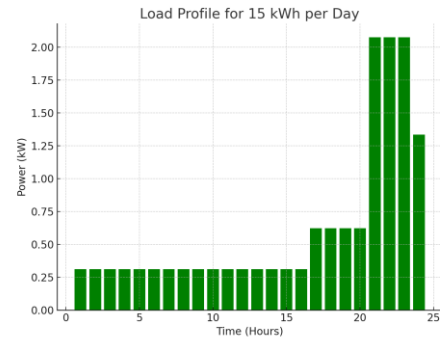
6.2.3. Φορτίο

Ως παραδοχή για την υλοποίηση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, θα μελετηθούν τρεις περιπτώσεις φορτίων. Πρόκειται για 10, 15 και 20

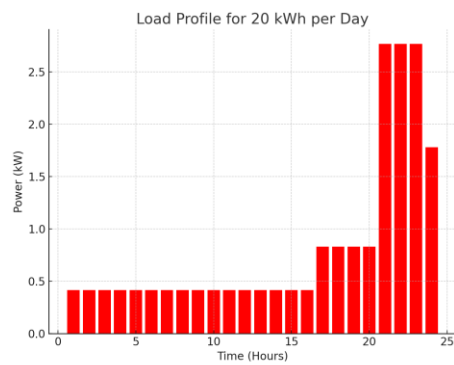
kWh μέσο όρο καθημερινά. Τρία υποθετικά ωριαία προφίλ που δείχνουν τη κατανομή του φορτίου που θα απαιτείται κατά τη διάρκεια της ημέρας, για τις τρεις περιπτώσεις, και θα επαναλαμβάνεται για όλο το έτος, είναι τα παρακάτω:



Εικόνα 16: Ημερήσιο προφίλ ισχύος, 10 kWh



Εικόνα 17: Ημερήσιο προφίλ ισχύος, 15 kWh



Εικόνα 18: Ημερήσιο προφίλ ισχύος, 20 kWh

7

Αποτελέσματα

7.1 Εισαγωγή

Για την παραγωγή βέλτιστων λύσεων, ως προς τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, LLP και LCC, χρησιμοποιήθηκαν τρεις αλγόριθμοι: ο NSGA-II, ο Particle Swarm Optimization και ο DEMO. Τα μέτωπα Παρέτο τα οποία σχηματίστηκαν και από τις τρεις περιπτώσεις, παρείχαν πληροφορίες για τις καλύτερες λύσεις, ενώ στη συνέχεια με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων, προέκυψε ποια από τις τρεις μεθόδους παρείχε τελικά τα καλύτερα αποτελέσματα. Τέλος, μέσω των τεσσάρων πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων, AHP-TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE και VIKOR, προκύπτει η βέλτιστη λύση και τελικά οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης N_{pm} και C_{bat} , καθώς και των LLP και LCC.

Στους παρακάτω πίνακες, παρουσιάζονται τα εξαρτήματα, οι τύποι, τα χαρακτηριστικά και οι αντίστοιχες τιμές τους. Η επιλογή των συγκεκριμένων εξαρτημάτων έγινε βάσει της σύγχρονης αγοράς, των τρεχουσών τιμών και των διαθέσιμων τεχνολογιών, καθώς και με γνώμονα την ικανοποίηση των απαιτήσεων του προβλήματος.

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων για τη κατασκευή του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος

Component	Specification	Value
PV Panel (JA Solar JAM72S10-405/PR)[60]	Maximum power at STC (P_{max})	405 W
	Voltage at maximum power point (V_{mp})	41.4 V
	Current at maximum power point (I_{mp})	9.77 A
	Open-circuit voltage (V_{oc})	49.1 V

	Short-circuit current (I_{sc})	10.32 A
	Efficiency at STC (η_{pv})	20.33%
	Module Area (A_{pv})	2.02 m ²
Battery (<i>Trojan T-150 Renewable Energy Battery</i>)[61]	Nominal Voltage (V)	6 V
	Nominal Capacity (Ah)	150 Ah
	Charge/Discharge Efficiency (η_b)	85-90 %
	Maximum State of Charge (SOC _{max})	100 %
	Minimum State of Charge (SOC _{min})	20 %
Inverter (<i>SMA Sunny Boy 5.0</i>)[62]	Efficiency (η_{inv})	97 %
	Nominal Voltage (V_{AC})	230 V
	DC Voltage (V_{DC})	175 - 500 V
Charge Controller (<i>Victron Energy SmartSolar MPPT 150/35</i>)[63]	Type	MPPT
	Efficiency	98 %
	Maximum PV Open Circuit Voltage (V)	150 V
	Maximum Charge Current (A)	35 A
Load	AC Voltage (V_{AC})	230 V
	DC Voltage (V_{DC})	12 V
	Daily Average Load Energy	10-20 kWh

Πίνακας 2: Κόστη ανά μονάδα για τα στοιχεία και τις υπηρεσίες του συστήματος

Component	Specification	Estimated Cost (€)
PV Module	120 Wp	160 / module
Battery	225 Ah, 12 V	200 / unit
Inverter	5kW	1.200
Charge Controller	MPPT	400
Installation	Residential setup	1.000 – 2.000
PV Maintenance	Wp / year	0.05 / Wp
Battery Maintenance	Wh / year	0.003 / Wh
Replacement Cost	% battery cost / year	25 % of battery cost
Circuit Breaker	Standard unit	30
Miscellaneous	Wiring, mounting, etc.	200 - 400

7.2 Μετρήσεις Αλγορίθμων

Έπειτα από πολλές δοκιμές και πειράματα, για τους αλγορίθμους NSGA-II και DEMO, όπου χρειάστηκε να καθοριστεί η πιο κατάλληλη τιμή του παράγοντα μετάλλαξης,

διασταύρωσης αλλά και του μεγέθους των μέγιστων γενεών και πληθυσμού, προέκυψε πως ο συνδυασμός που παρουσίαζε τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν ο:

$$F = 0.05, CR = 0.7, \text{max_generations} = 35, \text{population_size} = 120$$

Καλύτερα αποτελέσματα ορίστηκαν αυτά στα οποία διαπιστωνόταν μικρότερη δυνατή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης LLP, σε ελάχιστο και σε μέγιστο, στην οποία δόθηκε μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με την LCC. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει όλους τους συνδυασμούς που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση βέλτιστων λύσεων:

Πίνακας 3: Αριθμητικές δοκιμές τιμών των παραμέτρων του NSGA-II

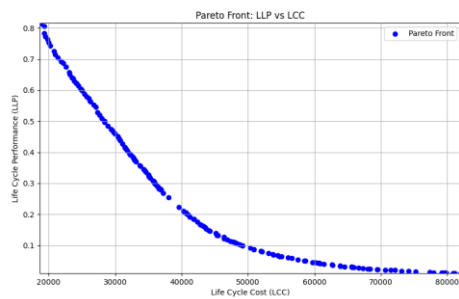
Max_gen = 35		
Population_size = 100		
F	CR	Min_LL
0.05	0.7	0.004 (-0.81)
0.2	0.7	0.0046(-0.8)
0.75	0.5	0.0045(-0.81)
0.05	0.3	0.005(-0.8)
Population_size = 80		
0.05	0.7	0.00439(-0.8)
0.2	0.7	0.00439(-0.78)
0.75	0.5	0.0047(-0.78)
0.75	0.7	0.0049(-0.76)
0.2	0.5	0.0046(-0.78)
Population_size = 120		
0.05	0.7	0.00439(-0.7)
0.75	0.5	0.00439(-0.8)
0.2	0.7	0.004(-0.81)
0.05	0.45	0.0045(-0.82)
0.05	0.3	0.005(-0.81)
Max_gen = 45		
Population_size = 120		
0.75	0.5	0.00439(-0.8)
0.05	0.7	0.0048(-0.81)
0.15	0.5	0.0044(-0.79)

Από την άλλη, στον αλγόριθμο Particle Swarm Optimization, ο αριθμός των επαναλήψεων αλλά και του αριθμού των particles, ορίστηκε εμπειρικά, βάση άλλων προβλημάτων βελτιστοποίησης 2 αντικειμενικών συναρτήσεων, οπότε τελικά ήταν:

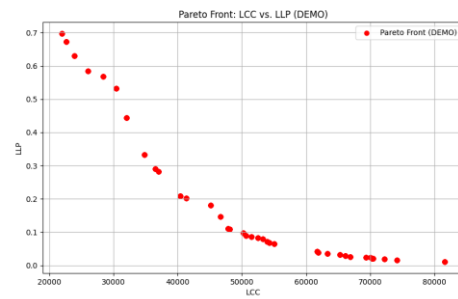
$$\text{Num_particles} = 30, \text{max_iterations} = 100$$

Για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις φορτίου, τις τρεις διαφορετικές πόλεις της Κύπρου, αλλά και για τους τρεις αλγορίθμους που εφαρμόστηκαν για την παραγωγή αποτελεσμάτων έχουμε τα εξής:

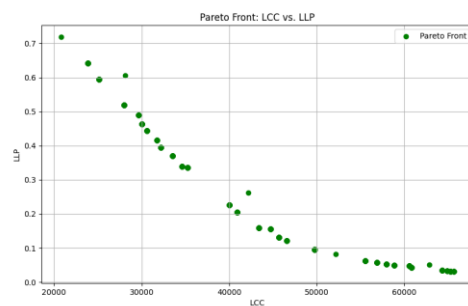
Για την περίπτωση των 10kWh στη Λευκωσία:



Εικόνα 19: NSGA-II Pareto front

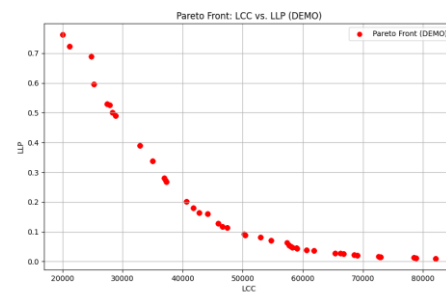
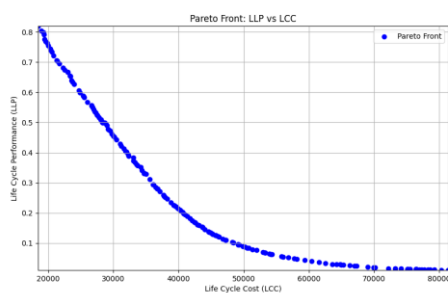


Εικόνα 20: DEMO Pareto front

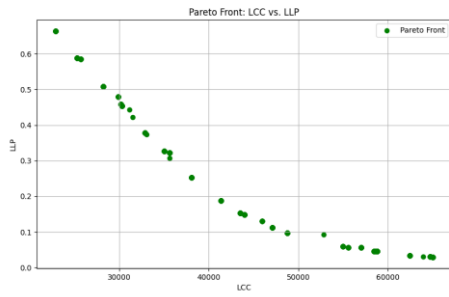


Εικόνα 21: PSO Pareto front

Για την περίπτωση των 10kWh στη Λάρνακα:



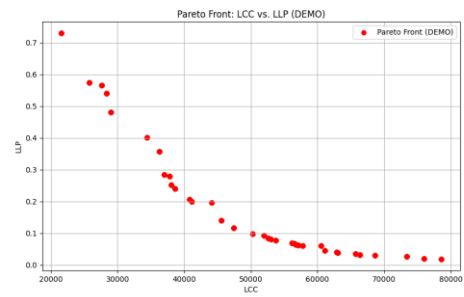
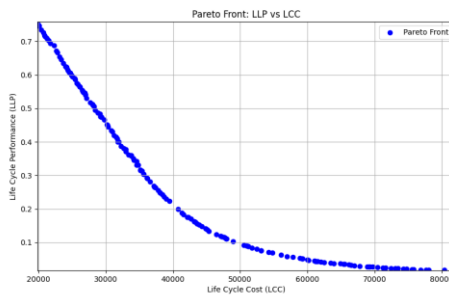
Εικόνα 22: NSGA-II Pareto front



Εικόνα 23: DEMO Pareto front

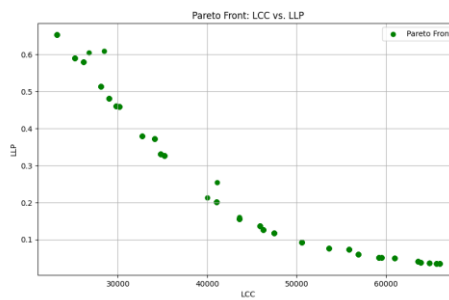
Εικόνα 24: PSO Pareto front

Για την περίπτωση των 10kWh στη Λεμεσό:



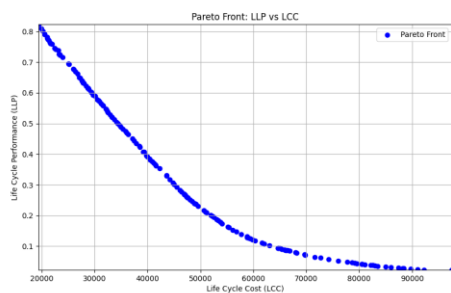
Εικόνα 25: NSGA-II Pareto front

Εικόνα 26: DEMO Pareto front

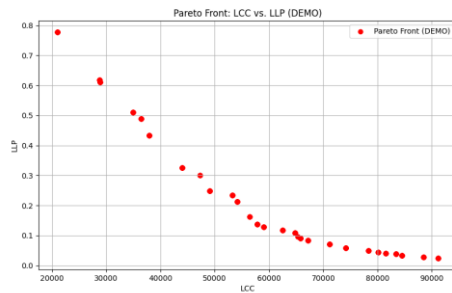


Εικόνα 27: PSO Pareto front

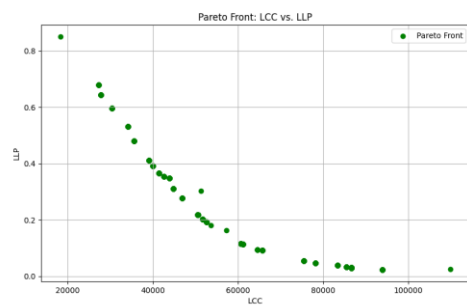
Για την περίπτωση των 15kWh στη Λευκωσία:



Εικόνα 28: NSGA-II Pareto front

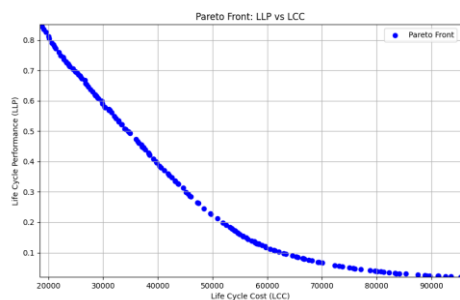


Εικόνα 29: DEMO Pareto front

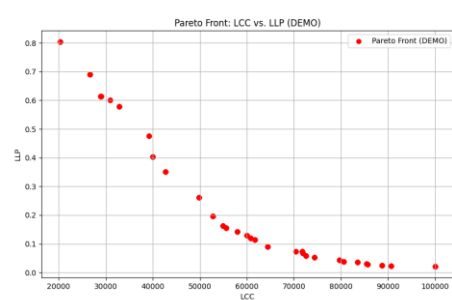


Εικόνα 30: PSO Pareto front

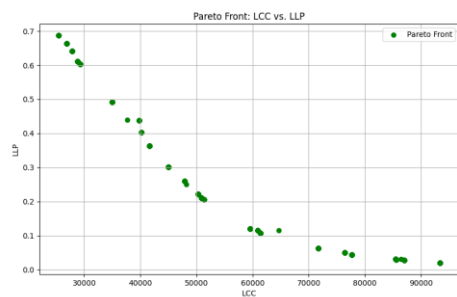
Για την περίπτωση των 15kWh στη Λάρνακα:



Εικόνα 31: NSGA-II Pareto front

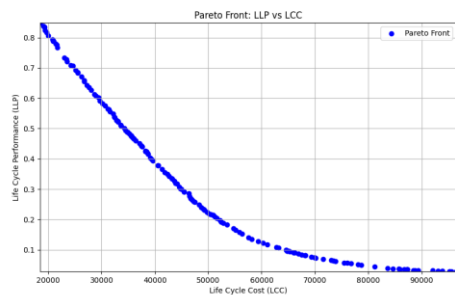


Εικόνα 32: DEMO Pareto front

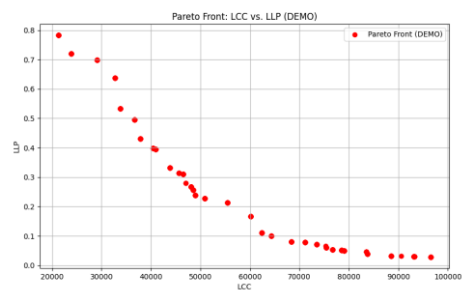


Εικόνα 33: PSO Pareto front

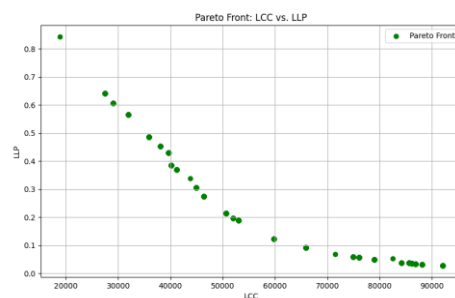
Για την περίπτωση των 15kWh στη Λεμεσό:



Εικόνα 34: NSGA-II Pareto front

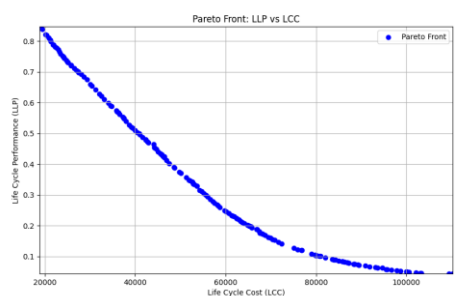


Εικόνα 35: DEMO Pareto front

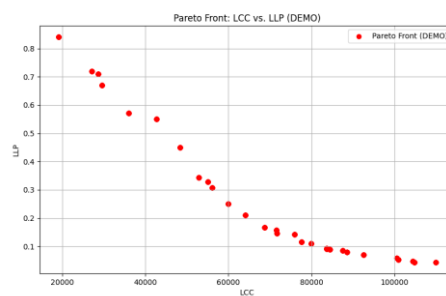


Εικόνα 36: PSO Pareto front

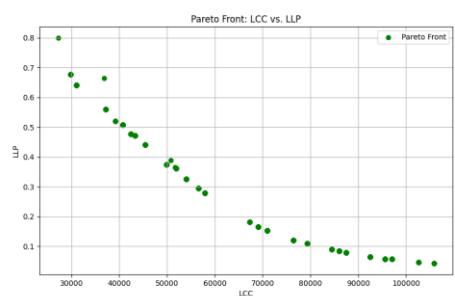
Για την περίπτωση των 20kWh στη Λευκωσία:



Εικόνα 37: NSGA-II Pareto front

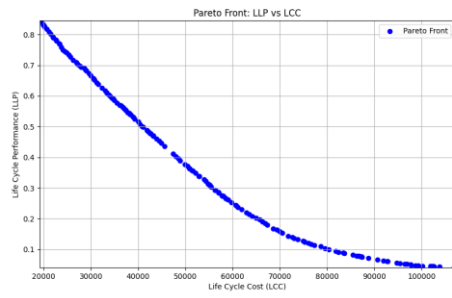


Εικόνα 38: DEMO Pareto front

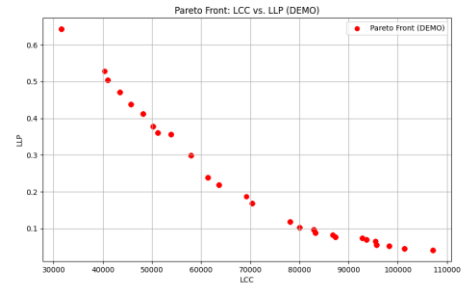


Εικόνα 39: PSO Pareto front

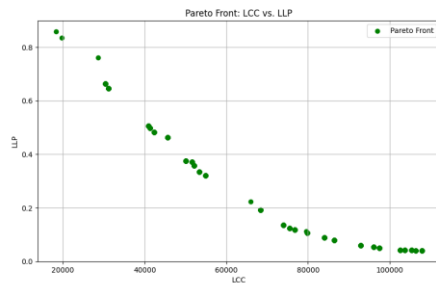
Για την περίπτωση των 20kWh στη Λάρνακα:



Εικόνα 40: NSGA-II Pareto front

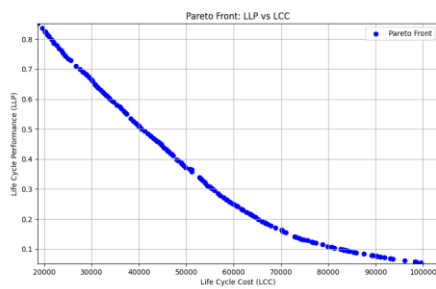


Εικόνα 41: DEMO Pareto front

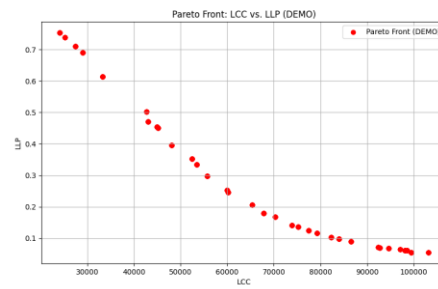


Εικόνα 42: PSO Pareto front

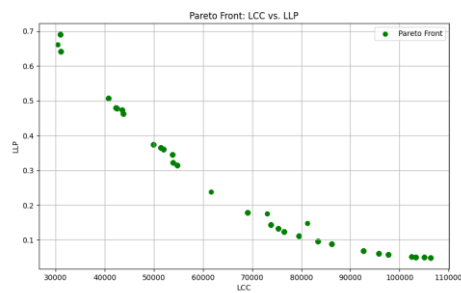
Για την περίπτωση των 20kWh στη Δεμεσό:



Εικόνα 43: NSGA-II Pareto front



Εικόνα 44: DEMO Pareto front



Εικόνα 45: Particle Swarm Pareto front

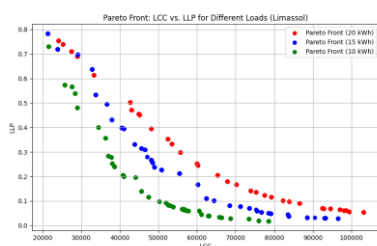
7.3

Συμπεράσματα αλγορίθμων

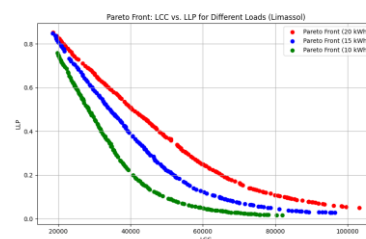
Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, διαπιστώνεται πως σε όλες τις περιπτώσεις πόλεων, φορτίων και αλγορίθμων, ο NSGA-II παρουσιάζει μεγαλύτερη ποικιλομορφία, αγγίζοντας όλο το φάσμα των τιμών ανάμεσα στη μέγιστη και ελάχιστη τιμή και των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων. Επιπλέον, σε σχεδόν όλες τις περιπτώσεις, επιτυγχάνει τόσο τις μικρότερες όσο και τις μεγαλύτερες τιμές για τις LLP και LCC. Ωστόσο, παρατηρείται ότι και οι τρεις αλγόριθμοι παρουσιάζουν πολύ κοντινά αποτελέσματα, με ορισμένες από τις βέλτιστες λύσεις που εμφανίζονται στα μέτωπα Pareto να είναι κοινές σε αρκετές περιπτώσεις.

