ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος

υπό

Ιωάννη Α. Κατσίγιαννη

Χανιά, Ιούνιος 2008

© Copyright υπό Ιωάννη Κατσίγιαννη Έτος: 2008



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

Βελτιστοποίηση Δομής και Οικονομική Αξιολόγηση Απομονωμένου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας που βασίζεται σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΤΟΥ ΓΙΑΝΝΗ Α. ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ Π.Κ. ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Π.Κ.

Επιβλέπων Καθηγητής Παύλος Σ. Γεωργιλάκης Συμβουλευτική Επιτροπή Παύλος Σ. Γεωργιλάκης Γιάννης Α. Φίλης Βασίλης Σ. Κουϊκόγλου

Η διδακτορική διατριβή εγκρίθηκε από την Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή τη Δευτέρα 30 Ιουνίου 2008.

Επίκουρος Καθηγητής Π.Κ.

Β. Κουϊκόγλου Καθηγητής Π.Κ.

Π. Γεωργιλάκης

Γ. Φίλης

Καθηγητής Π.Κ.

Κ. Καλαϊτζάκης Καθηγητής Π.Κ.

Γ. Σταυρακάκης Καθηγητής Π.Κ.

Θ. Τσούτσος

Σ. Παπαθανασίου Επίκ. Καθηγητής Π.Κ. Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χανιά, 30 Ιουνίου 2008

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή άρχισε να εκπονείται το Δεκέμβριο του 2004 και ολοκληρώθηκε το Μάιο του 2008 στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ηλεκτρονικής του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Παύλου Γεωργιλάκη.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου:

– στον Καθηγητή μου κ. Παύλο Γεωργιλάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την τιμή που μου έκανε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της παρούσας διατριβής, καθώς και για την αμέριστη συμπαράσταση και τη σημαντική βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια της διατριβής.

 στους Καθηγητές κκ. Φίλη και Κουϊκόγλου, για τις υποδείξεις τους και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διατριβής.

στο Πολυτεχνείο Κρήτης, για τη μερική χρηματοδότηση της έρευνας μέσω του προγράμματος ΕΛΚΕ – Βασική Έρευνα 2005.

σε όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ηλεκτρονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την άψογη και εποικοδομητική μεταξύ μας σχέση.

- σε όλους τους φίλους μου για τη συμπαράστασή τους καθόλη τη διάρκεια της διατριβής.

Η διατριβή αυτή είναι αφιερωμένη στην οικογένειά μου.

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ

<u>1. ΠΡΟΣΩΠΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ</u>

Επώνυμο	:	Κατσίγιαννης
Όνομα	:	Ιωάννης
Όνομα πατέρα	:	Αυγουστής
Όνομα μητέρας	:	Μαρία
Ημερομ. γέννησης	:	2/2/1975
Τόπος γέννησης	:	Αθήνα
Εθνικότητα	:	Ελληνική
Οικογ. κατάσταση	:	Άγαμος
e-mail:	:	katsigiannis@dpem.tuc.gr

2. ΣΠΟΥΔΕΣ

1989 - 1992 : Απολυτήριο, 1° Λύκειο Αθηνών.	
---	--

- 1993 2000 : Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης, Βαθμός Διπλώματος: Άριστα 8.61.
- 2000 2003 : Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης (MSc) στον τομέα Συστημάτων Παραγωγής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης.
- 2000 2005 : Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Βαθμός Διπλώματος: Άριστα 8.62.
- 2004 2008 : Διδακτορικό Δίπλωμα (PhD) Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης.

3. ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

01/3/2008 - σήμερα.

Υπεύθυνος με σύμβαση ΠΔ 407/80 για τη διδασκαλία των ασκήσεων του μαθήματος "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας" στο Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης.

01/9/2006 - σήμερα.

Εργαζόμενος με ωρομίσθια σύμβαση στο Εργαστήριο Ανανεώσιμων Ενεργειακών Τεχνολογιών του Τμήματος Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος στο ΤΕΙ Κρήτης (Παράρτημα Χανίων), όπου και διδάσκει τα εργαστήρια των μαθημάτων "Ηπιες Μορφές Ενέργειας Ι", "Σχεδιασμός και Διαχείριση Συστημάτων ΑΠΕ", "Συστήματα Λήψης Μετρήσεων και Ελέγχου" και "Ελεγχος Ποιότητας Ενεργειακών και Περιβαλλοντικών Συστημάτων".