Όσον αφορά τα διαφορετικά φορτία, στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα κάθε πόλης με τον αντίστοιχο αλγόριθμο υπολογισμού των βέλτιστων τελικών λύσεων. Οι περιπτώσεις των τριών φορτίων απεικονίζονται συγκεντρωτικά σε ένα διάγραμμα, ώστε να αναδειχθούν οι διαφορές στη διακύμανση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων που προκύπτουν από την αλλαγή του φορτίου:

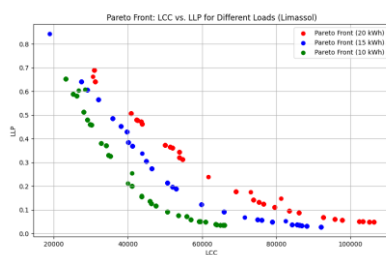
Λεμεσός



Εικόνα 46: DEMO 3 cases

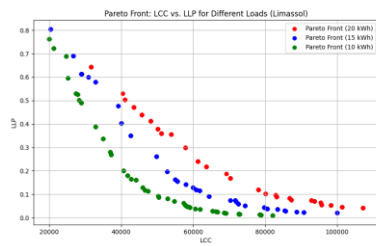


Εικόνα 47: NSGA-II 3 cases

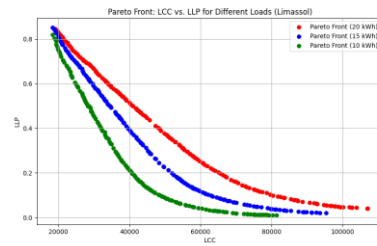


Εικόνα 48: PSO 3 cases

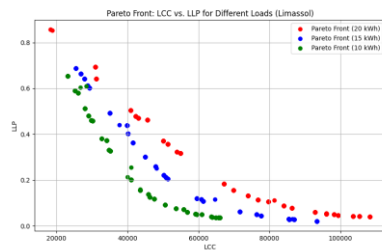
Δάρνακα



Εικόνα 37: DEMO 3 cases

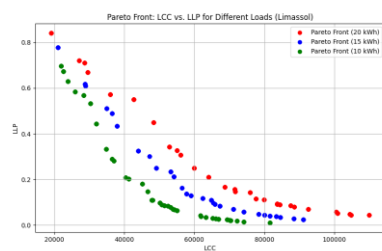


Εικόνα 38: NSGA-II 3 cases

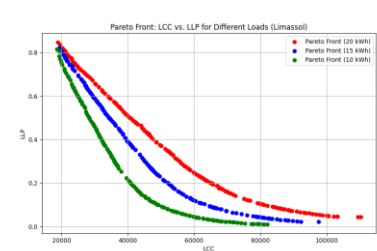


Εικόνα 39: PSO 3 cases

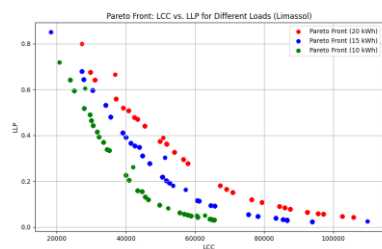
Λευκωσία



Εικόνα 37: DEMO 3 cases



Εικόνα 49: NSGA-II 3 cases



Εικόνα 50: PSO 3 cases

Η σύγκριση των τριών μετώπων δείχνει ότι καθώς το φορτίο αυξάνεται, το μέτωπο Pareto μετακινείται προς τα δεξιά και πάνω, επιδεικνύοντας αύξηση των τιμών των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων. Αυτό υποδηλώνει ότι μεγαλύτερα φορτία οδηγούν σε μεγαλύτερη πιθανότητα απώλειας φορτίου και υψηλότερο κόστος κύκλου ζωής. Επιπλέον, οι τιμές για το LLP και το LCC δείχνουν μεγαλύτερη διασπορά για το φορτίο των 20 kWh, κάτι που υποδηλώνει ότι μεγαλύτερα φορτία παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση στις αντικειμενικές συναρτήσεις. Αντίθετα, τα μικρότερα φορτία (10 kWh και 15 kWh) έχουν μικρότερη διασπορά τιμών.

7.4 Μετρήσεις Πολυκριτηριακών Μεθόδων

7.4.1. Αποτελέσματα Πολυκριτηριακών μεθόδων

Κατόπιν της εύρεσης των βέλτιστων λύσεων κάθε περίπτωσης φορτίου, πόλης και αλγορίθμου σειρά έχουν οι πολυκριτηριακές μέθοδοι, οι οποίες αναλαμβάνουν την επιλογή της καλύτερης μεταξύ των βέλτιστων λύσεων, βάσει των χαρακτηριστικών της κάθε περίπτωσης. Πιο συγκεκριμένα, κάθε μέθοδος παρουσιάζει τις 5 πιο βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν βάσει του τρόπου υπολογισμού τους.

Σε όλες τις πολυκριτηριακές μεθόδους λήψης αποφάσεων που εφαρμόστηκαν για την παραγωγή βέλτιστων λύσεων, χρησιμοποιήθηκαν ίδια βάρη για τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Συγκεκριμένα, υλοποιήθηκαν δύο περιπτώσεις βαρών: μία με τιμή 0.8 για την LLP και 0.2 για την LCC, και μία όπου τα βάρη των δυο αντικειμενικών συναρτήσεων ήταν ίσα, δηλαδή 0.5. Η επιλογή αυτών των βαρών, έγινε ώστε να παρουσιαστούν οι διαφορές ανάμεσα στις βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν, όταν δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών έναντι του κόστους του συστήματος και όταν τα δύο θεωρούνται εξίσου σημαντικά. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την κάθε πόλη, φορτίο και αλγόριθμο που χρησιμοποιείται την εκάστοτε φορά είναι τα παρακάτω (παρουσιάζονται οι 5 καλύτερες λύσεις που προέκυψαν):

Αρχικά παρουσιάζεται η περίπτωση των βαρών 0.8, 0.2, με τη πρώτη μέθοδο που χρησιμοποιείται να είναι η AHP-TOPSIS:

Πίνακας 4: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία 10 kWh, AHP-TOPSIS

Λευκωσία, 10kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0455, 'LCC': 59670.7675}, Closeness Coefficient: 0.8948
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.0535, 'LCC': 57489.5304}, Closeness Coefficient: 0.8944
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.043, 'LCC': 60546.9985}, Closeness Coefficient: 0.8943
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.05, 'LCC': 58674.3593}, Closeness Coefficient: 0.8943
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.0427, 'LCC': 60664.7888}, Closeness Coefficient: 0.8942
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0352, 'LCC': 63360.3891}, Closeness Coefficient = 0.9116
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0392, 'LCC': 61884.5171}, Closeness Coefficient = 0.9022
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.03153, 'LCC': 65278.204}, Closeness Coefficient = 0.3783
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0266, 'LCC': 66875.3457}, Closeness Coefficient = 0.2110
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0298, 'LCC': 66083.2485}, Closeness Coefficient = 0.1093
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0629, 'LCC': 55524.6475}, Closeness Coefficient = 0.9058
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0495, 'LCC': 58801.1588}, Closeness Coefficient = 0.9053
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0531, 'LCC': 57912.6661}, Closeness Coefficient = 0.8987
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0571, 'LCC': 56850.1317}, Closeness Coefficient = 0.8568
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.043, 'LCC': 60823.1662}, Closeness Coefficient = 0.7439

Πίνακας 5: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 10 kWh, AHP-TOPSIS

Λάρνακα, 10 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0469, 'LCC': 58173.6822}, Closeness Coefficient: 0.8948
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.0516, 'LCC': 56862.1559}, Closeness Coefficient: 0.8947
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.0488, 'LCC': 57710.2662}, Closeness Coefficient: 0.8947
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.0548, 'LCC': 56014.0092}, Closeness Coefficient: 0.8944
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.0432, 'LCC': 59396.787}, Closeness Coefficient: 0.8942
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0363, 'LCC': 61870.1825}, Closeness Coefficient = 0.9200
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0389, 'LCC': 60590.9592}, Closeness Coefficient = 0.9197
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0284, 'LCC': 65331.5474}, Closeness Coefficient = 0.9128
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0441, 'LCC': 59032.3653}, Closeness Coefficient = 0.8367
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0270, 'LCC': 66248.6515}, Closeness Coefficient = 0.6574
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0629, 'LCC': 55524.6475}, Closeness Coefficient = 0.9058
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0495, 'LCC': 58801.1588}, Closeness Coefficient = 0.9053
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0531, 'LCC': 57912.6661}, Closeness Coefficient = 0.8987
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0571, 'LCC': 56850.1317}, Closeness Coefficient = 0.8568
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.043, 'LCC': 60823.1662}, Closeness Coefficient = 0.7439

Πίνακας 6: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 10 kWh, AHP-TOPSIS

Λεμεσός, 10 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0589, 'LCC': 56943.5076}, Closeness Coefficient: 0.8869
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.0559, 'LCC': 57873.1357}, Closeness Coefficient: 0.8869
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.0479, 'LCC': 60023.0312}, Closeness Coefficient: 0.8868
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.0475, 'LCC': 60192.5357}, Closeness Coefficient: 0.8866
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.0528, 'LCC': 58899.6004}, Closeness Coefficient: 0.8866
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0321, 'LCC': 66370.5077}, Closeness Coefficient = 0.9209
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0345, 'LCC': 65737.0871}, Closeness Coefficient = 0.9125
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0390, 'LCC': 63073.0859}, Closeness Coefficient = 0.8997
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0393, 'LCC': 62908.5032}, Closeness Coefficient = 0.8829
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0447, 'LCC': 61136.1091}, Closeness Coefficient = 0.7477
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0518, 'LCC': 59214.7423}, Closeness Coefficient = 0.8945
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0406, 'LCC': 63613.2807}, Closeness Coefficient = 0.8525
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0503, 'LCC': 60954.3555}, Closeness Coefficient = 0.5242
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0598, 'LCC': 56923.5228}, Closeness Coefficient = 0.3262
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0506, 'LCC': 59529.2122}, Closeness Coefficient = 0.3230

Πίνακας 7: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία 15 kWh, AHP-TOPSIS

Λευκωσία, 15 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.065, 'LCC': 71571.8243}, Closeness Coefficient: 0.8636
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.0724, 'LCC': 69683.7899}, Closeness Coefficient: 0.8634
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.0721, 'LCC': 69779.8604}, Closeness Coefficient: 0.8634
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.0729, 'LCC': 69651.2979}, Closeness Coefficient: 0.8632
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.0621, 'LCC': 72724.2623}, Closeness Coefficient: 0.8627
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0579, 'LCC': 74120.6821}, Closeness Coefficient = 0.9033
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0437, 'LCC': 80097.6303}, Closeness Coefficient = 0.7462
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0395, 'LCC': 81536.5291}, Closeness Coefficient = 0.7462
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0488, 'LCC': 78360.2483}, Closeness Coefficient = 0.4605
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0385, 'LCC': 83349.8692}, Closeness Coefficient = 0.3890
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0332, 'LCC': 85400.3798}, Closeness Coefficient = 0.8976
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0393, 'LCC': 83425.3379}, Closeness Coefficient = 0.8976
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0542, 'LCC': 75500.8528}, Closeness Coefficient = 0.7618
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0299, 'LCC': 86626.0142}, Closeness Coefficient = 0.5886
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0466, 'LCC': 78189.6982}, Closeness Coefficient = 0.5359

Πίνακας 8: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 15 kWh, AHP-TOPSIS

Λάρνακα, 15 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0688, 'LCC': 69240.2017}, Closeness Coefficient: 0.8694
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.0681, 'LCC': 69497.4261}, Closeness Coefficient: 0.8693
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.0664, 'LCC': 70053.1768}, Closeness Coefficient: 0.8691
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.0579, 'LCC': 72315.0469}, Closeness Coefficient: 0.8689
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.0752, 'LCC': 67597.5131}, Closeness Coefficient: 0.8687
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0432, 'LCC': 79720.7033}, Closeness Coefficient = 0.9029
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0375, 'LCC': 80595.1318}, Closeness Coefficient = 0.8992
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0354, 'LCC': 83474.7649}, Closeness Coefficient = 0.8897
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0518, 'LCC': 74401.0951}, Closeness Coefficient = 0.8611
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0583, 'LCC': 72547.6497}, Closeness Coefficient = 0.8210
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0624, 'LCC': 71697.4632}, Closeness Coefficient = 0.8875
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0445, 'LCC': 77679.2125}, Closeness Coefficient = 0.7117
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0496, 'LCC': 76400.5835}, Closeness Coefficient = 0.5810
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0307, 'LCC': 85496.9407}, Closeness Coefficient = 0.1796
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0288, 'LCC': 85538.3962}, Closeness Coefficient = 0.1796

Πίνακας 9: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 15 kWh, AHP-TOPSIS

Λεμεσός, 15 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.073, 'LCC': 70080.4614}, Closeness Coefficient: 0.8731
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.074, 'LCC': 69909.3918}, Closeness Coefficient: 0.8728
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.0767, 'LCC': 69307.3959}, Closeness Coefficient: 0.8724
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.069, 'LCC': 71567.2505}, Closeness Coefficient: 0.8724
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.0808, 'LCC': 68243.0459}, Closeness Coefficient: 0.8720
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0506, 'LCC': 78527.1758}, Closeness Coefficient = 0.8965
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.06032, 'LCC': 75461.596}, Closeness Coefficient = 0.8700
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0492, 'LCC': 79096.1032}, Closeness Coefficient = 0.7492
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.05374, 'LCC': 76663.099}, Closeness Coefficient = 0.5182
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.06631, 'LCC': 75265.289}, Closeness Coefficient = 0.1238
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0698, 'LCC': 71482.3414}, Closeness Coefficient = 0.9116
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0495, 'LCC': 78954.1391}, Closeness Coefficient = 0.9105
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0587, 'LCC': 74918.6064}, Closeness Coefficient = 0.8996
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0581, 'LCC': 76076.3182}, Closeness Coefficient = 0.5823
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0379, 'LCC': 84173.024}, Closeness Coefficient = 0.5823

Πίνακας 10: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία 20 kWh, AHP-TOPSIS

Λευκωσία, 20 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0897, 'LCC': 83985.7914}, Closeness Coefficient: 0.8564
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.0862, 'LCC': 85053.0064}, Closeness Coefficient: 0.8564
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.0916, 'LCC': 83581.3178}, Closeness Coefficient: 0.8561
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.0963, 'LCC': 82039.4361}, Closeness Coefficient: 0.8561
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.0894, 'LCC': 84306.2418}, Closeness Coefficient: 0.8560
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0699, 'LCC': 92559.0123}, Closeness Coefficient = 0.8867
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0854, 'LCC': 87498.2984}, Closeness Coefficient = 0.8854
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0911, 'LCC': 83694.3398}, Closeness Coefficient = 0.8498
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0791, 'LCC': 88585.7019}, Closeness Coefficient = 0.3514
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0890, 'LCC': 84386.7732}, Closeness Coefficient = 0.1930
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0649, 'LCC': 92495.2133}, Closeness Coefficient = 0.8398
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0898, 'LCC': 84477.3783}, Closeness Coefficient = 0.8245
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0783, 'LCC': 87508.3784}, Closeness Coefficient = 0.5653
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0835, 'LCC': 85978.2017}, Closeness Coefficient = 0.4330
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0578, 'LCC': 95631.1375}, Closeness Coefficient = 0.2009

Πίνακας 11: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 20 kWh, AHP-TOPSIS

Λάρνακα, 20 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0876, 'LCC': 83610.8918}, Closeness Coefficient: 0.8470
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.0917, 'LCC': 82467.3222}, Closeness Coefficient: 0.8469
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.0941, 'LCC': 81809.6692}, Closeness Coefficient: 0.8468
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.089, 'LCC': 83386.6339}, Closeness Coefficient: 0.8467
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.082, 'LCC': 85446.2547}, Closeness Coefficient: 0.8463
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0768, 'LCC': 87296.1102}, Closeness Coefficient = 0.8953
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0554, 'LCC': 95703.7372}, Closeness Coefficient = 0.3909
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0531, 'LCC': 98209.2146}, Closeness Coefficient = 0.3909
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0445, 'LCC': 101348.316}, Closeness Coefficient = 0.2983
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0642, 'LCC': 95457.9327}, Closeness Coefficient = 0.1117
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0649, 'LCC': 92495.2133}, Closeness Coefficient = 0.8398
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0898, 'LCC': 84477.3783}, Closeness Coefficient = 0.8245
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0783, 'LCC': 87508.3784}, Closeness Coefficient = 0.5653
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0835, 'LCC': 85978.2017}, Closeness Coefficient = 0.4330
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0578, 'LCC': 95631.1375}, Closeness Coefficient = 0.2009

Πίνακας 12: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 20 kWh, AHP-TOPSIS

Λεμεσός, 20 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0919, 'LCC': 84444.3978}, Closeness Coefficient: 0.8481
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.0953, 'LCC': 83658.6531}, Closeness Coefficient: 0.8479
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.1035, 'LCC': 81300.079}, Closeness Coefficient: 0.8479
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.0971, 'LCC': 83183.9141}, Closeness Coefficient: 0.8479
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.0942, 'LCC': 83978.8312}, Closeness Coefficient: 0.8478
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0682, 'LCC': 94571.8337}, Closeness Coefficient = 0.8789
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0690, 'LCC': 92756.1101}, Closeness Coefficient = 0.8763
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.09848, 'LCC': 83911.092}, Closeness Coefficient = 0.8702
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.09003, 'LCC': 86518.429}, Closeness Coefficient = 0.4351
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0712, 'LCC': 92421.8562}, Closeness Coefficient = 0.1428
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0883, 'LCC': 86135.6445}, Closeness Coefficient = 0.8908
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0616, 'LCC': 95796.7245}, Closeness Coefficient = 0.8879
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0692, 'LCC': 92661.6528}, Closeness Coefficient = 0.8815
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0963, 'LCC': 83429.0846}, Closeness Coefficient = 0.3654
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.058, 'LCC': 97709.7732}, Closeness Coefficient = 0.1462

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα της υβριδικής μεθόδου AHP-TOPSIS, παρατηρούνται τα εξής αποτελέσματα:

1. Ανάλυση Αλγορίθμων: Σε όλους τους αλγορίθμους, η εύρεση των βέλτιστων λύσεων βασίζεται στην εγγύτητα μιας λύσης προς την ιδανική λύση. Συγκεκριμένα, η καλύτερη λύση είναι αυτή που είναι πιο κοντά στην ιδανική και ταυτόχρονα πιο μακριά από την αρνητική ιδανική λύση. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής εγγύτητας (closeness coefficient) παρουσιάζει υψηλότερες τιμές στον αλγόριθμο DEMO, καθώς οι τιμές του LLP, που φέρουν μεγαλύτερη επιβάρυνση προτίμησης από την LCC, είναι χαμηλότερες. Ωστόσο, τα αποτελέσματα του αλγορίθμου DEMO παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στις επιδόσεις του, φαινόμενο που παρατηρείται σε όλες τις πόλεις και τα φορτία. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι NSGA-II και PSO παρέχουν σχετικά ισορροπημένες λύσεις για όλα τα φορτία, με σχετικά υψηλούς συντελεστές εγγύτητας και χαμηλά LLP.
2. Επίδραση αύξησης φορτίου: Με την αύξηση του φορτίου από 10, 15 και 20 kWh, οι τιμές των LLP και LCC. Συνεπώς, κατά την εκτέλεση των πολυκριτηριακών μεθόδων, οι πέντε βέλτιστες τιμές που προκύπτουν από τους τρεις αλγόριθμους θα είναι υψηλότερες σε σχέση με το μικρότερο απαιτούμενο φορτίο και για τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Ενδεικτικά, στη Λευκωσία για τον αλγόριθμο DEMO, οι

βέλτιστες λύσεις για τα τρία διαφορετικά φορτία είναι: {'LLP': 0.0321, 'LCC': 66370.5077}, {'LLP': 0.0579, 'LCC': 74120.6821} και {'LLP': 0.0699, 'LCC': 92559.0123} αντίστοιχα. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και για τους αλγορίθμους NSGA-II και Particle Swarm Optimization.

3. Ανάλυση κατά πόλη: Όσον αφορά τις πόλεις, οι τιμές των λύσεων που προκύπτουν είναι παρόμοιες λόγω των κοντινών τιμών ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που καταγράφονται κατά τη διάρκεια του χρόνου. Μικρή διαφορά, σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση LLP, παρατηρείται στη Λευκωσία, η οποία και στα τρία φορτία παρουσιάζει τη μικρότερη δυνατή τιμή του LLP, υποδεικνύοντας υψηλότερη ηλιακή ακτινοβολία και καλύτερη ικανοποίηση της ανάγκης για το εκάστοτε φορτίο. Ωστόσο, οι διαφορές αυτές είναι ελάχιστες.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η μέθοδος VIKOR, κατά την οποία προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 13: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία 10 kWh, VIKOR

Λευκωσία, 10kWh
NSGA-II
LLP: 0.0706, LCC: 53759.7033
LLP: 0.0802, LCC: 52105.6088
LLP: 0.0820, LCC: 51919.0109
LLP: 0.0923, LCC: 50270.2502
LLP: 0.0740, LCC: 53119.0525
DEMO
Rank 1: Alternative 1023 - LLP: 0.0677828201, LCC: 54242.2291
Rank 2: Alternative 341 - LLP: 0.064280476, LCC: 55053.0787
Rank 3: Alternative 1041 - LLP: 0.0705689282, LCC: 53937.9504
Rank 4: Alternative 280 - LLP: 0.0894563672, LCC: 50652.127
Rank 5: Alternative 367 - LLP: 0.0858580178, LCC: 51458.0545
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1023 - LLP: 0.0677828201, LCC: 54242.2291
Rank 2: Alternative 341 - LLP: 0.064280476, LCC: 55053.0787
Rank 3: Alternative 1041 - LLP: 0.0705689282, LCC: 53937.9504
Rank 4: Alternative 280 - LLP: 0.0894563672, LCC: 50652.127
Rank 5: Alternative 367 - LLP: 0.0858580178, LCC: 51458.0545

Πίνακας 14: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 10 kWh, VIKOR

Λάρνακα, 10 kWh
NSGA-II
LLP: 0.0836, LCC: 50774.6621
LLP: 0.0873, LCC: 50160.3713
LLP: 0.0702, LCC: 52930.0069
LLP: 0.0679, LCC: 53247.1814
LLP: 0.0762, LCC: 51980.7781
DEMO
Rank 1: Alternative 763 - LLP: 0.087929347, LCC: 50415.5285
Rank 2: Alternative 1057 - LLP: 0.0920997868, LCC: 50256.4786
Rank 3: Alternative 417 - LLP: 0.0472039617, LCC: 58284.8982
Rank 4: Alternative 475 - LLP: 0.0441105129, LCC: 59032.3653
Rank 5: Alternative 244 - LLP: 0.0449302678, LCC: 58985.2415
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1096 - LLP: 0.0922, LCC: 50582.5538
Rank 2: Alternative 596 - LLP: 0.1173, LCC: 47490.9028
Rank 3: Alternative 1264 - LLP: 0.0764, LCC: 53632.7484
Rank 4: Alternative 922 - LLP: 0.0598, LCC: 56923.5228
Rank 5: Alternative 395 - LLP: 0.1263, LCC: 46275.3349

Πίνακας 113: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 10 kWh, VIKOR

Λεμεσός, 10 kWh
NSGA-II
LLP: 0.0761, LCC: 53106.6202 LLP: 0.0801, LCC: 52453.7408 LLP: 0.0844, LCC: 51771.3329 LLP: 0.0891, LCC: 51183.6091 LLP: 0.0758, LCC: 53141.7556
DEMO
Rank 1: Alternative 666 - LLP: 0.0836418356, LCC: 52582.8728 Rank 2: Alternative 65 - LLP: 0.0813498188, LCC: 53035.8403 Rank 3: Alternative 767 - LLP: 0.0770221245, LCC: 53764.6552 Rank 4: Alternative 708 - LLP: 0.0984274258, LCC: 50240.8806 Rank 5: Alternative 427 - LLP: 0.0614545215, LCC: 57138.3173
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1096 - LLP: 0.0922, LCC: 50582.5538 Rank 2: Alternative 596 - LLP: 0.1173, LCC: 47490.9028 Rank 3: Alternative 1264 - LLP: 0.0764, LCC: 53632.7484 Rank 4: Alternative 922 - LLP: 0.0598, LCC: 56923.5228 Rank 5: Alternative 395 - LLP: 0.1263, LCC: 46275.3349

Πίνακας 16: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία 15 kWh, VIKOR

Λευκωσία, 15 kWh
NSGA-II
LLP: 0.0930, LCC: 65023.9543 LLP: 0.0941, LCC: 64662.6681 LLP: 0.0943, LCC: 64651.0945 LLP: 0.0884, LCC: 65867.4558 LLP: 0.1031, LCC: 63029.8774
DEMO
Rank 1: Alternative 733 - LLP: 0.0829356718, LCC: 67233.4357 Rank 2: Alternative 302 - LLP: 0.0914590272, LCC: 65820.6944 Rank 3: Alternative 835 - LLP: 0.0969546889, LCC: 65337.5435 Rank 4: Alternative 456 - LLP: 0.128560714, LCC: 59049.5103 Rank 5: Alternative 527 - LLP: 0.0702268719, LCC: 71122.9775
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1854 - LLP: 0.095, LCC: 64492.9957 Rank 2: Alternative 1615 - LLP: 0.092, LCC: 65735.3589 Rank 3: Alternative 2359 - LLP: 0.1138, LCC: 61126.9331 Rank 4: Alternative 1862 - LLP: 0.1164, LCC: 60606.0336 Rank 5: Alternative 2001 - LLP: 0.0542, LCC: 75500.8528

Πίνακας 17: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 15 kWh, VIKOR

Λάρνακα, 15 kWh
NSGA-II
LLP: 0.0976, LCC: 62982.3982 LLP: 0.1025, LCC: 62094.7404 LLP: 0.1068, LCC: 61455.3144 LLP: 0.0954, LCC: 63380.5163 LLP: 0.0861, LCC: 65351.5506
DEMO
Rank 1: Alternative 348 - LLP: 0.0906251586, LCC: 64433.1313 Rank 2: Alternative 154 - LLP: 0.0586732563, LCC: 72547.6497 Rank 3: Alternative 473 - LLP: 0.0518375887, LCC: 74401.0951 Rank 4: Alternative 790 - LLP: 0.0740098324, LCC: 70372.8016 Rank 5: Alternative 521 - LLP: 0.114847951, LCC: 61739.4005
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1635 - LLP: 0.1073, LCC: 61360.7649 Rank 2: Alternative 187 - LLP: 0.0624, LCC: 71697.4632 Rank 3: Alternative 1775 - LLP: 0.1147, LCC: 60861.9373 Rank 4: Alternative 48 - LLP: 0.0496, LCC: 76400.5835 Rank 5: Alternative 445 - LLP: 0.0445, LCC: 77679.2125

Πίνακας 18: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 15 kWh, VIKOR

Λεμεσός, 15 kWh
NSGA-II
LLP: 0.0955, LCC: 65113.4348 LLP: 0.0965, LCC: 64766.7172 LLP: 0.0934, LCC: 65299.7757 LLP: 0.0971, LCC: 64652.5428 LLP: 0.0995, LCC: 64592.1554
DEMO
Rank 1: Alternative 478 - LLP: 0.0809459919, LCC: 68404.3479 Rank 2: Alternative 705 - LLP: 0.100955349, LCC: 64315.0256 Rank 3: Alternative 500 - LLP: 0.110473646, LCC: 62369.6178 Rank 4: Alternative 764 - LLP: 0.0785014593, LCC: 71192.8898 Rank 5: Alternative 638 - LLP: 0.0537470585, LCC: 76663.099
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 918 - LLP: 0.1236, LCC: 59776.2138 Rank 2: Alternative 1506 - LLP: 0.0915, LCC: 65863.0149 Rank 3: Alternative 1 - LLP: 0.0698, LCC: 71482.3414 Rank 4: Alternative 1648 - LLP: 0.0587, LCC: 74918.6064 Rank 5: Alternative 542 - LLP: 0.0581, LCC: 76076.3182

Πίνακας 19: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκοσία 20 kWh, VIKOR

Λευκοσία, 20 kWh
NSGA-II
LLP: 0.1039, LCC: 79967.8391
LLP: 0.1050, LCC: 79863.9619
LLP: 0.1088, LCC: 79019.9347
LLP: 0.1030, LCC: 80131.4822
LLP: 0.1054, LCC: 79716.8443
DEMO
Rank 1: Alternative 190 - LLP: 0.115740909, LCC: 77574.5605
Rank 2: Alternative 310 - LLP: 0.0911798961, LCC: 83694.3398
Rank 3: Alternative 492 - LLP: 0.0890647308, LCC: 84386.7732
Rank 4: Alternative 601 - LLP: 0.0930602717, LCC: 83595.2591
Rank 5: Alternative 587 - LLP: 0.110658643, LCC: 79962.1336
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1676 - LLP: 0.1202, LCC: 76403.9981
Rank 2: Alternative 184 - LLP: 0.109, LCC: 79361.6205
Rank 3: Alternative 1642 - LLP: 0.0898, LCC: 84477.3783
Rank 4: Alternative 414 - LLP: 0.0835, LCC: 85978.2017
Rank 5: Alternative 1184 - LLP: 0.0783, LCC: 87508.3784

Πίνακας 20: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 20 kWh, VIKOR

Λάρνακα, 20 kWh
NSGA-II
LLP: 0.1109, LCC: 78670.0151
LLP: 0.1025, LCC: 79629.9404
LLP: 0.0993, LCC: 80424.5216
LLP: 0.1174, LCC: 76601.8835
LLP: 0.0941, LCC: 81809.6692
DEMO
Rank 1: Alternative 90 - LLP: 0.0889686541, LCC: 83224.3325
Rank 2: Alternative 563 - LLP: 0.102492317, LCC: 80042.1132
Rank 3: Alternative 348 - LLP: 0.076376248, LCC: 87296.1102
Rank 4: Alternative 36 - LLP: 0.097017269, LCC: 82917.7354
Rank 5: Alternative 604 - LLP: 0.0831195213, LCC: 86757.8842
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1255 - LLP: 0.1139, LCC: 76757.8426
Rank 2: Alternative 1962 - LLP: 0.087, LCC: 84010.0662
Rank 3: Alternative 432 - LLP: 0.0768, LCC: 86385.6641
Rank 4: Alternative 841 - LLP: 0.1055, LCC: 79753.252
Rank 5: Alternative 1605 - LLP: 0.1323, LCC: 73969.1908

Πίνακας 21: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 20 kWh, VIKOR

Λεμεσός, 20 kWh
NSGA-II
LLP: 0.1354, LCC: 73884.0264
LLP: 0.1392, LCC: 73165.4807
LLP: 0.1239, LCC: 76518.1144
LLP: 0.1224, LCC: 76793.6601
LLP: 0.1285, LCC: 75582.6481
DEMO
Rank 1: Alternative 420 - LLP: 0.102482098, LCC: 82226.9479
Rank 2: Alternative 514 - LLP: 0.115910048, LCC: 79259.6361
Rank 3: Alternative 932 - LLP: 0.12415989, LCC: 77501.6708
Rank 4: Alternative 210 - LLP: 0.0987381748, LCC: 83911.092
Rank 5: Alternative 938 - LLP: 0.141512577, LCC: 73856.507
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1594 - LLP: 0.112, LCC: 79512.9463
Rank 2: Alternative 140 - LLP: 0.0963, LCC: 83429.0846
Rank 3: Alternative 1576 - LLP: 0.1242, LCC: 76540.7231
Rank 4: Alternative 986 - LLP: 0.0883, LCC: 86135.6445
Rank 5: Alternative 1155 - LLP: 0.1335, LCC: 75355.805

Παρόμοιες παρατηρήσεις με τη μέθοδο AHP-TOPSIS παρουσιάζονται και στην περίπτωση της VIKOR. Σε αυτή τη μέθοδο, οι βέλτιστες λύσεις προκύπτουν μέσω της ελαχιστοποίησης ενός σύνθετου μέτρου που λαμβάνει υπόψη τόσο την απόσταση από την ιδανική λύση όσο και τη συμβιβαστική λύση μεταξύ των δύο κριτηρίων. Η κύρια διαφορά σε σχέση με την AHP-TOPSIS είναι ότι εδώ παρατηρείται μεγαλύτερη ισορροπία μεταξύ των βέλτιστων λύσεων που προκύπτουν από τους τρεις αλγόριθμους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο αλγόριθμος NSGA-II παρουσιάζει υψηλότερες τιμές για την αντικειμενική συνάρτηση LLP σε σχέση με τους άλλους δύο αλγόριθμους, ανάμεσα στις πέντε βέλτιστες λύσεις του.

Αυτή η ισορροπία υποδηλώνει ότι η μέθοδος VIKOR μπορεί να παρέχει μια πιο δίκαιη κατανομή των λύσεων, προσφέροντας καλύτερες και πιο ισορροπημένες λύσεις από τους διαφορετικούς αλγορίθμους. Η έμφαση που δίνεται στην ισορροπία μεταξύ των λύσεων διασφαλίζει ότι δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των τιμών των διαφόρων αντικειμενικών συναρτήσεων.

Τέλος, έχουμε τη μέθοδο PROMETHEE, της οποίας τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 22: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκοσία, Λάρνακα, Λεμεσός 10 kWh, PROMETHEE

Λευκοσία, 10kWh	Λάρνακα, 10 kWh	Λεμεσός, 10 kWh
NSGA-II	NSGA-II	NSGA-II
160: 0.0132, 77322.6145	153: 0.0163, 72182.8720	148: 0.0293, 67819.1701
161: 0.0129, 77973.1712	155: 0.0152, 73260.4429	155: 0.0240, 71629.6243
159: 0.0152, 75248.6068	154: 0.0154, 73242.2753	149: 0.0283, 68915.5102
162: 0.0122, 79134.0777	156: 0.0148, 74118.0723	150: 0.0281, 69183.5436
163: 0.0119, 79549.3225	158: 0.0133, 75156.0552	147: 0.0311, 67016.3576
DEMO	DEMO	DEMO
749: 0.010740, 81582.0002	158: 0.019799, 69025.8175	706: 0.019056, 75952.1454
847: 0.026103, 66875.3457	599: 0.015770, 72724.7378	659: 0.018009, 78557.5586
777: 0.024231, 69317.4851	261: 0.015495, 72972.2313	4: 0.032123, 66370.5077
182: 0.021076, 70301.9443	1071: 0.021601, 68539.2147	400: 0.026515, 73417.8622
121: 0.031492, 65278.2040	231: 0.025151, 66788.0532	931: 0.029245, 68612.7748
Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization
1366: 0.0350, 64277.7490	827: 0.0377, 63929.9637	1366: 0.0350, 64277.7490
2177: 0.0327, 64874.0835	1739: 0.0367, 64852.2000	2177: 0.0327, 64874.0835
840: 0.0571, 56850.1317	1024: 0.0406, 63613.2807	840: 0.0571, 56850.1317
2064: 0.0313, 65260.8835	826: 0.0352, 65632.6919	2064: 0.0313, 65260.8835
1476: 0.0531, 57912.6661	1187: 0.0351, 66013.6511	1476: 0.0531, 57912.6661

Πίνακας 23: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία, Λάρνακα, Λεμεσός 15 kWh, PROMETHEE

Λευκωσία, 15 kWh	Λάρνακα, 15 kWh	Λεμεσός, 15 kWh
NSGA-II	NSGA-II	NSGA-II
164: 0.0238, 91023.0480	162: 0.0248, 88816.5677	148: 0.0373, 84624.9251
165: 0.0229, 92242.7691	161: 0.0263, 87591.6847	147: 0.0387, 83598.4690
163: 0.0259, 89772.2224	163: 0.0244, 89205.2645	150: 0.0359, 85929.9377
166: 0.0228, 97486.7778	164: 0.0241, 89750.0756	151: 0.0348, 86728.1972
162: 0.0277, 88398.3898	165: 0.0228, 91189.3866	149: 0.0373, 85717.5827
DEMO	DEMO	DEMO
267: 0.027708, 88436.3102	201: 0.028432, 85645.3344	578: 0.031912, 88495.7755
343: 0.024329, 91135.4968	9: 0.024756, 88721.7347	1035: 0.031858, 90541.2004
792: 0.039982, 81536.5291	880: 0.030475, 85432.6511	181: 0.038889, 83736.0489
659: 0.034111, 84494.0407	800: 0.037759, 80595.1318	370: 0.030736, 93089.6390
203: 0.038344, 83349.8692	73: 0.022868, 90666.4818	693: 0.030673, 93257.3837
Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization
305: 0.0332, 85400.3798	249: 0.0288, 85538.3962	1060: 0.0379, 84173.0240
892: 0.0393, 83425.3379	382: 0.0307, 85496.9407	610: 0.0370, 85616.7185
249: 0.0466, 78189.6982	918: 0.0200, 93348.7954	1070: 0.0354, 86186.6228
369: 0.0299, 86626.0142	359: 0.0496, 76400.5835	1981: 0.0587, 74918.6064
1279: 0.0233, 93887.4580	1232: 0.0445, 77679.2125	439: 0.0495, 78954.1391

Πίνακας 24: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία, Λάρνακα, Λεμεσός 20 kWh, PROMETHEE