01/9/2003 - σήμερα.

Εργαστηριακός Υπεύθυνος με σύμβαση ΠΔ 407/80 στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ηλεκτρονικής του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, υπεύθυνος για τη διδασκαλία των εργαστηρίων "Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων" και "Ηλεκτρονικής".

• 01/3/2002 – 31/08/2004.

Εργαστηριακός Υπεύθυνος με σύμβαση ΠΔ 407/80 στο Εργαστήριο CAD του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, υπεύθυνος για τη διδασκαλία του εργαστηρίου "Μελέτη και Σχεδίαση με Χρήση Η/Υ (CAD)".

• 01/12/1998 - 31/1/1999.

Συμμετοχή στην κατάρτιση Business Plan για τη συμμετοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης σε πρόγραμμα Distance Learning. Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο Πολυτεχνείο Κρήτης υπό την επίβλεψη των κ.κ. Μουστάκη και Δούνια.

• 01/5/1998 - 31/5/1998.

Εργασία στην εταιρία ΝΙΚΑΣ Α.Ε. με αντικείμενο τη βελτίωση της Διαχείρισης Ανθρώπινων Πόρων.

4. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

• 01/08/2006 - **31/10/2007**.

Συμμετοχή στο πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης με τίτλο: «EEBD: Electronic Energy Buildings Directive» με επιστημονικούς υπεύθυνους την Επίκουρο Καθηγήτρια κ. Διονυσία Κολοκοτσά και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μανόλη Καραπιδάκη.

• 14/04/2005 – 13/04/2006.

Συμμετοχή στο πρόγραμμα του ΕΛΚΕ Πολυτεχνείου Κρήτης με τίτλο: «Βασική Έρευνα 2005: Διερεύνηση δυνατοτήτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για παροχή ενέργειας σε απομονωμένες περιοχές» με επιστημονικό υπεύθυνο τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Παύλο Γεωργιλάκη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή ασχολείται με τη μελέτη των μικρών απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που εμπεριέχουν τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προτείνοντας μεθοδολογίες που σχετίζονται με την οικονομική αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της δομής τους, την προσομοίωση και ανάλυση αξιοπιστίας τους, καθώς και το συνυπολογισμό του περιβαλλοντικού κόστους στην οικονομική τους αποτίμηση.

Η πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής έγκειται στην ανάπτυξη καινοτομικών μεθοδολογιών επίλυσης του προβλήματος της βελτιστοποίησης της δομής των συστημάτων αυτών, στη γραφική και μαθηματική μεθοδολογία προσομοίωσης και ανάλυσης αξιοπιστίας, καθώς και στην προσέγγιση που ακολουθείται για το συνυπολογισμό του οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους.

Για την επίλυση του σύνθετου προβλήματος συνδυαστικής βελτιστοποίησης της εύρεσης της βέλτιστης δομής ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εξετάζεται καταρχήν η επίδοση τριών μεθευρετικών μεθόδων: της αναζήτησης ταμπού, των γενετικών αλγορίθμων και της προσομοιωμένης ανόπτησης. Στη συνέχεια, η εξέταση των ιδιαιτέρων χαρακτηριστικών κάθε μεθόδου οδηγεί στη χρήση δύο υβριδικών μεθοδολογιών που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της καθεμιάς μεθευρετικής μεθόδου: 1) της υβριδικής μεθόδου γενετικών αλγορίθμων και αναζήτησης ταμπού, και 2) της υβριδικής μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης και αναζήτησης ταμπού.

Η προσομοίωση και ανάλυση αξιοπιστίας ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας υλοποιείται με χρήση των δικτύων Petri, που είναι ένα γραφικό και μαθηματικό εργαλείο μοντελοποίησης δυναμικών συστημάτων. Για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της μεθόδου, προτείνονται ορισμένες προσθήκες και τροποποιήσεις στη συνήθη μεθοδολογία των δικτύων Petri, έτσι ώστε να μπορέσουν να μελετηθούν με αποδοτικότερο τρόπο τα βασικότερα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του συστήματος. Ως αποτέλεσμα, η χρήση των δικτύων Petri συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των κλασσικών μεθόδων προσομοίωσης με το πλεονέκτημα της γραφικής αναπαράστασης τόσο της στατικής δομής του συστήματος, όσο και της δυναμικά μεταβαλλόμενης κατάστασής του.