Λευκωσία, 20 kWh	Λάρνακα, 20 kWh	Λεμεσός, 20 kWh
NSGA-II	NSGA-II	NSGA-II
169: 0.0497, 100076.6123	164: 0.0459, 100147.3917	166: 0.0509, 103235.3191
167: 0.0521, 98685.6484	158: 0.0525, 96459.6354	164: 0.0567, 98616.4731
172: 0.0467, 102147.4560	162: 0.0480, 98760.6881	165: 0.0552, 99633.8895
170: 0.0494, 100309.5652	160: 0.0502, 97692.1334	163: 0.0577, 98273.8651
171: 0.0491, 100567.9301	163: 0.0473, 99309.7980	162: 0.0610, 96159.2946
DEMO	DEMO	DEMO
444: 0.044315, 104784.572	145: 0.044826, 101348.3160	858: 0.069025, 92756.1101
522: 0.047495, 104314.213	412: 0.041069, 107113.9050	902: 0.071435, 92421.8562
498: 0.043705, 109877.064	472: 0.055403, 95703.7372	764: 0.061239, 98090.6037
177: 0.052687, 100904.783	65: 0.053109, 98209.2146	682: 0.055418, 99433.0353
737: 0.058422, 100497.883	639: 0.064937, 95457.9327	861: 0.065398, 97048.6447
Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization
1960: 0.0426, 105831.1711	633: 0.0520, 96059.6769	1971: 0.0518, 102403.9270
1670: 0.0460, 102592.4599	859: 0.0413, 103528.7706	778: 0.0508, 103336.6910
802: 0.0578, 95631.1375	1237: 0.0589, 92925.9590	53: 0.0616, 95796.7245
43: 0.0649, 92495.2133	1824: 0.0543, 96008.1596	695: 0.0580, 97709.7732
615: 0.0566, 97102.8346	1773: 0.0460, 99351.7448	1726: 0.0503, 105031.1096

Στη μέθοδο PROMETHEE, οι βέλτιστες λύσεις προκύπτουν μέσω μιας διαδικασίας επιλογής βάσει πολλών κριτηρίων, συμπεριλαμβανομένων των προτιμησιακών συναρτήσεων, των εκροών προτίμησης και υπεροχής, καθώς και των θετικών και αρνητικών ροών υπεροχής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, λόγω των πολλών παραμέτρων που λαμβάνει υπόψη της η συγκεκριμένη μέθοδος, διαφέρουν από τις δύο προηγούμενες μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα:

1. Στο φορτίο των 10 kWh, ο αλγόριθμος NSGA-II παρουσιάζει τις καλύτερες τιμές για το LLP, σε σύγκριση με τους άλλους δύο αλγορίθμους. Ο PSO παρέχει λύσεις με τα χαμηλότερα κόστη, αλλά υψηλότερα LLP σε περιπτώσεις, ενώ ο DEMO παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Για το φορτίο των 15 και 20 kWh ο NSGA-II παραμένει ισορροπημένος και αξιόπιστος, ωστόσο φαίνεται πως ο PSO δίνει πολύ καλύτερες τιμές όσον αφορά το LLP, εις βάρος βέβαια του κόστους.
2. Όπως είναι αναμενόμενο, κάθε φορά που αυξάνεται το φορτίο, αυξάνεται και η τιμή των βέλτιστων λύσεων τόσο για το LLP όσο και για το LCC. Αυτή η τάση παρατηρείται και στη μέθοδο PROMETHEE, με τις βέλτιστες λύσεις να παρουσιάζουν αυξημένες τιμές με την αύξηση του φορτίου.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για ισάξια βάρη στις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις LLP και LCC, δηλαδή 0.5 και 0.5 αντίστοιχα. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου AHP-TOPSIS για κάθε περίπτωση πόλης, φορτίου και αλγορίθμου:

Πίνακας 25: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία 10 kWh, AHP-TOPSIS

Λευκωσία, 10kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.1332, 'LCC': 45280.4742}, Closeness Coefficient: 0.7493
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.1318, 'LCC': 45483.1217}, Closeness Coefficient: 0.7489
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.1225, 'LCC': 46406.1584}, Closeness Coefficient: 0.7485
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.1182, 'LCC': 46846.582}, Closeness Coefficient: 0.7482
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.1455, 'LCC': 44277.1973}, Closeness Coefficient: 0.7478
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0894563672, 'LCC': 50652.127}, Closeness Coefficient = 0.7698
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.110412688, 'LCC': 47819.889}, Closeness Coefficient = 0.7124
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.109350547, 'LCC': 48091.3866}, Closeness Coefficient = 0.3356
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0858580178, 'LCC': 51458.0545}, Closeness Coefficient = 0.7401
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0976934742, 'LCC': 50239.9959}, Closeness Coefficient = 0.6232
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.1208, 'LCC': 46548.3582}, Closeness Coefficient = 0.5185
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.1312, 'LCC': 45637.8213}, Closeness Coefficient = 0.7513
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0954, 'LCC': 49717.9594}, Closeness Coefficient = 0.7411
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0968, 'LCC': 49765.0215}, Closeness Coefficient = 0.7534
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0816, 'LCC': 52173.5867}, Closeness Coefficient = 0.7534

Πίνακας 26: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 10 kWh, AHP-TOPSIS

Λάρνακα, 10 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.1358, 'LCC': 44712.7173}, Closeness Coefficient: 0.7472
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.1301, 'LCC': 45257.0875}, Closeness Coefficient: 0.7472
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.138, 'LCC': 44574.8459}, Closeness Coefficient: 0.7468
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.1317, 'LCC': 45174.0287}, Closeness Coefficient: 0.7468
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.1266, 'LCC': 45639.9145}, Closeness Coefficient: 0.7467
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.087929347, 'LCC': 50415.5285}, Closeness Coefficient = 0.4419
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0920997868, 'LCC': 50256.4786}, Closeness Coefficient = 0.7039
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.117703439, 'LCC': 46584.4324}, Closeness Coefficient = 0.6539
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.113728588, 'LCC': 47400.5179}, Closeness Coefficient = 0.6671
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0812097325, 'LCC': 52953.3366}, Closeness Coefficient = 0.6671
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.1263, 'LCC': 46275.3349}, Closeness Coefficient = 0.5604
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.1173, 'LCC': 47490.9028}, Closeness Coefficient = 0.7009
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0922, 'LCC': 50582.5538}, Closeness Coefficient = 0.7126
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.1369, 'LCC': 45891.3168}, Closeness Coefficient = 0.6993
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.1553, 'LCC': 43619.5223}, Closeness Coefficient = 0.6993

Πίνακας 27: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 10 kWh, AHP-TOPSIS

Λεμεσός, 10 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.1343, 'LCC': 45291.7534}, Closeness Coefficient: 0.7392
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.1411, 'LCC': 44822.6869}, Closeness Coefficient: 0.7381
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.1386, 'LCC': 45096.1017}, Closeness Coefficient: 0.7378
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.1234, 'LCC': 46453.8795}, Closeness Coefficient: 0.7377
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.1522, 'LCC': 43899.0341}, Closeness Coefficient: 0.7369
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0984274258, 'LCC': 50240.8806}, Closeness Coefficient = 0.5089
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.116880949, 'LCC': 47409.1647}, Closeness Coefficient = 0.5554
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0836418356, 'LCC': 52582.8728}, Closeness Coefficient = 0.7897
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0813498188, 'LCC': 53035.8403}, Closeness Coefficient = 0.7483
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0770221245, 'LCC': 53764.6552}, Closeness Coefficient = 0.6449
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.1263, 'LCC': 46275.3349}, Closeness Coefficient = 0.5604
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.1173, 'LCC': 47490.9028}, Closeness Coefficient = 0.7009
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0922, 'LCC': 50582.5538}, Closeness Coefficient = 0.7126
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.1369, 'LCC': 45891.3168}, Closeness Coefficient = 0.6993
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.1553, 'LCC': 43619.5223}, Closeness Coefficient = 0.6993

Πίνακας 28: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία 15 kWh, AHP-TOPSIS

Λευκωσία, 15 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.1738, 'LCC': 54110.8944}, Closeness Coefficient: 0.6910
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.1786, 'LCC': 53724.5197}, Closeness Coefficient: 0.6908
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.1625, 'LCC': 55143.2444}, Closeness Coefficient: 0.6906
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.1868, 'LCC': 53028.1589}, Closeness Coefficient: 0.6905
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.1841, 'LCC': 53354.239}, Closeness Coefficient: 0.6900
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.128560714, 'LCC': 59049.5103}, Closeness Coefficient = 0.6872
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.138212525, 'LCC': 57790.9298}, Closeness Coefficient = 0.5059
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0914590272, 'LCC': 65820.6944}, Closeness Coefficient = 0.7193
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0969546889, 'LCC': 65337.5435}, Closeness Coefficient = 0.3622
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.116998608, 'LCC': 62466.3827}, Closeness Coefficient = 0.7452
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.1164, 'LCC': 60606.0336}, Closeness Coefficient = 0.6901
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.1138, 'LCC': 61126.9331}, Closeness Coefficient = 0.5410
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.095, 'LCC': 64492.9957}, Closeness Coefficient = 0.5912
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.092, 'LCC': 65735.3589}, Closeness Coefficient = 0.5410
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.1802, 'LCC': 53648.3655}, Closeness Coefficient = 0.7586

Πίνακας 29: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 15 kWh, AHP-TOPSIS

Λάρνακα, 15 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.1642, 'LCC': 54676.0226}, Closeness Coefficient: 0.6943
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.1544, 'LCC': 55535.9783}, Closeness Coefficient: 0.6942
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.1539, 'LCC': 55594.5839}, Closeness Coefficient: 0.6941
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.1609, 'LCC': 54998.575}, Closeness Coefficient: 0.6941
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.1656, 'LCC': 54590.0873}, Closeness Coefficient: 0.6941
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.0906251586, 'LCC': 64433.1313}, Closeness Coefficient = 0.7105
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.119573622, 'LCC': 60797.9997}, Closeness Coefficient = 0.7594
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.114847951, 'LCC': 61739.4005}, Closeness Coefficient = 0.7105
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.129375078, 'LCC': 59981.2031}, Closeness Coefficient = 0.6064
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.142354734, 'LCC': 57967.7593}, Closeness Coefficient = 0.7566
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.1203, 'LCC': 59517.2497}, Closeness Coefficient = 0.6890
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.1073, 'LCC': 61360.7649}, Closeness Coefficient = 0.7255
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.1147, 'LCC': 60861.9373}, Closeness Coefficient = 0.3871
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.1151, 'LCC': 64637.9062}, Closeness Coefficient = 0.7267
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.0624, 'LCC': 71697.4632}, Closeness Coefficient = 0.6961

Πίνακας 30: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 15 kWh, AHP-TOPSIS

Λεμεσός, 15 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.1875, 'LCC': 52780.0528}, Closeness Coefficient: 0.7016
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.1914, 'LCC': 52422.4297}, Closeness Coefficient: 0.7013
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.1653, 'LCC': 55129.8991}, Closeness Coefficient: 0.7004
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.1519, 'LCC': 56319.8332}, Closeness Coefficient: 0.7004
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.1583, 'LCC': 55779.2922}, Closeness Coefficient: 0.7003
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.110473646, 'LCC': 62369.6178}, Closeness Coefficient = 0.6484
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.100955349, 'LCC': 64315.0256}, Closeness Coefficient = 0.7020
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0809459919, 'LCC': 68404.3479}, Closeness Coefficient = 0.6389
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.0785014593, 'LCC': 71192.8898}, Closeness Coefficient = 0.6489
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.166798998, 'LCC': 60135.3955}, Closeness Coefficient = 0.6785
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.1236, 'LCC': 59776.2138}, Closeness Coefficient = 0.3819
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.0915, 'LCC': 65863.0149}, Closeness Coefficient = 0.7452
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0698, 'LCC': 71482.3414}, Closeness Coefficient = 0.7663
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.1884, 'LCC': 52985.1526}, Closeness Coefficient = 0.7307
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.1977, 'LCC': 51982.0566}, Closeness Coefficient = 0.4933

Πίνακας 31: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία 20 kWh, AHP-TOPSIS

Λευκωσία, 20 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.2145, 'LCC': 63364.6631}, Closeness Coefficient: 0.6623 Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.2114, 'LCC': 63707.7003}, Closeness Coefficient: 0.6623 Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.2075, 'LCC': 64160.287}, Closeness Coefficient: 0.6622 Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.2229, 'LCC': 62475.119}, Closeness Coefficient: 0.6620 Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.1928, 'LCC': 65740.2613}, Closeness Coefficient: 0.6620
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.146290582, 'LCC': 71716.3605}, Closeness Coefficient = 0.3707 Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.166963302, 'LCC': 68759.8351}, Closeness Coefficient = 0.6807 Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.157217982, 'LCC': 71550.5775}, Closeness Coefficient = 0.6807 Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.115740909, 'LCC': 77574.5605}, Closeness Coefficient = 0.4172 Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.211228747, 'LCC': 64031.8911}, Closeness Coefficient = 0.6856
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.1521, 'LCC': 70956.9995}, Closeness Coefficient = 0.7194 Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.166, 'LCC': 69073.9316}, Closeness Coefficient = 0.7194 Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.181, 'LCC': 67326.8101}, Closeness Coefficient = 0.4905 Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.1202, 'LCC': 76403.9981}, Closeness Coefficient = 0.7126 Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.109, 'LCC': 79361.6205}, Closeness Coefficient = 0.6804

Πίνακας 32: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 205 kWh, AHP-TOPSIS

Λάρνακα, 20 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.2199, 'LCC': 62906.3061}, Closeness Coefficient: 0.6463 Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.2141, 'LCC': 63518.4177}, Closeness Coefficient: 0.6461 Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.2377, 'LCC': 61131.434}, Closeness Coefficient: 0.6459 Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.2086, 'LCC': 64140.3743}, Closeness Coefficient: 0.6457 Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.2312, 'LCC': 61880.0538}, Closeness Coefficient: 0.6456
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.102492317, 'LCC': 80042.1132}, Closeness Coefficient = 0.7223 Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.118868308, 'LCC': 78115.883}, Closeness Coefficient = 0.4669 Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.0889686541, 'LCC': 83224.3325}, Closeness Coefficient = 0.4669 Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.097017269, 'LCC': 82917.7354}, Closeness Coefficient = 0.4150 Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.076376248, 'LCC': 87296.1102}, Closeness Coefficient = 0.7223
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.1139, 'LCC': 76757.8426}, Closeness Coefficient = 0.6801 Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.1323, 'LCC': 73969.1908}, Closeness Coefficient = 0.7320 Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.1557, 'LCC': 69920.2825}, Closeness Coefficient = 0.7150 Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.1055, 'LCC': 79753.252}, Closeness Coefficient = 0.7435 Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.1827, 'LCC': 67145.3869}, Closeness Coefficient = 0.7436

Πίνακας 33: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 20 kWh, AHP-TOPSIS

Λεμεσός, 20 kWh
NSGA-II
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.2298, 'LCC': 61908.5411}, Closeness Coefficient: 0.6455
Rank 2: Configuration: {'LLP': 0.2327, 'LCC': 61619.4757}, Closeness Coefficient: 0.6454
Rank 3: Configuration: {'LLP': 0.2313, 'LCC': 61800.006}, Closeness Coefficient: 0.6452
Rank 4: Configuration: {'LLP': 0.2228, 'LCC': 62694.6884}, Closeness Coefficient: 0.6452
Rank 5: Configuration: {'LLP': 0.2517, 'LCC': 59650.9157}, Closeness Coefficient: 0.6448
DEMO
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.180052875, 'LCC': 67798.7582}, Closeness Coefficient = 0.4979
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.141512577, 'LCC': 73856.507}, Closeness Coefficient = 0.4699
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.167590526, 'LCC': 70232.6112}, Closeness Coefficient = 0.6803
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.136774431, 'LCC': 75242.8727}, Closeness Coefficient = 0.6690
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.12415989, 'LCC': 77501.6708}, Closeness Coefficient = 0.6674
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Configuration = {'LLP': 0.1242, 'LCC': 76540.7231}, Closeness Coefficient = 0.6421
Rank 2: Configuration = {'LLP': 0.143, 'LCC': 73766.372}, Closeness Coefficient = 0.7165
Rank 3: Configuration = {'LLP': 0.1335, 'LCC': 75355.805}, Closeness Coefficient = 0.4588
Rank 4: Configuration = {'LLP': 0.112, 'LCC': 79512.9463}, Closeness Coefficient = 0.6799
Rank 5: Configuration = {'LLP': 0.1779, 'LCC': 69115.9254}, Closeness Coefficient = 0.7080

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε μία σημαντική μείωση στους συντελεστές εγγύτητας (closeness coefficient) τόσο στα μικρότερα φορτία, όσο και στα μεγαλύτερα. Συγκεκριμένα, όσο το φορτίο μεγαλώνει, στις περιπτώσεις δηλαδή των 20 kWh, τόσο μειώνεται και ο συντελεστής. Αυτό είναι αναμενόμενο, λόγω του τρόπου υπολογισμού του συντελεστή, σε σχέση με την απόσταση από την ιδανική και μη-ιδανική λύση. Ο συντελεστής επηρεάζεται άμεσα δηλαδή από το γεγονός ότι πλέον τα βάρη των δύο κριτηρίων είναι ίσα, με αποτέλεσμα η απόσταση από την ιδανική λύση είναι μεγαλύτερη, σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.4), (4.5).

Όσον αφορά τις τιμές και την επιλογή των βέλτιστων αποτελεσμάτων, παρατηρούμε ότι με την εξίσωση των βαρών, οι τιμές του LLP είναι αυξημένες, ενώ του LCC αντίστοιχα μειωμένες. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι παρόμοια με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης βαρών, αναφορικά με τα διαφορετικά φορτία και πόλεις. Ο αλγόριθμος NSGA-II αποδεικνύεται αξιόπιστος με σταθερά καλές λύσεις και υψηλότερο κόστος σε ορισμένες περιπτώσεις, ο DEMO προσφέρει μερικές από τις καλύτερες λύσεις, αν και παρουσιάζει διακυμάνσεις στις επιδόσεις του, ενώ ο PSO είναι επίσης ισορροπημένος, με υψηλούς συντελεστές εγγύτητας και ανταγωνιστικό κόστος.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η μέθοδος VIKOR, κατά την οποία προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 34: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία 10 kWh, VIKOR

Λευκωσία, 10kWh
NSGA-II
Rank 1: Alternative 87 - LLP: 0.2537, LCC: 38017.0751
Rank 2: Alternative 88 - LLP: 0.2233, LCC: 39562.2226
Rank 3: Alternative 90 - LLP: 0.2066, LCC: 40448.0918
Rank 4: Alternative 89 - LLP: 0.2109, LCC: 40255.109
Rank 5: Alternative 94 - LLP: 0.1915, LCC: 41234.1782
DEMO
Rank 1: Alternative 1 - LLP: 0.208425366, LCC: 40384.5484
Rank 2: Alternative 1100 - LLP: 0.202297063, LCC: 41332.9389
Rank 3: Alternative 2 - LLP: 0.110412688, LCC: 47819.889
Rank 4: Alternative 945 - LLP: 0.109350547, LCC: 48091.3866
Rank 5: Alternative 613 - LLP: 0.146546606, LCC: 46659.1611
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 259 - LLP: 0.2052, LCC: 40872.373
Rank 2: Alternative 2297 - LLP: 0.2255, LCC: 40039.5554
Rank 3: Alternative 738 - LLP: 0.1592, LCC: 43398.7206
Rank 4: Alternative 507 - LLP: 0.3385, LCC: 34602.2742
Rank 5: Alternative 1015 - LLP: 0.1312, LCC: 45637.8213

Πίνακας 35: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 10 kWh, VIKOR

Λάρνακα, 10 kWh
NSGA-II
Rank 1: Alternative 82 - LLP: 0.2525, LCC: 37955.816
Rank 2: Alternative 81 - LLP: 0.2561, LCC: 37786.8004
Rank 3: Alternative 83 - LLP: 0.2461, LCC: 38288.7289
Rank 4: Alternative 79 - LLP: 0.2586, LCC: 37659.8813
Rank 5: Alternative 85 - LLP: 0.2261, LCC: 39265.5906
DEMO
Rank 1: Alternative 878 - LLP: 0.200934766, LCC: 40678.4322
Rank 2: Alternative 55 - LLP: 0.179672626, LCC: 41788.2537
Rank 3: Alternative 540 - LLP: 0.164561932, LCC: 42718.3723
Rank 4: Alternative 480 - LLP: 0.160324779, LCC: 44148.5823
Rank 5: Alternative 1051 - LLP: 0.268118375, LCC: 37261.7936
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 4 - LLP: 0.2126, LCC: 39992.7943
Rank 2: Alternative 1598 - LLP: 0.2009, LCC: 41061.7404
Rank 3: Alternative 1418 - LLP: 0.1553, LCC: 43619.5223
Rank 4: Alternative 5 - LLP: 0.1601, LCC: 43622.0799
Rank 5: Alternative 1893 - LLP: 0.1263, LCC: 46275.3349

Πίνακας 36: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 10 kWh, VIKOR

Λεμεσός, 10 kWh
NSGA-II
Rank 1: Alternative 92 - LLP: 0.2294, LCC: 39029.6501
Rank 2: Alternative 91 - LLP: 0.2372, LCC: 38644.8562
Rank 3: Alternative 93 - LLP: 0.2233, LCC: 39446.3372
Rank 4: Alternative 95 - LLP: 0.1883, LCC: 41295.66
Rank 5: Alternative 94 - LLP: 0.1989, LCC: 40763.7382
DEMO
Rank 1: Alternative 579 - LLP: 0.240332603, LCC: 38598.5877
Rank 2: Alternative 323 - LLP: 0.199737873, LCC: 41090.6311
Rank 3: Alternative 991 - LLP: 0.205760919, LCC: 40809.9892
Rank 4: Alternative 134 - LLP: 0.252317757, LCC: 38014.9627
Rank 5: Alternative 863 - LLP: 0.140604425, LCC: 45555.5848
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 4 - LLP: 0.2126, LCC: 39992.7943
Rank 2: Alternative 1598 - LLP: 0.2009, LCC: 41061.7404
Rank 3: Alternative 1418 - LLP: 0.1553, LCC: 43619.5223
Rank 4: Alternative 5 - LLP: 0.1601, LCC: 43622.0799
Rank 5: Alternative 1893 - LLP: 0.1263, LCC: 46275.3349

Πίνακας 37: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία 15 kWh, VIKOR

Λευκωσία, 15 kWh
NSGA-II
Rank 1: Alternative 98 - LLP: 0.2509, LCC: 47993.5767
Rank 2: Alternative 97 - LLP: 0.2578, LCC: 47593.2621
Rank 3: Alternative 96 - LLP: 0.259, LCC: 47521.498
Rank 4: Alternative 94 - LLP: 0.2664, LCC: 47088.2802
Rank 5: Alternative 95 - LLP: 0.2626, LCC: 47339.7735
DEMO
Rank 1: Alternative 342 - LLP: 0.249084873, LCC: 49113.3697
Rank 2: Alternative 742 - LLP: 0.325086287, LCC: 43979.7018
Rank 3: Alternative 721 - LLP: 0.300498752, LCC: 47267.57
Rank 4: Alternative 13 - LLP: 0.138212525, LCC: 57790.9298
Rank 5: Alternative 804 - LLP: 0.162384001, LCC: 56446.5746
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 986 - LLP: 0.218, LCC: 50497.6422
Rank 2: Alternative 2313 - LLP: 0.2179, LCC: 50589.005
Rank 3: Alternative 2124 - LLP: 0.2034, LCC: 51724.7241
Rank 4: Alternative 2369 - LLP: 0.1929, LCC: 52604.3495
Rank 5: Alternative 2203 - LLP: 0.2785, LCC: 46934.7743

Πίνακας 37: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 15 kWh, VIKOR

Λάρνακα, 15 kWh
NSGA-II
Rank 1: Alternative 91 - LLP: 0.2868, LCC: 45829.6259
Rank 2: Alternative 92 - LLP: 0.2838, LCC: 46029.5346
Rank 3: Alternative 93 - LLP: 0.2641, LCC: 47259.9364
Rank 4: Alternative 90 - LLP: 0.2937, LCC: 45506.9554
Rank 5: Alternative 95 - LLP: 0.2455, LCC: 48392.7851
DEMO
Rank 1: Alternative 573 - LLP: 0.196122355, LCC: 52752.188
Rank 2: Alternative 349 - LLP: 0.163046066, LCC: 54945.1422
Rank 3: Alternative 97 - LLP: 0.155878621, LCC: 55582.0507
Rank 4: Alternative 277 - LLP: 0.261947467, LCC: 49836.1525
Rank 5: Alternative 216 - LLP: 0.142354734, LCC: 57967.7593
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1795 - LLP: 0.211, LCC: 50833.9166
Rank 2: Alternative 233 - LLP: 0.2216, LCC: 50273.0726
Rank 3: Alternative 1738 - LLP: 0.2062, LCC: 51348.2473
Rank 4: Alternative 3 - LLP: 0.2508, LCC: 48190.9064
Rank 5: Alternative 1503 - LLP: 0.2592, LCC: 47899.4994

Πίνακας 38: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 15 kWh, VIKOR

Λεμεσός, 15 kWh
NSGA-II
Rank 1: Alternative 92 - LLP: 0.2677, LCC: 46772.8618
Rank 2: Alternative 91 - LLP: 0.2695, LCC: 46670.1281
Rank 3: Alternative 95 - LLP: 0.2571, LCC: 47443.0213
Rank 4: Alternative 93 - LLP: 0.2645, LCC: 46992.2484
Rank 5: Alternative 94 - LLP: 0.2598, LCC: 47298.3467
DEMO
Rank 1: Alternative 30 - LLP: 0.238115401, LCC: 48931.9731
Rank 2: Alternative 419 - LLP: 0.256686015, LCC: 48513.0984
Rank 3: Alternative 998 - LLP: 0.280224071, LCC: 47071.7004
Rank 4: Alternative 810 - LLP: 0.266964605, LCC: 48086.4569
Rank 5: Alternative 970 - LLP: 0.22751575, LCC: 50831.9604
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1895 - LLP: 0.2744, LCC: 46385.2229
Rank 2: Alternative 1444 - LLP: 0.305, LCC: 44865.0905
Rank 3: Alternative 1548 - LLP: 0.214, LCC: 50627.5781
Rank 4: Alternative 2043 - LLP: 0.1977, LCC: 51982.0566
Rank 5: Alternative 517 - LLP: 0.1884, LCC: 52985.1526

Πίνακας 39: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία 20 kWh, VIKOR

Λευκωσία, 20 kWh
NSGA-II
Rank 1: Alternative 97 - LLP: 0.278, LCC: 57138.1014
Rank 2: Alternative 96 - LLP: 0.2854, LCC: 56602.449
Rank 3: Alternative 91 - LLP: 0.3157, LCC: 54277.2177
Rank 4: Alternative 95 - LLP: 0.2939, LCC: 55959.5787
Rank 5: Alternative 93 - LLP: 0.3045, LCC: 55149.0703
DEMO
Rank 1: Alternative 117 - LLP: 0.250338289, LCC: 60012.4851
Rank 2: Alternative 401 - LLP: 0.342972345, LCC: 52902.9231
Rank 3: Alternative 435 - LLP: 0.30730387, LCC: 56122.1375
Rank 4: Alternative 450 - LLP: 0.327631917, LCC: 55070.0617
Rank 5: Alternative 879 - LLP: 0.211228747, LCC: 64031.8911
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 771 - LLP: 0.295, LCC: 56568.1251
Rank 2: Alternative 791 - LLP: 0.2779, LCC: 57873.134
Rank 3: Alternative 618 - LLP: 0.3259, LCC: 53963.7221
Rank 4: Alternative 543 - LLP: 0.3738, LCC: 49848.5968
Rank 5: Alternative 95 - LLP: 0.3624, LCC: 51864.7588

Πίνακας 40: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λάρνακα 20 kWh, VIKOR

Λάρνακα, 20 kWh
NSGA-II
Rank 1: Alternative 100 - LLP: 0.3048, LCC: 55329.6931
Rank 2: Alternative 101 - LLP: 0.3034, LCC: 55447.862
Rank 3: Alternative 102 - LLP: 0.294, LCC: 56259.469
Rank 4: Alternative 98 - LLP: 0.3099, LCC: 55079.3879
Rank 5: Alternative 99 - LLP: 0.3087, LCC: 55174.7758
DEMO
Rank 1: Alternative 658 - LLP: 0.239536913, LCC: 61326.0162
Rank 2: Alternative 214 - LLP: 0.218349508, LCC: 63594.3382
Rank 3: Alternative 521 - LLP: 0.169075384, LCC: 70327.5891
Rank 4: Alternative 721 - LLP: 0.187680007, LCC: 69210.3803
Rank 5: Alternative 511 - LLP: 0.299287867, LCC: 57897.0169
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1569 - LLP: 0.3226, LCC: 53864.8905
Rank 2: Alternative 779 - LLP: 0.3161, LCC: 54908.2754
Rank 3: Alternative 234 - LLP: 0.3559, LCC: 51392.5943
Rank 4: Alternative 667 - LLP: 0.3714, LCC: 50065.1378
Rank 5: Alternative 842 - LLP: 0.1827, LCC: 67145.3869

Πίνακας 41: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λεμεσός 20 kWh, VIKOR

Λεμεσός, 20 kWh
NSGA-II
Rank 1: Alternative 93 - LLP: 0.312, LCC: 54474.845 Rank 2: Alternative 92 - LLP: 0.3195, LCC: 53968.9272 Rank 3: Alternative 95 - LLP: 0.3042, LCC: 55187.5552 Rank 4: Alternative 96 - LLP: 0.3036, LCC: 55238.638 Rank 5: Alternative 94 - LLP: 0.3071, LCC: 54996.3022
DEMO
Rank 1: Alternative 781 - LLP: 0.297770042, LCC: 55684.5461 Rank 2: Alternative 97 - LLP: 0.245495203, LCC: 60215.319 Rank 3: Alternative 676 - LLP: 0.253051268, LCC: 59970.9704 Rank 4: Alternative 552 - LLP: 0.333686428, LCC: 53470.3539 Rank 5: Alternative 477 - LLP: 0.206494045, LCC: 65350.7216
Particle Swarm Optimization
Rank 1: Alternative 1 - LLP: 0.2389, LCC: 61667.2573 Rank 2: Alternative 747 - LLP: 0.3141, LCC: 54745.9648 Rank 3: Alternative 1443 - LLP: 0.3218, LCC: 53858.0227 Rank 4: Alternative 1673 - LLP: 0.1779, LCC: 69115.9254 Rank 5: Alternative 1321 - LLP: 0.3448, LCC: 53775.5015

Τα παραπάνω αποτελέσματα, παρουσιάζουν και πάλι την σημαντική αύξηση των τιμών του LLP και τη μείωση του LCC. Παρόμοιες παρατηρήσεις με αυτές της μεθόδου AHP-TOPSIS, καθώς αναδεικνύονται η σταθερότητα και αξιοπιστία του NSGA-II, οι εξαιρετικές λύσεις που παρέχει ο DEMO σε περιπτώσεις, και οι οικονομικά αποδοτικές λύσεις του PSO με ανταγωνιστικές επίπεδα σε LLP και LCC. Αναδεικνύεται, ξανά, η ισορροπία και η δίκαιη επιλογή των βέλτιστων λύσεων από τη μέθοδο VIKOR και για τους τρεις αλγορίθμους.

Παρουσιάζεται ωστόσο, πως έχουν επιλεχθεί βέλτιστες λύσεις για όλες τις περιπτώσεις, με σημαντικά υψηλότερο LLP, σε αντίθεση με τις μεθόδους AHP-TOPSIS και PROMETHEE, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 42: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκοσία, Λάρνακα, Λεμεσός 10 kWh, PROMETHEE

Λευκοσία, 10kWh	Λάρνακα, 10 kWh	Λεμεσός, 10 kWh
NSGA-II	NSGA-II	NSGA-II
Individual 125: LLP:0.0692, LCC:53836.6783 Individual 124: LLP:0.0706, LCC:53759.7033 Individual 123: LLP:0.0740, LCC:53119.0525 Individual 127: LLP:0.0652, LCC:54691.3565 Individual 122: LLP:0.0802, LCC:52105.6088	Individual 129: LLP:0.0679, LCC:53247.1814 Individual 130: LLP:0.0678, LCC:53275.1661 Individual 128: LLP:0.0702, LCC:52930.0069 Individual 127: LLP:0.0762, LCC:51980.7781 Individual 121: LLP:0.0936, LCC:49268.2957	Individual 128: LLP:0.0589, LCC:56943.5076 Individual 129: LLP:0.0559, LCC:57873.1357 Individual 127: LLP:0.0626, LCC:56094.3691 Individual 130: LLP:0.0528, LCC:58899.6004 Individual 131: LLP:0.0518, LCC:59198.9498
DEMO	DEMO	DEMO
Individual 51 LLP: 0.089456, LCC: 50652.1270 Individual 599 LLP:0.110413, LCC: 47819.8890 Individual 837 LLP:0.109351, LCC: 48091.3866 Individual 661 LLP:0.097693, LCC: 50239.9959 Individual 431 LLP:0.085858, LCC: 51458.0545	Individual 945 LLP:0.050704, LCC: 58004.2364 Individual 1237 LLP:0.054542, LCC: 57718.0276 Individual 926 LLP:0.047204, LCC: 58284.8982 Individual 788 LLP:0.070420, LCC: 54749.7073 Individual 547 LLP:0.087929, LCC: 50415.5285	Individual 1057 LLP:0.098427, LCC: 50240.8806 Individual 451 LLP:0.092494, LCC: 51927.6750 Individual 298 LLP:0.083642, LCC: 52582.8728 Individual 168 LLP:0.116881, LCC: 47409.1647 Individual 121 LLP:0.081350, LCC: 53035.8403
Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization
Individual 358 LLP:0.0629, LCC: 55524.6475 Individual 636 LLP:0.0571, LCC: 56850.1317 Individual 6 LLP:0.0816, LCC: 52173.5867 Individual 1907 LLP:0.0954, LCC: 49717.9594 Individual 3 LLP:0.0968, LCC: 49765.0215	Individual 939 LLP:0.0764, LCC: 53632.7484 Individual 995 LLP:0.1263, LCC: 46275.3349 Individual 1990 LLP:0.1553, LCC: 43619.5223 Individual 298 LLP:0.0922, LCC: 50582.5538 Individual 4 LLP:0.2126, LCC: 39992.7943	Individual 939 LLP:0.0764, LCC: 53632.7484 Individual 995 LLP:0.1263, LCC: 46275.3349 Individual 1990 LLP:0.1553, LCC: 43619.5223 Individual 298 LLP:0.0922, LCC: 50582.5538 Individual 4 LLP:0.2126, LCC: 39992.7943

Πίνακας 43: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκοσία, Λάρνακα, Λεμεσός 15 kWh, PROMETHEE

Λευκοσία, 15 kWh	Λάρνακα, 15 kWh	Λεμεσός, 15 kWh
NSGA-II	NSGA-II	NSGA-II
Individual 127: LLP:0.1077, LCC:62079.8449 Individual 130: LLP:0.0941, LCC:64662.6681 Individual 129: LLP:0.0943, LCC:64651.0945 Individual 125: LLP:0.1107, LCC:61582.5883 Individual 131: LLP:0.0933, LCC:64816.6505	Individual 100: LLP:0.1901, LCC:52534.1596 Individual 101: LLP:0.1833, LCC:53188.7762 Individual 103: LLP:0.1775, LCC:53633.2282 Individual 102: LLP:0.1796, LCC:53537.2729 Individual 99: LLP:0.1978, LCC:51952.3698	Individual 122: LLP:0.1055, LCC:63166.9576 Individual 121: LLP:0.1074, LCC:62722.9680 Individual 124: LLP:0.0971, LCC:64652.5428 Individual 126: LLP:0.0962, LCC:64770.3792 Individual 125: LLP:0.0965, LCC:64766.7172
DEMO	DEMO	DEMO
Individual 475 LLP:0.138213, LCC: 57790.9298 Individual 581 LLP:0.128561, LCC: 59049.5103 Individual 540 LLP:0.116999, LCC: 62466.3827 Individual 807 LLP:0.096955, LCC: 65337.5435 Individual 143 LLP:0.091459, LCC: 65820.6944	Individual 790 LLP:0.074010, LCC: 70372.8016 Individual 773 LLP:0.067523, LCC: 71881.4693 Individual 390 LLP:0.058673, LCC: 72547.6497 Individual 644 LLP:0.090625, LCC: 64433.1313 Individual 163 LLP:0.163046, LCC: 54945.1422	Individual 478 LLP:0.080946, LCC: 68404.3479 Individual 245 LLP:0.110474, LCC: 62369.6178 Individual 768 LLP:0.100955, LCC: 64315.0256 Individual 146 LLP:0.078501, LCC: 71192.8898 Individual 716 LLP:0.071169, LCC: 735322.3738
Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization
Individual 544 LLP:0.0542, LCC: 75500.8528 Individual 2200 LLP:0.1164, LCC: 60606.0336 Individual 2088 LLP:0.0950, LCC: 64492.9957 Individual 1427 LLP:0.0466, LCC: 78189.6982 Individual 1964 LLP:0.1138, LCC: 61126.9331	Individual 661 LLP:0.0624, LCC: 71697.4632 Individual 674 LLP:0.0496, LCC: 76400.5835 Individual 1904 LLP:0.1203, LCC: 59517.2497 Individual 1767 LLP:0.6875, LCC: 25449.3421 Individual 1098 LLP:0.1073, LCC: 61360.7649	Individual 1395 LLP:0.0587, LCC: 74918.6064 Individual 1 LLP:0.0698, LCC: 71482.3414 Individual 770 LLP:0.0581, LCC: 76076.3182 Individual 731 LLP:0.0915, LCC: 65863.0149 Individual 896 LLP:0.0495, LCC: 78954.1391

Πίνακας 44: Βέλτιστες Λύσεις Αλγορίθμων, Λευκωσία, Λάρνακα, Λεμεσός 10 kWh, PROMETHEE

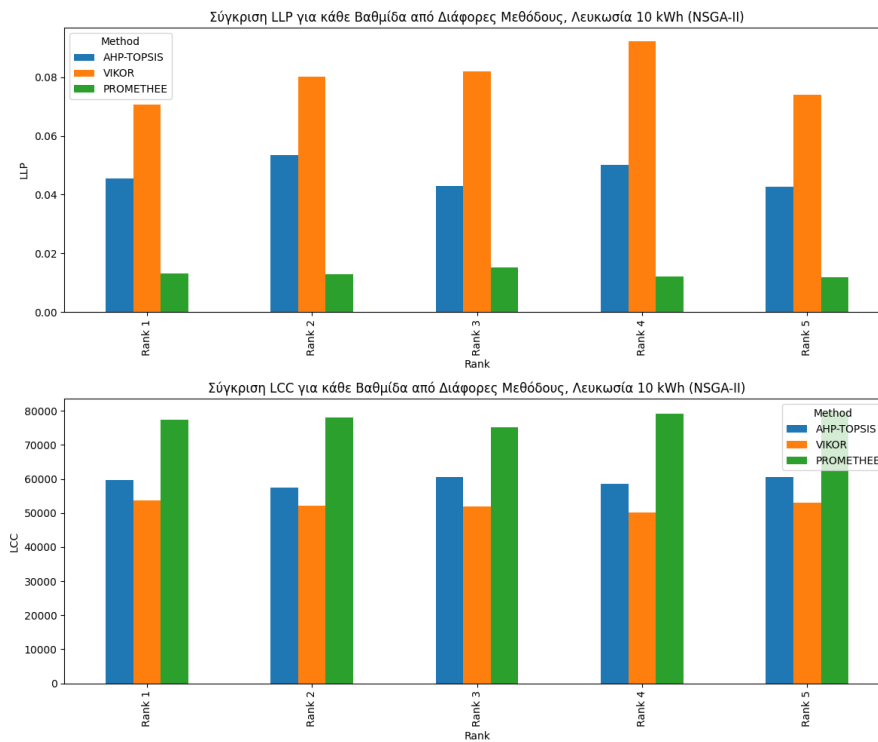
Λευκωσία, 20 kWh	Λάρνακα, 20 kWh	Λεμεσός, 20 kWh
NSGA-II	NSGA-II	NSGA-II
Individual 137: LLP:0.1088, LCC:79019.9347 Individual 138: LLP:0.1054, LCC:79716.8443 Individual 140: LLP:0.1039, LCC:79967.8391 Individual 139: LLP:0.1050, LCC:79863.9619 Individual 141: LLP: 0.1030, LCC: 80131.4822	Individual 132: LLP:0.1324, LCC:73745.3546 Individual 142: LLP:0.0941, LCC:81809.6692 Individual 141: LLP:0.0993, LCC:80424.5216 Individual 140: LLP:0.1025, LCC:79629.9404 Individual 143: LLP:0.0917, LCC:82467.3222	Individual 132: LLP:0.1392, LCC:73165.4807 Individual 131: LLP:0.1408, LCC:72880.6287 Individual 133: LLP:0.1354, LCC:73884.0264 Individual 134: LLP:0.1333, LCC:74336.9763 Individual 135: LLP:0.1315, LCC:74823.1735
DEMO	DEMO	DEMO
Individual 58 LLP:0.166963, LCC: 68759.8351 Individual 63 LLP:0.146291, LCC: 71716.3605 Individual 145 LLP:0.115741, LCC: 77574.5605 Individual 155 LLP:0.157218, LCC: 71550.5775 Individual 814 LLP:0.110659, LCC: 79962.1336	Individual 64 LLP:0.118868, LCC: 78115.8830 Individual 539 LLP:0.102492, LCC: 80042.1132 Individual 395 LLP:0.088969, LCC: 83224.3325 Individual 149 LLP:0.097017, LCC: 82917.7354 Individual 202 LLP:0.503511, LCC: 41034.8835	Individual 971 LLP:0.141513, LCC: 73856.5070 Individual 375 LLP:0.136774, LCC: 75242.8727 Individual 447 LLP:0.102482, LCC: 82226.9479 Individual 932 LLP:0.124160, LCC: 77501.6708 Individual 543 LLP:0.115910, LCC: 79259.6361
Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization	Particle Swarm Optimization
Individual 171 LLP:0.1202, LCC: 76403.9981 Individual 1897 LLP:0.1810, LCC: 67326.8101 Individual 207 LLP:0.1660, LCC: 69073.9316 Individual 1764 LLP:0.0898, LCC: 84477.3783 Individual 1928 LLP:0.5206, LCC: 39212.8119	Individual 1547 LLP:0.1139, LCC: 76757.8426 Individual 654 LLP:0.0870, LCC: 84010.0662 Individual 430 LLP:0.1323, LCC: 73969.1908 Individual 341 LLP:0.1055, LCC: 79753.2520 Individual 758 LLP:0.0589, LCC: 92925.9590	Individual 1080 LLP:0.1430, LCC: 73766.3720 Individual 1155 LLP:0.1335, LCC: 75355.8050 Individual 1298 LLP:0.3738, LCC: 49932.2679 Individual 293 LLP:0.1242, LCC: 76540.7231 Individual 1091 LLP:0.1779, LCC: 69115.9254

Η αλλαγή των βαρών των δύο κριτηρίων παρουσιάζεται έντονα και σε αυτή τη μέθοδο, όπου οι επιλεγμένες ως βέλτιστες λύσεις έχουν αυξημένες τιμές για το κριτήριο LLP και μειωμένες για το LCC. Φαίνεται πως ακόμα και για τη περίπτωση του φορτίου των 20 kWh, υπάρχουν λύσεις που παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή τιμή του LLP, με τον NSGA-II να εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με αυτό.