Το οικονομικό και το περιβαλλοντικό κόστος ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνονται ως αντικειμενικές συναρτήσεις σε ένα πρόβλημα πολυαντικειμενικής μοντελοποίησης, που έχει ως στόχο να υπολογίσει το σύνολο Pareto των βέλτιστων μη κυριαρχουσών λύσεων. Η οικονομική αποτίμηση βασίζεται στον υπολογισμό του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ για την περιβαλλοντική αποτίμηση προτείνεται να ληφθούν ως κριτήριο οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου του συστήματος, όπως αυτές υπολογίζονται από τη μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής των συστατικών του συστήματος. Η επίλυση του προβλήματος υλοποιείται με τη συνεργασία ενός γενετικού αλγορίθμου πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης και μιας διαδικασίας τοπικής αναζήτησης.

Λέζεις κλειδιά: μικρά απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συνδυαστική βελτιστοποίηση, μεθευρετικές μέθοδοι, αναζήτηση ταμπού, γενετικοί αλγόριθμοι, προσομοιωμένη ανόπτηση, ανάλυση αξιοπιστίας, δίκτυα Petri, πολυαντικειμενική βελτιστοποίηση, ανάλυση κύκλου ζωής προϊόντος, τοπική αναζήτηση.

ABSTRACT

This thesis is concerned with the study of small isolated power systems that contain renewable energy sources technologies, as it suggests methodologies related to their economic evaluation and their optimal sizing, their simulation and reliability analysis, as well as the estimation of their environmental cost in their economic evaluation.

The origin of the current thesis is the development of novel methodologies that 1) optimize the structure of small isolated power systems, 2) combine a graphical and mathematical methodology of simulation and reliability evaluation in such systems, and 3) calculate their economic and environmental cost.

For the solution of the complex combinatorial optimization problem of optimal sizing in a small isolated power system, three metaheuristic methods are initially examined: tabu search, genetic algorithms, and simulated annealing. The examination of the characteristics in each method leads to the proposition of two hybrid methodologies that combine the advantages of each examined metaheuristic method: 1) the hybrid method of genetic algorithms and tabu search, and 2) the hybrid method of simulated annealing and tabu search.

The simulation and reliability evaluation of a small isolated power system is implemented via Petri nets, which are a graphical and mathematical tool that models dynamic systems. The proposed methodology is improved by a number of modifications and extensions, in order to study the most important quantitative and qualitative characteristics of system's operation. As a result, the proposed Petri net methodology combines the characteristics of the classical simulation methods with the advantage of the graphical representation of system's static structure, as well as its dynamically changing state.

The economic and environmental cost of a small isolated power system are used as objective functions in a multiobjective optimization problem, which aims to calculate the Pareto optimal set of non-dominated solutions. The economic evaluation is based on the calculation of system's cost of energy. For the environmental evaluation, the proposed criterion is the total greenhouse gas emissions of system's components, as they are calculated through the life cycle analysis methodology. The solution of the above problem is implemented by a hybrid method that combines a multiobjective genetic algorithm and a local search procedure.

Keywords: small isolated power systems, renewable energy sources, combinatorial optimization, metaheuristic methods, tabu search, genetic algorithms, simulated annealing, reliability evaluation, Petri nets, multiobjective optimization, life cycle analysis, local search.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Αντικε	ίμενο της εργασίας	1
1.2	Συστή	ματα ηλεκτρικής ενέργειας	2
1.3	Ανασκ	όπηση βιβλιογραφίας	4
	1.3.1	Βελτιστοποίηση δομής ΜΑΣΗΕ	4
	1.3.2	Μοντελοποίηση και ανάλυση αξιοπιστίας ΣΗΕ με δίκτυα Petri	5
	1.3.3	Περιβαλλοντική αποτίμηση ΜΑΣΗΕ	5
1.4	Δομή της διατριβής		6
	Βιβλιογραφία		7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1	Εισαγο	ογή	11
2.2	Μονάδ	ες μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	12
	2.2.1	Ανεμογεννήτριες	12
	2.2.2	Φωτοβολταϊκά συστήματα	18
	2.2.3	Μικρά υδροηλεκτρικά έργα	28
2.3	Γεννήτ	ριες	29
	2.3.1	Ντηζελογεννήτριες	30
	2.3.2	Κυψέλες καυσίμου	30
2.4	Συστήι	ματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	33
	2.4.1	Εισαγωγή	33
	2.4.2	Συσσωρευτές	34
	2.4.3	Δεξαμενές υδρογόνου	36
	2.4.4	Λοιπές αποθηκευτικές διατάξεις	37
2.5	Περιφε	ερειακά εξαρτήματα	37
	2.5.1	Μετατροπείς	37
2.6	Οικονα	ρμική μοντελοποίηση ΜΑΣΗΕ	38
2.7	Καταν	ομή φορτίου του ΜΑΣΗΕ	39
	2.7.1	Λειτουργική εφεδρεία	40
	2.7.2	Βέλτιστη επιλογή λειτουργίας γεννητριών και συσσωρευτών	40