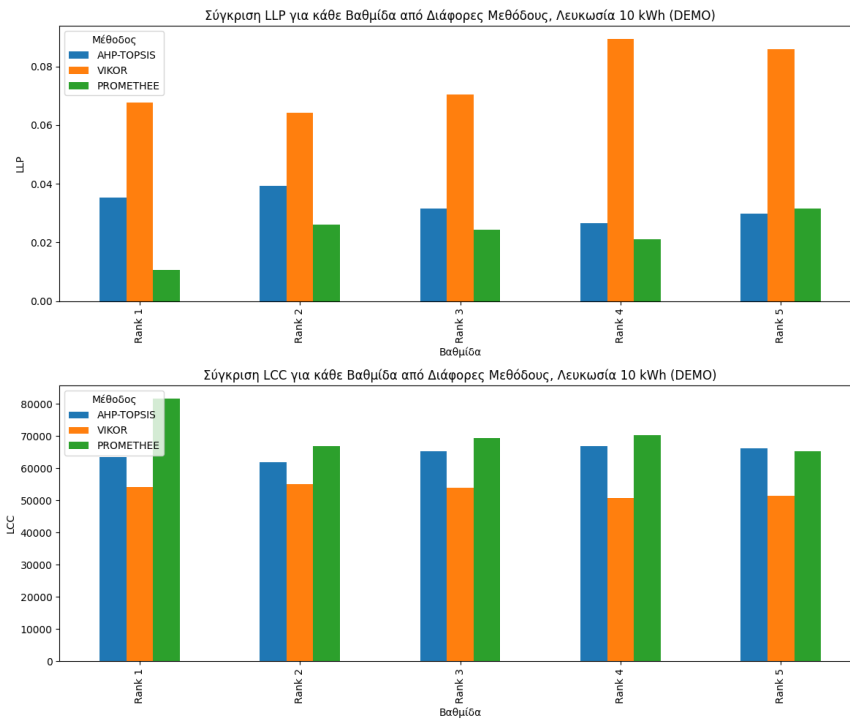
7.4.2. Συμπεράσματα Πολυκριτηριακών μεθόδων

Με βάση την παραπάνω ανάλυση και σύγκριση των μεθόδων, παρατηρείται πως οι βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν για κάθε περίπτωση είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους. Καμία μέθοδος δεν εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα σε σύγκριση με τις άλλες, παρουσιάζοντας συνολικά ανταγωνιστική απόδοση. Παρακάτω παρατίθενται 12 διαγράμματα, που απεικονίζουν τις περιπτώσεις της Λευκωσίας για 10kWh και 20kWh, τα ελάχιστα και μέγιστα φορτία αντίστοιχα, όπου συγκρίνονται οι βέλτιστες λύσεις που

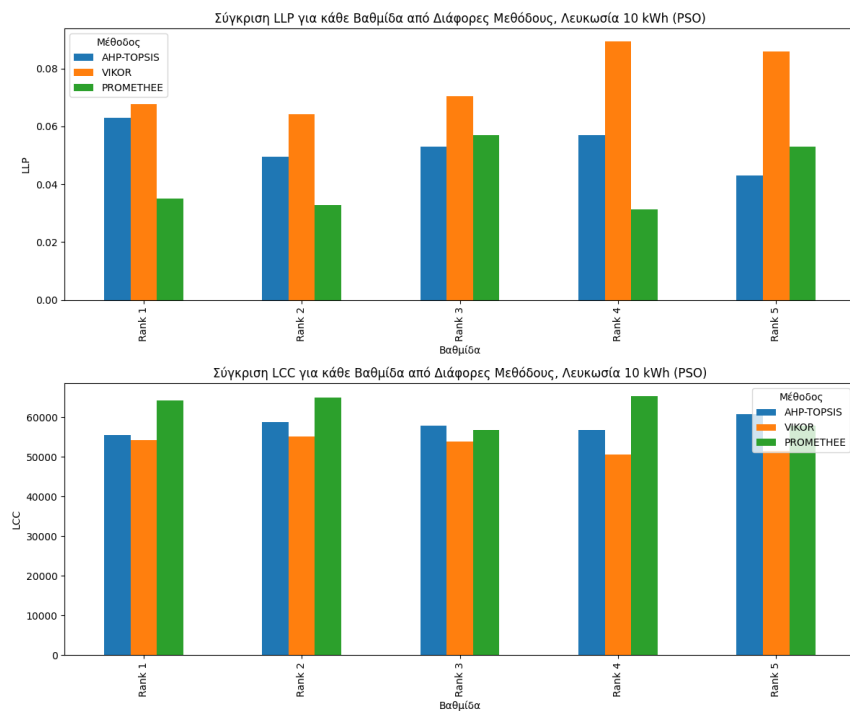
προέκυψαν για κάθε αλγόριθμο, από κάθε μέθοδο, στη περίπτωση των βαρών 0.8 και 0.2 για τα LLP και LCC αντίστοιχα:



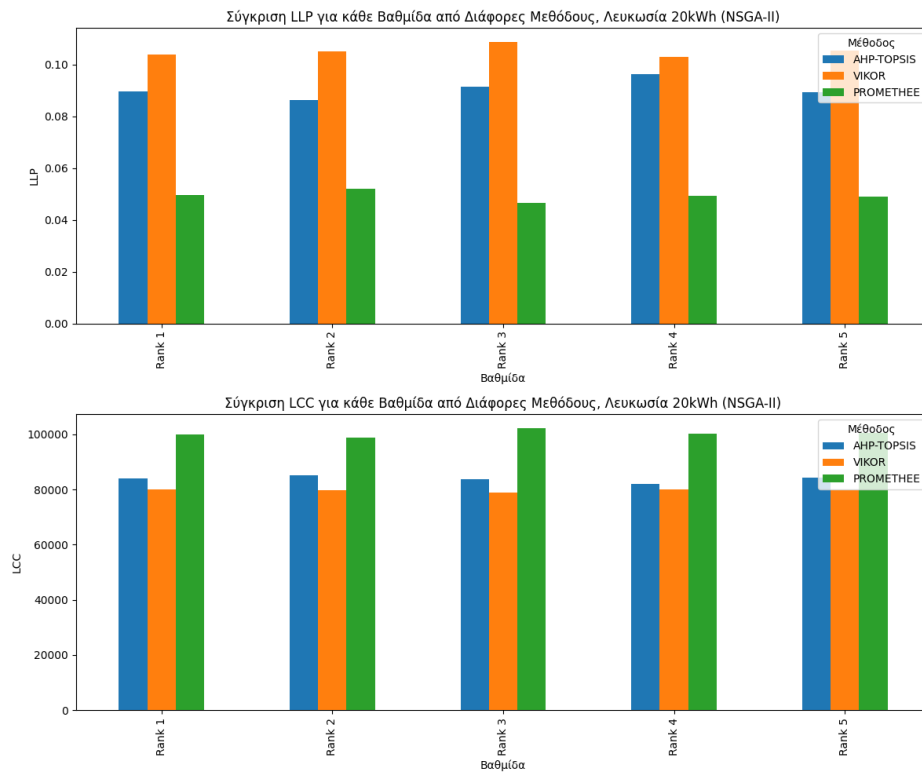
Εικόνα 51: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 10 kWh, NSGA-II



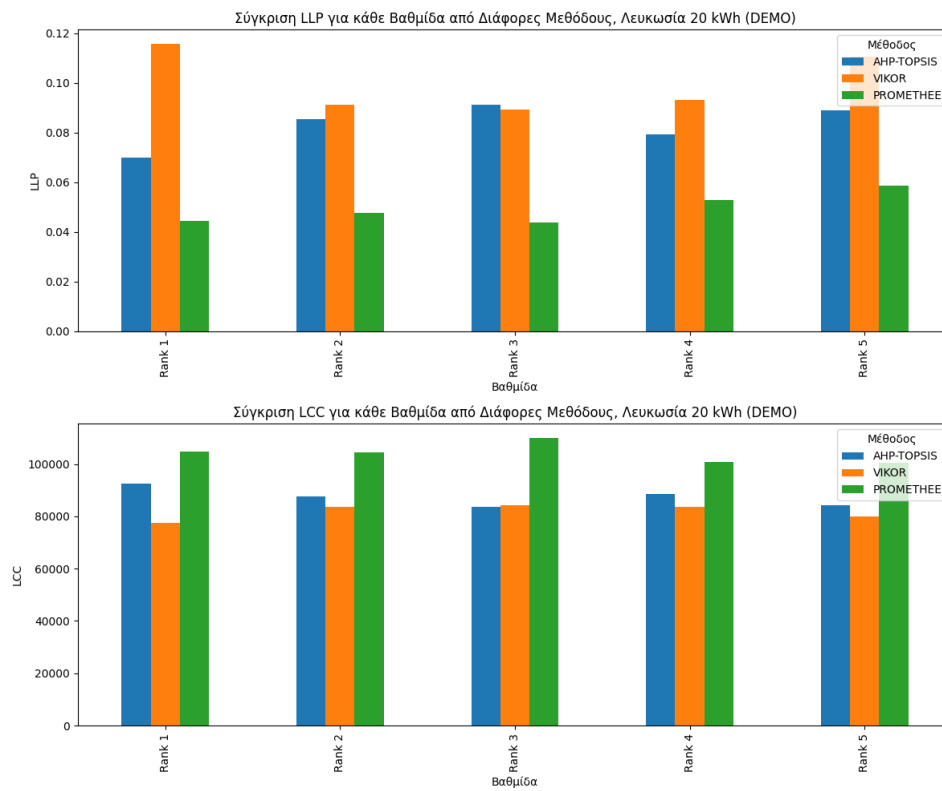
Εικόνα 52: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 10 kWh, DEMO



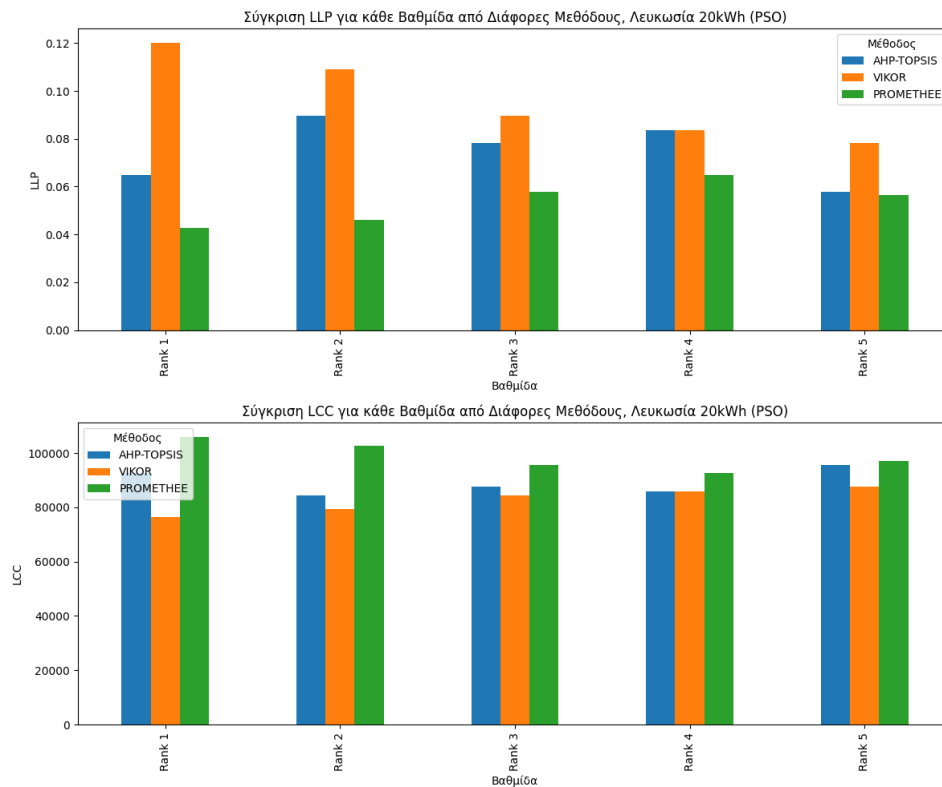
Εικόνα 53: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 10 kWh, PSO



Εικόνα 54: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 20 kWh, NSGA-II

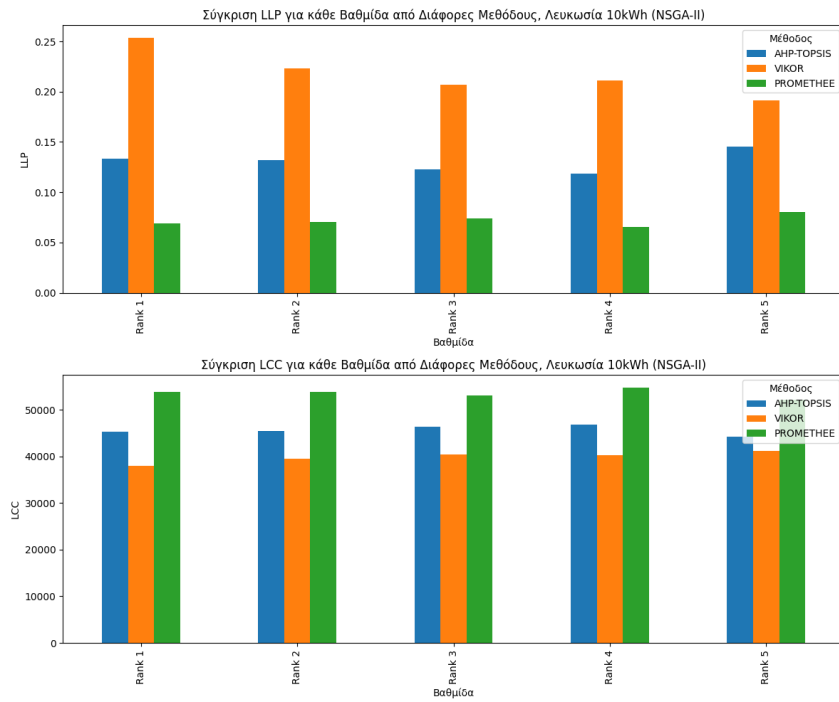


Εικόνα 55: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 20 kWh, DEMO

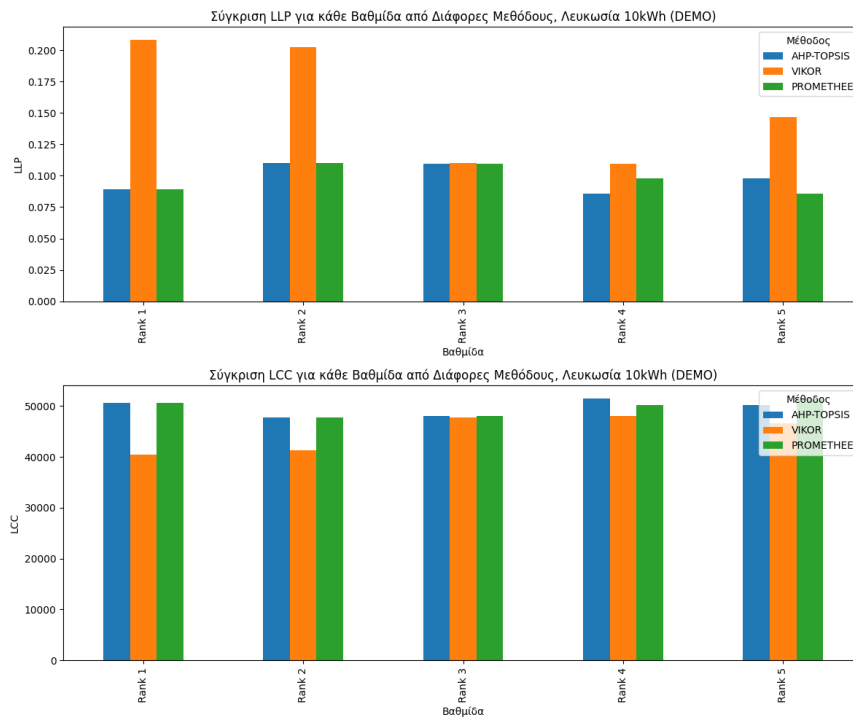


Εικόνα 56: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 20 kWh, PSO

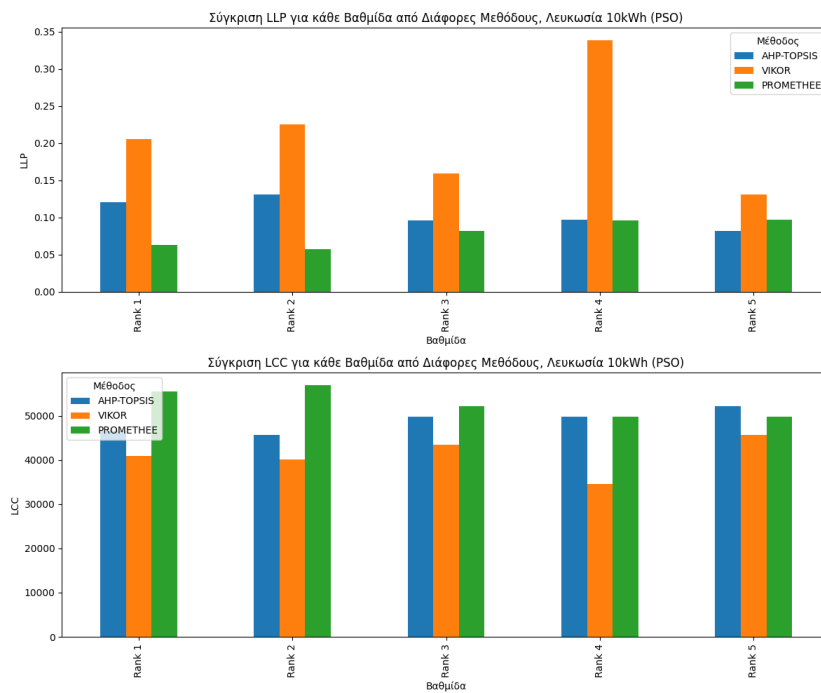
Αντίστοιχα διαγράμματα για τη περίπτωση των ισάξιών βαρών στις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, 0.5 και 0.5, για τη πόλη της Λευκωσίας και το ελάχιστο και μέγιστο φορτίο είναι τα παρακάτω:



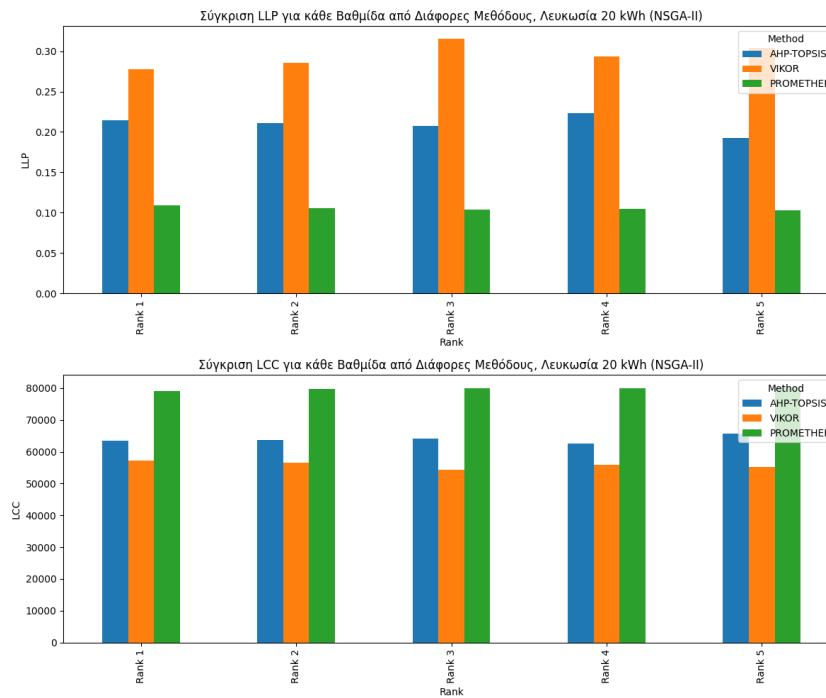
Εικόνα 57: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 10 kWh, NSGA-II



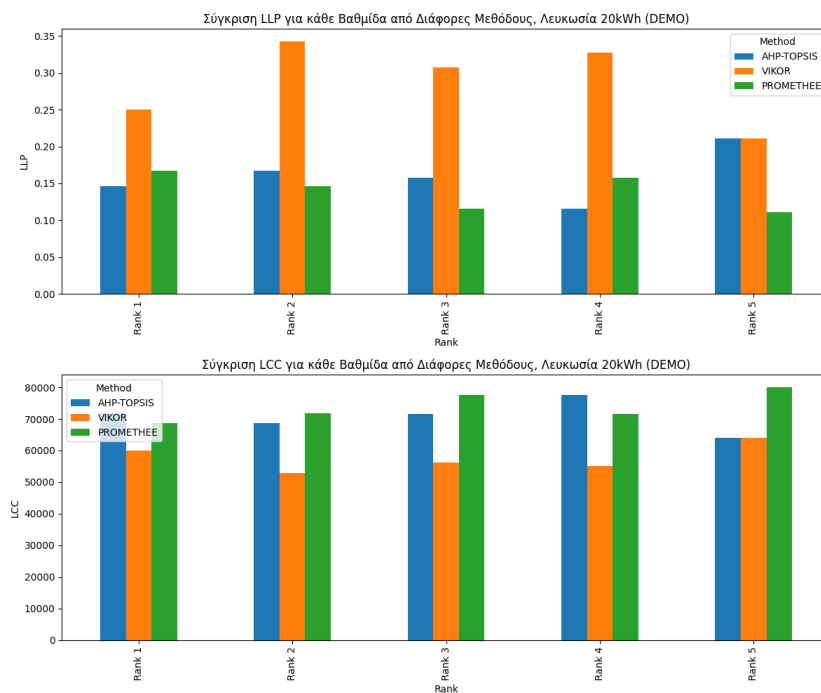
Εικόνα 58: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 10 kWh, DEMO



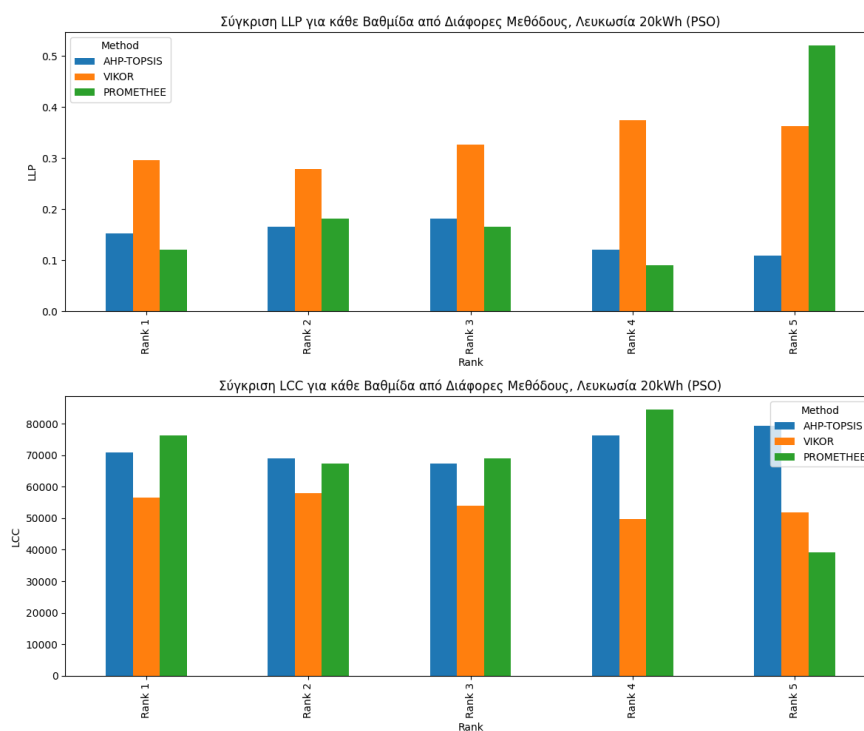
Εικόνα 59: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 10 kWh, PSO



Εικόνα 60: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 20 kWh, NSGA-II



Εικόνα 61: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 20 kWh, DEMO



Εικόνα 62: Σύγκριση βέλτιστων LLP και LCC, Λευκωσία 20 kWh, PSO

Σύμφωνα με τα παραπάνω γραφήματα, καθώς και τα υπόλοιπα αποτελέσματα των πόλεων και φορτίων, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: Κατά την μέθοδο AHP-

TOPSIS, οι 5 καλύτερες λύσεις για όλες τις περιπτώσεις φορτίων, πόλεων και αλγορίθμων, παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές τιμές για το LLP, ενώ οι τιμές του LCC παραμένουν σε αποδεκτά επίπεδα. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της δομής των δύο αυτών μεθόδων: Η AHP επιτρέπει την αξιολόγηση των κριτηρίων μέσω ζευγαρωτών συγκρίσεων και την απόδοση βαρών σε αυτά, ενώ η TOPSIS χρησιμοποιεί τα ίδια βάρη για τον υπολογισμό της απόστασης της κάθε λύσης από την ιδανική. Έτσι, επιτρέπεται η εξισορρόπηση της επίδοσης και στα δύο κριτήρια, στη προκειμένη περίπτωση, διατηρώντας και το LLP και το LCC, σε χαμηλά επίπεδα και στις δύο περιπτώσεις βαρών. Ταυτόχρονα ο αλγόριθμος NSGA-II φαίνεται να υπερτερεί σε ορισμένες περιπτώσεις όσον αφορά τη προσέγγιση της ιδανική λύσης, με υψηλότερο closeness coefficient.

Στη μέθοδο VIKOR, οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζουν υψηλότερες τιμές για το LLP και χαμηλότερες για το LCC, ακόμα και στην πρώτη περίπτωση βαρών, όπου δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην αντικειμενική συνάρτηση LLP. Το αποτέλεσμα αυτό, προκύπτει από το γεγονός πως η μέθοδος VIKOR επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση λύσεων μέσω ενός συμβιβασμού, δίνοντας έμφαση τόσο στη συλλογική χρησιμότητα όσο και στην ατομική. Αυτό σημαίνει ότι οι λύσεις μπορεί να επιτυγχάνουν χαμηλότερο LCC αλλά να μην είναι τόσο επιτυχείς στη μείωση του LLP, λόγω του σχεδιασμού της μεθόδου να δίνει προτεραιότητα στο κριτήριο που θεωρεί πως έχει μεγαλύτερη επίδραση στην τελική κατάταξη των λύσεων.

Τέλος, κατά την PROMETHEE επιτυγχάνονται οι χαμηλότερες τιμές LLP σε σχέση με τις δύο προηγούμενες μεθόδους, ενώ το LCC παραμένει επίσης σε ανταγωνιστικά επίπεδα. Η μέθοδος αυτή, όπως και η AHP-TOPSIS βασίζεται στις ζευγαρωτές συγκρίσεις των εναλλακτικών λύσεων και τη χρήση συναρτήσεων προτίμησης, επιτρέποντας έτσι τη λεπτομερή ανάλυση των προτιμήσεων των κριτηρίων, οδηγώντας σε λύσεις που πετυχαίνουν χαμηλότερο LLP, διατηρώντας παράλληλα το LCC σε ικανοποιητικά επίπεδα.

7.5 *Συμπεράσματα*

Με βάση τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν για τις τρεις πολυκριτηριακές μεθόδους, AHP-TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE και τις επιδόσεις των αλγορίθμων βελτιστοποίησης NSGA-II, DEMO και Particle Swarm Optimization, στις πόλεις Λευκωσία, Λάρνακα και Λεμεσό για τα φορτία 10, 15 και 20 kWh, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Ο αλγόριθμος NSGA-II γενικά επιδεικνύει αξιόλογες επιδόσεις όσον αφορά τις τιμές του LLP και LCC, με σταθερότητα σε όλα τα επίπεδα φορτίων (10, 15 και 20 kWh).

Αυτό οφείλεται σε σημαντικό βαθμό, στη δυνατότητα του NSGA-II να κατανέμει ομοιόμορφα το μέτωπο Παρέτο στα δύο άκρα των αντικειμενικών συναρτήσεων, προσφέροντας έτσι περισσότερες επιλογές βέλτιστων λύσεων.

Ο αλγόριθμος DEMO εμφανίζει κάποιες από τις καλύτερες λύσεις για τα LLP και LCC. Στη περίπτωση της μεθόδου AHP-TOPSIS, οι τιμές του closeness coefficient για τον DEMO, είναι γενικά υψηλότερες στις βέλτιστες λύσεις σε σχέση με τους άλλους δύο αλγορίθμους, υποδεικνύοντας την αποδοτικότητα του στην εύρεση βέλτιστων λύσεων πλησίον της ιδανικής. Ωστόσο η μεγάλη διακύμανση τιμών στις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, κατά την διαδικασία επιλογής των 5 βέλτιστων λύσεων, καθιστά τον DEMO ασταθή για το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Τέλος, και ο Particle Swarm Optimization παρουσιάζει αξιολογες αποδόσεις, με σταθερές και ικανοποιητικές τιμές για τα δύο κριτήρια. Παρέχει οικονομικά αποδοτικές λύσεις με χαμηλά κόστη LCC, ακόμα και όταν δίνεται προτεραιότητα στο LLP έναντι του κόστους. Η απόδοση του, ωστόσο, μπορεί να ποικίλλει, ανάλογα με τις συνθήκες. Αν και οι λύσεις του PSO δεν είναι πάντα οι κορυφαίες, εμφανίζονται ανταγωνιστικές σε περιπτώσεις, ειδικά στη μέθοδο PROMETHEE.

Όσον αφορά τις πολυκριτηριακές μεθόδους και τα αποτελέσματά τους, τόσο στη περίπτωση υπεροχής του κριτηρίου LLP έναντι του LCC, όσο και στην περίπτωση ισοδύναμης στάθμισης, η AHP-TOPSIS παρέχει τα πιο ικανοποιητικά και σταθερά αποτελέσματα. Η υψηλή ακρίβεια στους συντελεστές εγγύτητας, ακόμα και όταν έχουν χαμηλότερες τιμές (περίπτωση ίσων βαρών), σε συνδυασμό με την αντικειμενική σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων, βοηθούν στην ανάδειξη των βέλτιστων λύσεων κάθε περίπτωσης.

Μέσω των διαγραμμάτων, παρατηρείται πως είτε για το ελάχιστο, είτε για το μέγιστο φορτίο στη Λευκωσία, η μέθοδος VIKOR παρουσιάζει αυξημένες τιμές για το LLP, δίνοντας έμφαση στο LCC, ακόμα και όταν τα βάρη είναι ίσα. Η μέθοδος PROMETHEE αν και εμφανίζει ικανοποιητικές τιμές και για τα δύο κριτήρια, δεν παρουσιάζει την ίδια σταθερότητα στις βέλτιστες λύσεις όσο η AHP-TOPSIS. Παρόμοια συμπεράσματα, λόγω των κοινών θερμοκρασιών και ηλιακών ακτινοβολιών, θα ίσχυαν και για τη περίπτωση της Λάρνακας και της Λεμεσού.

Τέλος, σύμφωνα με τα συνολικά αποτελέσματα των αλγορίθμων και των μεθόδων και για τις δύο περιπτώσεις βαρών ($0.8 - 0.2$ και $0.5 - 0.5$ για τις αντικειμενικές συναρτήσεις LLP και LCC αντίστοιχα), παρατηρείται πως οι διαφορές δεν είναι τόσο μεγάλες. Ωστόσο, στην περίπτωση ισάξιων βαρών υπήρχαν περιπτώσεις όπου επιλέχθηκαν βέλτιστες λύσεις με υψηλές τιμές για το LLP (π.χ. 0.6875 ή 0.5206), κάτι το οποίο δεν είναι αποδεκτό. Έτσι, προτείνεται ως κατάλληλος συνδυασμός βαρών ο $0.8 - 0.2$.

Βάσει των παραπάνω συμπερασμάτων, επιλέγεται ως βέλτιστος συνδυασμός αλγορίθμου και πολυκριτηριακής μεθόδου, ο NSGA-II και η AHP-TOPSIS, από τη περίπτωση βαρών 0.8 – 0.2. Συνεπώς, οι βέλτιστες λύσεις που τελικά επιλέχθηκαν είναι οι παρακάτω:

Πίνακας 45: Βέλτιστες λύσεις, Λευκωσία

Λευκωσία
10 kWh
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0455, 'LCC': 59670.7675}, Closeness Coefficient: 0.8948
15 kWh
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.065, 'LCC': 71571.8243}, Closeness Coefficient: 0.8636
20 kWh
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0897, 'LCC': 83985.7914}, Closeness Coefficient: 0.8564

Πίνακας 46: Βέλτιστες λύσεις, Λάρνακα

Λάρνακα
10 kWh
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0469, 'LCC': 58173.6822}, Closeness Coefficient: 0.8948
15 kWh
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0688, 'LCC': 69240.2017}, Closeness Coefficient: 0.8694
20 kWh
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0876, 'LCC': 83610.8918}, Closeness Coefficient: 0.8470

Πίνακας 47: Βέλτιστες λύσεις, Λεμεσός

Λεμεσός
10 kWh
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0589, 'LCC': 56943.5076}, Closeness Coefficient: 0.8869
15 kWh
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.073, 'LCC': 70080.4614}, Closeness Coefficient: 0.8731
20 kWh
Rank 1: Configuration: {'LLP': 0.0919, 'LCC': 84444.3978}, Closeness Coefficient: 0.8481

Με βάση τις παραπάνω λύσεις, και τις μεταβλητές απόφασης που αντιστοιχούν σε κάθε μία από αυτές, καθορίζεται ο βέλτιστος αριθμός παράλληλων φωτοβολταϊκών μονάδων και η βέλτιστη χωρητικότητα της μπαταρίας που θα χρησιμοποιηθούν τελικά για τη κατασκευή του φωτοβολταϊκού. Συγκεκριμένα:

Για τη Λευκωσία και τα 10 kWh, οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που επιλέχθηκαν είναι: $N_{pm} = 73$, $C_{bat} = 16753$ W.

Για τη Λευκωσία και τα 15 kWh, οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που επιλέχθηκαν είναι:
 $N_{pm} = 84$, $C_{bat} = 23029$ W.

Για τη Λευκωσία και τα 20 kWh, οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που επιλέχθηκαν είναι:
 $N_{pm} = 102$, $C_{bat} = 28331$ W.

Για τη Λάρνακα και τα 10 kWh, οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που επιλέχθηκαν είναι:
 $N_{pm} = 66$, $C_{bat} = 17149$ W.

Για τη Λάρνακα και τα 15 kWh, οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που επιλέχθηκαν είναι:
 $N_{pm} = 82$, $C_{bat} = 21868$ W.

Για τη Λάρνακα και τα 20 kWh, οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που επιλέχθηκαν είναι:
 $N_{pm} = 97$, $C_{bat} = 29206$ W.

Για τη Λεμεσό και τα 10 kWh, οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που επιλέχθηκαν είναι:
 $N_{pm} = 67$, $C_{bat} = 15925$ W.

Για τη Λεμεσό και τα 15 kWh, οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που επιλέχθηκαν είναι:
 $N_{pm} = 80$, $C_{bat} = 22827$ W.

Για τη Λεμεσό και τα 20 kWh, οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που επιλέχθηκαν είναι:
 $N_{pm} = 103$, $C_{bat} = 28399$ W.

8

Επίλογος και Μελλοντικές

Προσεγγίσεις

8.1 Γενικά Συμπεράσματα

Η διαρκής αναζήτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους και επίκαιρους τομείς έρευνας παγκοσμίως. Οι περιβαλλοντικές προκλήσεις που προκύπτουν από την κλιματική αλλαγή και την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων επιβάλλουν την ανάγκη για βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις παραγωγής ενέργειας. Σε αυτό το πλαίσιο, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία αναδεικνύεται ως μία από τις πιο υποσχόμενες μεθόδους εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, μίας ανεξάντλητης και καθαρής πηγής ενέργειας.

Η ηλιακή ενέργεια έχει το πλεονέκτημα της δυνατότητας άμεσης μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτά τα συστήματα έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά αποδοτικά για την παραγωγή ενέργειας ειδικά σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η πρόσβαση σε συμβατικά δίκτυα ηλεκτρισμού είναι περιορισμένη ή ακόμα και μηδενική. Ωστόσο, παρά τα πολλά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, υπάρχουν επίσης σημαντικές προκλήσεις, όπως το υψηλό αρχικό κόστος και η ανάγκη αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της διαλείπουσας φύσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με το θέμα βελτιστοποίησης των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων, προκειμένου να καταστούν πιο αποδοτικά και οικονομικά βιώσιμα. Οι προτεινόμενες τεχνικές πολυκριτήριας βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκαν επιδίωξαν την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας απώλειας φορτίου (Loss of Load Probability,

LLP) και του κόστους κύκλου ζωής (Life Cycle Cost, LCC). Η προσέγγιση αυτή περιλάμβανε τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων και μεθόδων πολυκριτήριας λήψης αποφάσεων, ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές της Κύπρου.

Η επιλογή της Κύπρου ως περιοχή μελέτης βασίστηκε στις ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες για την εγκατάσταση των συστημάτων, καθώς και στην ανάγκη για ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας της χώρας. Η μελέτη επικεντρώθηκε στις πόλεις Λευκωσία, Λάρνακα και Λεμεσό, εξετάζοντας τις τοπικές κλιματικές συνθήκες και τα ενεργειακά απαιτούμενα φορτία για κάθε περίπτωση. Μέσω της εφαρμογής των προτεινόμενων αλγορίθμων, NSGA-II, DEMO και Particle Swarm Optimization (PSO), εντοπίστηκαν οι βέλτιστες λύσεις για την εγκατάσταση και λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις τεχνικές όσο και τις οικονομικές παραμέτρους.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα: Ο NSGA-II αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην εύρεση ενός διαφοροποιημένου συνόλου λύσεων. Η ικανότητα του να διαιρεί την ποικιλομορφία των λύσεων, στο συγκεκριμένο πρόβλημα, ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη. Ειδικότερα για την ελαχιστοποίηση της LLP και LCC, παρείχε λύσεις που εξισορροπούν αποτελεσματικά τα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια.

Ο PSO ήταν αποτελεσματικός στη εύρεση αποδεκτών λύσεων, με ισορροπία ανάμεσα στα δύο κριτήρια. Ωστόσο, οι λύσεις του δεν είχαν πάντα την ίδια ποικιλομορφία με αυτές του NSGA-II. Τέλος ο DEMO συνδύασε την απλότητα της διαφορικής εξέλιξης με την πολυκριτήρια βελτιστοποίηση. Παρείχε αξιόπιστες και ισορροπημένες λύσεις και ήταν αποτελεσματικός στην διερεύνηση του χώρου αποφάσεων.