	2.7.3	Στρατηγικές συνεργασίας μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών	41
2.8	Διατύπα	οση του προβλήματος	43
	Βιβλιογ	οαφία	45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΕΘΕΥΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

3.1	Εισαγα	ογή	47
3.2	Παράδ	ειγμα εφαρμογής	48
3.3	Αναζή	τηση ταμπού	49
	3.3.1	Εισαγωγή	49
	3.3.2	Προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης με ΑΤ και ανάλυση αποτελεσμάτων	51
3.4	Γενετι	κοί αλγόριθμοι	53
	3.4.1	Εισαγωγή	53
	3.4.2	Προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης με ΓΑ	57
	3.4.3	Ανάλυση αποτελεσμάτων	62
3.5	Προσο	μοιωμένη ανόπτηση	66
	3.5.1	Εισαγωγή	66
	3.5.2	Πρόγραμμα ψύξης αλγορίθμου ΠΑ	68
	3.5.3	Προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης με ΠΑ και ανάλυση αποτελεσμάτων	68
3.6	Συνεργ	ασία μεθευρετικών μεθόδων και συμπεράσματα	71
	Βιβλιο	γραφία	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1	Εισαγωγ	νή	75
4.2	Μεταβο	λή του αιολικού δυναμικού	76
	4.2.1	Αύξηση του αιολικού δυναμικού κατά 10%	76
	4.2.2	Μείωση του αιολικού δυναμικού κατά 10%	77
4.3	Μεταβο	λή του ηλιακού δυναμικού	79
	4.3.1	Αύξηση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%	79
	4.3.2	Μείωση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%	80
4.4	Αλλαγή συστοιχ	του συστήματος παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου στη ΦΒ ία	81
	4.4.1	Σύστημα παρακολούθησης οριζόντιου άξονα	81
	4.4.2	Σύστημα παρακολούθησης κατακόρυφου άξονα	82
	4.4.3	Σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων	84

4.5	Αύξηση του φορτίου κατά 20%	85		
4.6	Επιδότηση των τεχνολογιών ΑΠΕ κατά 50%			
4.7	Αύξηση της τιμής του καυσίμου ντήζελ κατά 50%	87		
4.8	Χρήση δεξαμενής υδρογόνου ως συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	88		
4.9	Συμπεράσματα	90		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΙΚΤΥΑ ΡΕΤRΙ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1	Εισαγα	ογή	91
5.2	Ανάλυ	ση αξιοπιστίας ΣΗΕ	92
	5.2.1	Τεχνικές ανάλυσης αξιοπιστίας	92
	5.2.2	Δείκτες αξιοπιστίας ΣΗΕ	93
5.3	Δίκτυα	Petri	94
	5.3.1	Εισαγωγή	94
	5.3.2	Συνήθη δίκτυα Petri	95
	5.3.3	Βασικές καταστάσεις που μοντελοποιούνται με δίκτυα Petri	96
	5.3.4	Συντμήσεις και επεκτάσεις συνήθων δικτύων Petri	97
		5.3.4.1 Γενικευμένα δίκτυα Petri	98
		5.3.4.2 Δίκτυα Petri πεπερασμένης χωρητικότητας	98
		5.3.4.3 Έγχρωμα δίκτυα Petri	99
		5.3.4.4 Δίκτυα Petri προτεραιότητας	100
		5.3.4.5 Εκτεταμένα δίκτυα Petri	101
		5.3.4.6 Χρονικά, αιτιοκρατικά και στοχαστικά δίκτυα Petri	101
		5.3.4.7 Συνεχή και υβριδικά δίκτυα Petri	102
		5.3.4.8 Ρευστά στοχαστικά δίκτυα Petri	103
5.4	Προσο στοχασ	μοίωση και ανάλυση αξιοπιστίας ΜΑΣΗΕ με χρήση έγχρωμων ρευστών τικών δικτύων Petri	104
	5.4.1	Εισαγωγή	104
	5.4.2	Χρήση ρευστών στοχαστικών δικτύων Petri	105
	5.4.3	Τόξα βάσης δεδομένων	105
	5.4.4	Μοντελοποίηση μικρών απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με έγχρωμα ρευστά στοχαστικά δίκτυα Petri	108
		5.4.4.1 Υποδίκτυο Petri εισόδου	109
		5.4.4.2 Υποδίκτυο Petri φορτίου	111
		5.4.4.3 Υποδίκτυο Petri ΑΓ	111
		5.4.4.4 Υποδίκτυο Petri ντηζελογεννήτριας	113
		5.4.4.5 Υποδίκτυο Petri εξόδου	116