Όσον αφορά τις Πολυκριτηριακές Μεθόδους Λήψης Αποφάσεων, η υβριδική μέθοδος AHP-TOPSIS αποδείχθηκε η πιο κατάλληλη για την εξισορρόπηση των βαρών των αντικειμενικών συναρτήσεων. Αντίθετα, η VIKOR επικεντρώθηκε στην εύρεση συμβιβαστικών λύσεων που ικανοποιούν περισσότερο και τα δύο κριτήρια, ακόμα και στη περίπτωση προτίμησης του κριτηρίου LLP έναντι του LCC, ενώ η PROMETHEE έδωσε μεγάλη έμφαση στις προτιμήσεις του λήπτη αποφάσεων, ώστε να παρουσιάσει τελικά σχετικά αρκετά ακριβείς βέλτιστες λύσεις.

Τελικά, με βάση τις βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν από όλους τους αλγορίθμους, τις μεθόδους και τα φορτία, φάνηκε πως ο αλγόριθμος NSGA-II είναι γενικά καλύτερος, όσον αφορά όλους τους περιοριστικούς παράγοντες που λήφθηκαν υπόψη. Συνδυαστικά με τη πολυκριτήρια υβριδική μέθοδο AHP-TOPSIS, προσέφερε αξιόλογες και ισορροπημένες λύσεις, στη περίπτωση όλων των φορτίων, ανάμεσα στις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, οπότε και προέκυψαν οι βέλτιστες λύσεις για το πρόβλημα.

8.2

Περιορισμοί

Κατά τη διάρκεια της μελέτης αυτής, αντιμετωπίστηκαν διάφοροι περιορισμοί που επηρέασαν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Παρόλο που η συγκεκριμένη υλοποίηση εμφανίζει ικανοποιητικά και οριοθετημένα αποτελέσματα και αποδεκτά σφάλματα, είναι σημαντικό να αναφερθούν ορισμένες δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν:

1. Το γεγονός πως η μελέτη βασίστηκε σε μεγάλο βαθμό σε κλιματικά δεδομένα συγκεκριμένης περιόδου και τοποθεσιών, μπορεί να επηρεάσει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων έως ένα βαθμό. Παρόλο που αυτά τα δεδομένα λήφθηκαν από έγκυρο μετεωρολογικό ιστότοπο, δεν συνεπάγεται αυτόματα πως δεν περιείχαν λάθη και ανακρίβειες.
2. Οι απλοποιήσεις και υποθέσεις που έγιναν κατά την ανάπτυξη των μοντέλων προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ενδέχεται να έχουν περιορισμούς όσον αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους. Πιο συγκεκριμένα, κατά την υλοποίηση και υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης LLP, λόγω του ότι δεν υπάρχει προκαθορισμένος τρόπος υπολογισμού του πιθανού ελλείμματος ενέργειας και της ισχύς εξόδου των πάνελ, που να λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμέτρους που ήταν επιθυμητό, έγιναν ορισμένες απλοποιήσεις στα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να έχουν και τα αποτελέσματα που προέκυπταν μία πιο σωστή εικόνα.
3. Οι οικονομικές εκτιμήσεις, η τεχνική υποδομή και οι τεχνολογικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης LCC, βασίστηκαν σε τρέχουσες τιμές και συγκεκριμένες προδιαγραφές των εξαρτημάτων για το φωτοβολταϊκό σύστημα. Ωστόσο, οι τιμές των υλικών, το κόστος εγκατάστασης, σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας μπορεί να οδηγήσει σε βελτιώσεις που δεν λήφθηκαν υπόψη στη μελέτη.
4. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν, NSGA-II, DEMO και PSO έχουν τους δικούς τους περιορισμούς και ιδιαιτερότητες. Η ευαισθησία τους στις αρχικές συνθήκες και η παραμετροποίηση που απαιτούν σε ορισμένα μέρη, μπορεί να επηρεάσει την απόδοση και αξιοπιστία τους.
5. Η πολυκριτήρια αξιολόγηση βασίζεται σε υποκειμενικές κρίσεις και στις βαρύτητες που αποδόθηκαν στα 2 κριτήρια. Στη παρούσα εργασία, υλοποιήθηκαν δύο

περιπτώσεις : στη πρώτη δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση στο κριτήριο LLP, εις βάρος φυσικά του LCC, καθώς θεωρήθηκε σημαντικότερη η σίγουρη ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών, στη περίπτωση κάθε φορτίου, παρά στο χρηματικό ποσό που θα απαιτούταν για τη κατασκευή του συστήματος, ενώ στη πρώτη δόθηκε ισάξια βαρύτητα και στα δύο κριτήρια. Η υλοποίηση ακόμα περισσότερων δοκιμών με διαφορετικά βάρη και προτιμήσεις, θα μπορούσε να αποφέρει ακόμα καλύτερα και διαφορετικά αποτελέσματα.

Η αναγνώριση και κατανόηση των παραπάνω περιορισμών είναι κρίσιμη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

8.3 Μελλοντικές Προσεγγίσεις και Βελτιώσεις

Μερικές από τις βασικές μελλοντικές προσεγγίσεις θα ήταν η δοκιμή παραπάνω αλγορίθμων βελτιστοποίησης και πολυκριτηριακών μεθόδων, προκειμένου να αποσαφηνιστεί αν έχουν την ίδια αποδοτικότητα, όσο αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη. Θα μπορούσαν να γίνουν περισσότερες εκτεταμένες δοκιμές , με τη χρήση μικρότερου μεγέθους δεδομένων, ώστε να ελεγχθεί παραπάνω η αξιοπιστία των μοντέλων όταν υπάρχουν ακόμα λιγότερες πληροφορίες. Ίσως ακόμη και η ενσωμάτωση ευφών συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης ενέργειας μπορεί να βελτιώσει την απόδοση και αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Επιπλέον, θα μπορούσαν να ενταχθούν ακόμα 2 ή 3 αντικειμενικές συναρτήσεις παραπάνω, ενεργειακού αλλά και οικονομικού υποβάθρου, ώστε να υπάρχουν ακόμα περισσότεροι παράμετροι να ελεγχθούν και τελικά να προκύψουν λύσεις οι οποίες θα δίνουν περαιτέρω πληροφορίες για τη βέλτιστη κατασκευή ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Ακόμα, μία εκτενέστερη ανάλυση κόστους – οφέλους, που λαμβάνει υπόψη την απόσβεση του αρχικού κόστους, τα λειτουργικά έξοδα και τα μακροπρόθεσμα οικονομικά οφέλη, θα προσφέρει μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της οικονομικής βιωσιμότητας των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η διερεύνηση, επίσης, της δυνατότητας ενσωμάτωσης των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων με άλλα ανανεώσιμα ενεργειακά συστήματα, όπως οι ανεμογεννήτριες ή τα συστήματα γεωθερμίας, ή ακόμα και με γεννήτριες πετρελαίου [59], μπορεί να προσφέρει ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία και αξιοπιστία. Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να μειώσουν την εξάρτηση από μία μόνο πηγή ενέργειας και να βελτιώσουν την ενεργειακή ασφάλεια.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Dhimish και S. Silvestre, ‘Estimating the impact of azimuth-angle variations on photovoltaic annual energy production’, *Clean Energy*, τ. 3, τχ. 1, σσ. 47–58, Φεβρουαρίου 2019, doi: 10.1093/ce/zky022.
- [2] S. Monna, R. Abdallah, A. Juaidi, A. Albatayneh, A. J. Zapata-Sierra, και F. Manzano-Agugliaro, ‘Potential Electricity Production by Installing Photovoltaic Systems on the Rooftops of Residential Buildings in Jordan: An Approach to Climate Change Mitigation’, *Energies*, τ. 15, τχ. 2, σ. 496, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.3390/en15020496.
- [3] ‘Λιγνίτης’. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/30-syntomes-perigrafes-orykton/94-lignitis>
- [4] ΦΟΥΝΤΟΡΑΔΑΚΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ, ‘ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΛΙΓΝΙΤΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΟΥ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ’, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ, 2008.
- [5] Ελίσσάβετ Παναγιωτίδου, ‘Τα όρια βιωσιμότητας του διαχωρισμού της εξορυκτικής δραστηριότητας λιγνίτη και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη στον ενεργειακό άξονα Δυτικής Μακεδονίας’, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης ΔΠΜΣ Δίκαιο και Μηχανική της Ενέργειας, 2017.
- [6] ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ, ‘ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΛΙΓΝΙΤΗ: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ’, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ, 2015.
- [7] ‘<https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/what-is-nuclear-energy.pdf>’.
- [8] ‘<http://kodipheet.chem.uoi.gr/contents/9%20KEF%209.pdf>’.
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Nuclear Power Reactors in the World*, τ. REFERENCE DATA SERIES No. 2 2023 Edition.
- [10] ‘Chapter 8: PETROLEUM’, Penn State University. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://personal.ems.psu.edu/~radovic/Chapter8.pdf>
- [11] R.E. Chapman, *Petroleum Geology*, τ. Developments in Petroleum science 16. ELSEVIER Science Publishers B.V.
- [12] ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΣΤΑΥΡΟΥ, ‘Το μέλλον του πετρελαίου’, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ Νομική Σχολή και Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Τμήμα Οικονομικών Επιστημών, 2021.

- [13] ‘<https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy>’.
- [14] ‘<https://hellenic-college.gr/wp-content/uploads/works/energy-sources/geothermia.htm>’.
- [15] ‘<https://novavolt.gr/blogs/ananeosimes-piges-energeias/ydravliki-energeia>’.
- [16] ‘<https://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/74-90.pdf>’.
- [17] *Solar Photovoltaic Technologies*. στο UNIT 1 PHOTOVOLTAIC EFFECT. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://egyankosh.ac.in/bitstream/123456789/47559/1/Unit-1.pdf>
- [18] Κ.Θ.Δ.ερβος, *Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και στις φωτοβολταϊκές διατάξεις*. Εκδόσεις ΕΜΠ, 2009.
- [19] ‘www.selasenergy.gr’.
- [20] K. Branker, M. J. M. Pathak, και J. M. Pearce, ‘A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, τ. 15, τχ. 9, σσ. 4470–4482, Δεκεμβρίου 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.104.
- [21] Muhammad Ahsan, ‘Photovoltaic Cell Construction’, Electrical Engineering Department (TE) NED UET. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.academia.edu/10111550/Photovoltaic_Cell_Construction
- [22] ‘Photovoltaic or Solar Cell (SPV CELL)’, *Vikram Univ.*, [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.vikramuniv.ac.in/files/academic/e-Resources2020-21/engg2020-21/26-4-22/BE-2-SEM-SPV_CELL-AMRITA_SHUKLA.pdf
- [23] ‘SOLAR PHOTOVOLTAICS’, στο 2. , σ. 96. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.uprm.edu/aret/docs/Ch_5_PV_systems.pdf
- [24] Χ. Βουλβουκέλης, ‘ΣΧΕΔΙΑΣΗ, ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ «ΚΟΥΚΟΣ» ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ’, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2013.
- [25] A. Konak, D. W. Coit, και A. E. Smith, ‘Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial’, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, τ. 91, τχ. 9, σσ. 992–1007, Σεπτεμβρίου 2006, doi: 10.1016/j.rss.2005.11.018.
- [26] A. Tharwat, E. H. Houssein, M. M. Ahmed, A. E. Hassanien, και T. Gabel, ‘MOGOA algorithm for constrained and unconstrained multi-objective optimization problems’, *Appl. Intell.*, τ. 48, τχ. 8, σσ. 2268–2283, Αυγούστου 2018, doi: 10.1007/s10489-017-1074-1.

- [27] S. Dutta και K. N. Das, ‘A Survey on Pareto-Based EAs to Solve Multi-objective Optimization Problems’, στο *Soft Computing for Problem Solving*, τ. 817, J. C. Bansal, K. N. Das, A. Nagar, K. Deep, και A. K. Ojha, Επιμ., στο *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 817. , Singapore: Springer Singapore, 2019, σσ. 807–820. doi: 10.1007/978-981-13-1595-4_64.
- [28] D. Wang, D. Tan, και L. Liu, ‘Particle swarm optimization algorithm: an overview’, *Soft Comput.*, τ. 22, τχ. 2, σσ. 387–408, Ιανουαρίου 2018, doi: 10.1007/s00500-016-2474-6.
- [29] A. Ghodrattnama, F. Jolai, και R. Tavakkoli-Moghaddam, ‘Solving a new multi-objective multi-route flexible flow line problem by multi-objective particle swarm optimization and NSGA-II’, *J. Manuf. Syst.*, τ. 36, σσ. 189–202, Ιουλίου 2015, doi: 10.1016/j.jmsy.2014.06.009.
- [30] Yuhui Shi and Russell Eberhart, ‘A Modified Particle Swarm Optimizer’, *Dep. Electr. Eng. Indiana Univ. Purdue Univ. Indianap.*, σ. 5.
- [31] T. Tušar και B. Filipic, ‘Performance of the DEMO Algorithm on the Bi-objective BBOB Test Suite’, στο *Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, Denver Colorado USA: ACM, Ιουλίου 2016, σσ. 1249–1256. doi: 10.1145/2908961.2931708.
- [32] F. Jalilantabar, B. Ghobadian, G. Najafi, R. Mamat, και A. P. Carlucci, ‘Multi-objective NSGA-II optimization of a compression ignition engine parameters using biodiesel fuel and exhaust gas recirculation’, *Energy*, τ. 187, σ. 115970, Νοεμβρίου 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.115970.
- [33] J. Heidary Dahooie, A. Husseinazadeh Kashan, Z. Shoaie Naeini, A. S. Vanaki, E. K. Zavadskas, και Z. Turskis, ‘A Hybrid Multi-Criteria-Decision-Making Aggregation Method and Geographic Information System for Selecting Optimal Solar Power Plants in Iran’, *Energies*, τ. 15, τχ. 8, σ. 2801, Απριλίου 2022, doi: 10.3390/en15082801.
- [34] R. V. Rao, D. P. Rai, και J. Balic, ‘Multi-objective optimization of abrasive waterjet machining process using Jaya algorithm and PROMETHEE Method’, *J. Intell. Manuf.*, τ. 30, τχ. 5, σσ. 2101–2127, Ιουνίου 2019, doi: 10.1007/s10845-017-1373-8.
- [35] M. C. Ong, Y. T. Leong, Y. K. Wan, και I. M. L. Chew, ‘Multi-objective Optimization of Integrated Water System by FUCOM-VIKOR Approach’, *Process Integr. Optim. Sustain.*, τ. 5, τχ. 1, σσ. 43–62, Μαρτίου 2021, doi: 10.1007/s41660-020-00146-3.
- [36] D. H. Muhsen, M. Nabil, H. T. Haider, και T. Khatib, ‘A novel method for sizing of standalone photovoltaic system using multi-objective differential evolution algorithm and hybrid multi-criteria decision making methods’, *Energy*, τ. 174, σσ. 1158–1175, Μαΐου 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.046.

- [37] A. D. Berdie, M. Osaci, I. Muscalagiu, και C. Barz, 'A combined approach of AHP and TOPSIS methods applied in the field of integrated software systems', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, τ. 200, σ. 012041, Μαΐου 2017, doi: 10.1088/1757-899X/200/1/012041.
- [38] Mochammad Chaeron, Gunawan P. Madyono, και Apriani Soepardi, 'Application of AHP and TOPSIS Method: A Case Study in the Indonesian Leather Industry', *Dep. Ind. Eng. Fac. Ind. Eng. Univ. Pambang. Nas. Veteran Yogyakarta. Indones.*, [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://ieomsociety.org/proceedings/2023manila/523.pdf>
- [39] T. L. Saaty, 'A scaling method for priorities in hierarchical structures', *J. Math. Psychol.*, τ. 15, τχ. 3, σσ. 234–281, Ιουνίου 1977, doi: 10.1016/0022-2496(77)90033-5.
- [40] E. Triantaphyllou, 'MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHODS', στο *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, Springer Science+Business Media Dordrecht 2000, σ. 17.
- [41] R. Yadav, M. Singh, A. Meena, S.-Y. Lee, και S.-J. Park, 'Selection and ranking of dental restorative composite materials using hybrid Entropy-VIKOR method: An application of MCDM technique', *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, τ. 147, σ. 106103, Νοεμβρίου 2023, doi: 10.1016/j.jmbbm.2023.106103.
- [42] 'EXTENSION OF VIKOR METHOD FOR MCDM UNDER BIPOLAR FUZZY SET', *Int. J. Anal. Appl.*.
- [43] J.P. BRANS, Ph. VINCKE and B. MARESCHAL, 'How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method.', *Elsevier Sci. Publ. BV N.-Holl.*, σ. 11, Δεκεμβρίου 1985.
- [44]: J. P. Brans and Ph. Vincke, 'A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making)', *INFORMS*, σ. 1, 2013.
- [45] J. Papathanasiou και N. Ploskas, *Multiple Criteria Decision Aid: Methods, Examples and Python Implementations*, τ. 136. στο Springer Optimization and Its Applications, vol. 136. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-91648-4.
- [46] M. Zagrouba, A. Sellami, M. Bouaïcha, και M. Ksouri, 'Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction', *Sol. Energy*, τ. 84, τχ. 5, σσ. 860–866, Μαΐου 2010, doi: 10.1016/j.solener.2010.02.012.
- [47] D. H. Muhsen, A. B. Ghazali, T. Khatib, και I. A. Abed, 'Extraction of photovoltaic module model's parameters using an improved hybrid differential evolution/electromagnetism-like algorithm', *Sol. Energy*, τ. 119, σσ. 286–297, Σεπτεμβρίου 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.07.008.

- [48] S. Freitas, F. Serra, και M. C. Brito, 'Pv layout optimization: String tiling using a multi-objective genetic algorithm', *Sol. Energy*, τ. 118, σσ. 562–574, Αυγούστου 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.06.018.
- [49] D.L. King, W.E. Boyson, J.A. Kratochvill, 'Photovoltaic Array Performance Model', *Sandia Natl. Lab.*, σ. 43.
- [50] H. M. Ridha, C. Gomes, H. Hizam, M. Ahmadipour, A. A. Heidari, και H. Chen, 'Multi-objective optimization and multi-criteria decision-making methods for optimal design of standalone photovoltaic system: A comprehensive review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, τ. 135, σ. 110202, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110202.
- [51] S. Kamali, 'Feasibility analysis of standalone photovoltaic electrification system in a residential building in Cyprus', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, τ. 65, σσ. 1279–1284, Νοεμβρίου 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.07.018.
- [52] K. Benmouiza, M. Tadj, και A. Cheknane, 'Classification of hourly solar radiation using fuzzy c-means algorithm for optimal stand-alone PV system sizing', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, τ. 82, σσ. 233–241, Νοεμβρίου 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.03.019.
- [53] A. Chel, G. N. Tiwari, και A. Chandra, 'Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system', *Energy Build.*, τ. 41, τχ. 11, σσ. 1172–1180, Νοεμβρίου 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.06.004.
- [54] K. Branker, M. J. M. Pathak, και J. M. Pearce, 'A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, τ. 15, τχ. 9, σσ. 4470–4482, Δεκεμβρίου 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.104.
- [55] B. Lee, M. Trcka, και J. L. M. Hensen, 'Rooftop photovoltaic (PV) systems: a cost–benefit analysis study of industrial halls', *Int. J. Low-Carbon Technol.*, τ. 9, τχ. 4, σσ. 319–326, Δεκεμβρίου 2014, doi: 10.1093/ijlct/ctt008.
- [56] G. Merei, C. Berger, και D. U. Sauer, 'Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm', *Sol. Energy*, τ. 97, σσ. 460–473, Νοεμβρίου 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.08.016.
- [57] P. A. Kumari και P. Geethanjali, 'Adaptive Genetic Algorithm Based Multi-Objective Optimization for Photovoltaic Cell Design Parameter Extraction', *Energy Procedia*, τ. 117, σσ. 432–441, Ιουνίου 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.165.
- [58] T. Khatib, I. A. Ibrahim, και A. Mohamed, 'A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system', *Energy Convers. Manag.*, τ. 120, σσ. 430–448, Ιουλίου 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.05.011.

- [59] D. H. Muhsen, T. Khatib, και H. T. Haider, ‘A feasibility and load sensitivity analysis of photovoltaic water pumping system with battery and diesel generator’, *Energy Convers. Manag.*, τ. 148, σσ. 287–304, Σεπτεμβρίου 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.06.007.
- [60] ‘<http://www.solarDesignTool.com/components/module-panel-solar/JA-Solar/5449/JAM72S10-405-PR/specification-data-sheet.html>’.
- [61] ‘<https://samarasbatteries.gr/en/product/bataria-trojan-t125-6v-240ah/>’.
- [62] ‘<https://cococon.gr/wp-content/uploads/2022/03/Datasheet-SMA-Sunny-Boy-3.0-6.0-en.pdf>’.
- [63] ‘https://cdn.shopify.com/s/files/1/0017/8847/7489/files/Datasheet-SmartSolar-charge-controller-MPPT-150-35_-150-45-EN.pdf?v=1709816749’.