	5.4.5	Ανάλυση αποτελεσμάτων	117
5.5	Συμπερ	ράσματα	120
	Βιβλιο	γραφία	121

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΝΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΑΠΟΜΩΝΟΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1	Εισαγα	νγή	123
6.2	Πολυα	ντικειμενική βελτιστοποίηση	124
6.3	Οικονα	μική και περιβαλλοντική αποτίμηση ΜΑΣΗΕ	125
	6.3.1	Εισαγωγή	125
	6.3.2	Ανάλυση κύκλου ζωής συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	126
	6.3.3	Εκπομπές ισοδύναμου CO2 των συστατικών ενός ΜΑΣΗΕ	127
6.4	Περιγρ	αφή αλγορίθμου NSGA-II	128
	6.4.1	Ταξινόμηση των μη κυριαρχουσών λύσεων	130
	6.4.2	Διατήρηση της διακριτότητας των λύσεων	130
	6.4.3	Κύριος αλγόριθμος	131
6.5	Διατύπ	ωση προβλήματος	133
6.6	Ανάλυ	ση αποτελεσμάτων	134
	6.6.1	Μελέτη υβριδικού συστήματος που εμπεριέχει συσσωρευτές	134
	6.6.2	Μελέτη υβριδικού συστήματος που εμπεριέχει δεξαμενή υδρογόνου	139
6.7	Συμπερ	ράσματα	141
	Βιβλιο	γραφία	143

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	145
7.2	Συμβολή της διατριβής	146
7.3	Επεκτάσεις της διατριβής	147

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

Κυψέλη καυσίμου απευθείας μετατροπής της μεθανόλης
Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος
Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος
Κυψέλη καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης
Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου
Αναμενόμενη απώλεια φορτίου
Ανεμογεννήτριες
Ανάλυση κύκλου ζωής
Αναμενόμενη μη τροφοδοτούμενη ενέργεια
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
Αναζήτηση ταμπού
Γενετικοί αλγόριθμοι
Διακριτός
Δείκτης αναξιοπιστίας ενέργειας
Δείκτης απορριπτόμενου φορτίου
Διάρκεια διακοπών
Δείκτης μη παρεχόμενης ενέργειας
Δίκτυα Petri
Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας
Λεπτά συστήματος
Μικρά απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας
Μέσος χρόνος βλάβης
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας Πρότυπες συνθήκες δοκιμής
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας Πρότυπες συνθήκες δοκιμής Παρακολούθηση φορτίου
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας Πρότυπες συνθήκες δοκιμής Παρακολούθηση φορτίου Συνεχής
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας Πρότυπες συνθήκες δοκιμής Παρακολούθηση φορτίου Συνεχής Συχνότητα διακοπών
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας Πρότυπες συνθήκες δοκιμής Παρακολούθηση φορτίου Συνεχής Συχνότητα διακοπών Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας Πρότυπες συνθήκες δοκιμής Παρακολούθηση φορτίου Συνεχής Συχνότητα διακοπών Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας Σημείο λειτουργίας
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας Πρότυπες συνθήκες δοκιμής Παρακολούθηση φορτίου Συνεχής Συχνότητα διακοπών Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας Σημείο λειτουργίας Συντελεστής φορτίου
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Ενίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας Συνεχής Συχνότητα διακοπών Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας Σημείο λειτουργίας Συντελεστής φορτίου Υποδίκτυο Petri
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας Πρότυπες συνθήκες δοκιμής Παρακολούθηση φορτίου Συνεχής Συχνότητα διακοπών Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας Σημείο λειτουργίας Συντελεστής φορτίου Υποδίκτυο Petri Υδροηλεκτρικά έργα
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας Πρότυπες συνθήκες δοκιμής Παρακολούθηση φορτίου Συνεχής Συχνότητα διακοπών Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας Σημείο λειτουργίας Συντελεστής φορτίου Υποδίκτυο Petri Υδροηλεκτρικά έργα
Μέσος χρόνος βλάβης Μέσος χρόνος επισκευής Ντηζελογεννήτρια Προσομοιωμένη ανόπτηση Πιθανότητα απώλειας φορτίου Παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια Παραγόμενη ενέργεια από τη ντηζελογεννήτρια Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας Πρότυπες συνθήκες δοκιμής Παρακολούθηση φορτίου Συνεχής Συχνότητα διακοπών Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας Σημείο λειτουργίας Συντελεστής φορτίου Υποδίκτυο Petri Υδροηλεκτρικά έργα Φωτοβολταϊκά Χρόνος βλάβης

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Λατινικά σύμβολα χρώμα έγχρωμου δικτύου Petri που αντιστοιχεί σε τύπο δεδομένων c $\langle c \rangle$ Α επιφάνεια A_i δείκτης ανισοτροπίας σύνολο τόξων δικτύου Petri A_{PN} υποσύνολο τόξων βάσης δεδομένων δικτύου Petri A_{PNdb} υποσύνολο τόξων παρεμπόδισης δικτύου Petri A_{PNi} υποσύνολο συνήθων τόξων δικτύου Petri A_{PNn} υποσύνολο τόξων ελέγχου δικτύου Petri A_{PNt} AM μάζα αέρα В παράμετρος υπολογισμού ηλιακής γεωμετρίας B_{PN} συνάρτηση που περιγράφει τη γωρητικότητα κάθε θέσης ενός δικτύου Petri C_w παράμετρος κλίμακας κατανομής Weibull C_{ancap} κόστος κεφαλαίου εξαρτήματος του ΜΑΣΗΕ σε ετήσια βάση συνολικό κόστος εξαρτήματος του ΜΑΣΗΕ σε ετήσια βάση Cancomp ετήσιο κόστος καυσίμου εξαρτήματος του ΜΑΣΗΕ C_{anfuel} $C_{ano\&m}$ ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης εξαρτήματος του ΜΑΣΗΕ C_{anrep} κόστος αντικατάστασης εξαρτήματος του ΜΑΣΗΕ σε ετήσια βάση C_{antot} συνολικό κόστος του ΜΑΣΗΕ σε ετήσια βάση χωρητικότητα συσσωρευτή C_{bat} C_{batfix} πάγιο κόστος συσσωρευτή οριακό κόστος συσσωρευτή κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος Δt Cbatmarg C_{batr} αξιοποιήσιμη γωρητικότητα συσσωρευτή C_{batrep} κόστος αντικατάστασης συσσωρευτή $C_{batstore}$ κόστος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας συσσωρευτή κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος Δt $C_{batwear}$ κόστος φθοράς συσσωρευτή κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος Δt C_{cap} κόστος κεφαλαίου εξαρτήματος του ΜΑΣΗΕ C_{genfix} πάγιο κόστος λειτουργίας γεννήτριας gen τιμή καυσίμου γεννήτριας gen Cgenfuel Cgenmarg οριακό κόστος λειτουργίας γεννήτριας gen σε χρονικό διάστημα Δt Cgeno&m κόστος λειτουργίας και συντήρησης γεννήτριας gen Cgenrep κόστος αντικατάστασης γεννήτριας gen χωρητικότητα δεξαμενής υδρογόνου C_{H2tank} συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας C_P C_{Pmax} όριο Betz (0.593) C_{rep} κόστος αντικατάστασης εξαρτήματος του ΜΑΣΗΕ C_T θερμοκρασιακός συντελεστής φωτοβολταϊκών στοιχείων comp εξάρτημα ΜΑΣΗΕ $CRF(i_r, R_{SIPS})$ παράγοντας ανάκτησης κεφαλαίου του ΜΑΣΗΕ απόσταση λύσης x_(i) του γενετικού αλγορίθμου πολυαντικειμενικής $d_{kx(i)}$ βελτιστοποίησης $d_{x(i)}$ συνολική πληθυσμιακή απόσταση λύσης x(i) του γενετικού αλγορίθμου

πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης dm_{H2el}/dE παραγόμενη μάζα H₂ ανά μονάδα ενέργειας που καταναλώνεται στη μονάδα ηλεκτρόλυσης

D_{PN}	διάνυσμα που αναπαριστά τις χρονικές καθυστερήσεις των μεταβάσεων σε ένα χοονικό δίκτυο Petri
F	ενέργεια
E F	ετάσια ζήτηση ηλεκτοικής ενέργειας
Eanload F, , ,	ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας π_{00} ικανοποιείται από το MAΣHF
E anioaaservea	ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τεχνολογίες ΑΠΕ
E S	συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια του ΜΑΣΗΕ
E_{antot}	υλεκτοική ενέρνεια που μπορεί να αποθυκευτεί στο συσσωρευτή
E_{bat}	αυνολική ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί στο συσσωρευτή
E_{battr}	αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί στο συσσωρευτή
$E_{bat\Delta t}$	ενέργεια που αποθηκεύεται στο συσσωρευτή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος Δt
E_s	διαφορά μεταξύ μιας ημέρας 24 ωρών και μιας ηλιακής ημέρας
E_{FC}	παραγωγή ενέργειας κυψέλης καυσίμου
f	παράγοντας υπολογισμού διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας
f_{avg}	μέση τιμή συνάρτησης καταλληλότητας του πληθυσμού του γενετικού αλγορίθμου
f_k	τιμή αντικειμενικής συνάρτησης γενετικού αλγορίθμου
f_{kmax}	μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f_k στον πληθυσμό των λύσεων του γενετικού αλγορίθμου
f_{kmin}	ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης <i>f</i> _k στον πληθυσμό των λύσεων του γενετικού αλγορίθμου
f_{PV}	συνολικός συντελεστής απωλειών φωτοβολταϊκού συστήματος
f_{RES}	κλάσμα παραγόμενης ενέργειας από τεχνολογίες ΑΠΕ
f_{RESmin}	ελάχιστο επιτρεπόμενο κλάσμα της παραγόμενης ενέργειας από τεχνολογίες ΑΠΕ
$f_{x(i)}$	συνάρτηση καταλληλότητας της λύσης $x_{(i)}$ του γενετικού αλγορίθμου
$f_{\rm AI}$	κλάσμα απώλειας ισχύος
f_{AImax}	μέγιστο επιτρεπόμενο κλάσμα απώλειας ισχύος
$f_{\mathrm{A}\Phi}$	κλάσμα απώλειας φορτίου
$f_{A\Phi max}$	μέγιστο επιτρεπόμενο κλάσμα απώλειας φορτίου
f_{rep}	παράγοντας που προκύπτει από το γεγονός ότι η διάρκεια ζωής ενός
	εξαρτήματος μπορεί να είναι διαφορετική από τη διάρκεια ζωής του ΜΑΣΗΕ
F _{CH3OH}	κατανάλωση μεθανόλης στην κυψέλη καυσίμου
F_{dsl}	κατανάλωση καυσίμου ντηζελογεννήτριας με καύσιμο ντήζελ
F _{genfix}	πάγια κατανάλωση καυσίμου γεννήτριας gen
F _{genmarg}	οριακή κατανάλωση καυσίμου γεννήτριας gen
F_{H2}	κατανάλωση H_2 στην κυψέλη καυσίμου
$FC_{gen\Delta t}$	κατανάλωση καυσίμου της γεννήτριας gen κατά το χρονικό βήμα Δt της προσομοίωσης
$FC_{angenmax}$	μέγιστη επιτρεπόμενη ετήσια κατανάλωση καυσίμου της γεννήτριας gen
F_{bio}	κατανάλωση καυσίμου ντηζελογεννήτριας με καύσιμο βιοντήζελ
8	επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/sec ²)
gen	γεννητρια συστηματος
gn G	αριθμός γενιάς γενετικού αλγορίθμου
G	πυκνότητα ισχύος της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας
G _o	εζωγηινη οριζοντια ακτινοβολία
Gon	εζωγηινη κάθετη ακτινοβολία

G_{PN}	σύνολο συναρτήσεων προφύλαξης των μεταβάσεων ενός έγχρωμου δικτύου
G	Petri
G_{sc}	ηλιακή σταθερά (1.367 kW/m ²)
G_{STC}	πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κάτω από Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (1 kW/m ²)
G_T	πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο του φωτοβολταϊκού συστήματος
GHG ancomp	ετήσιες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου για κάθε συστατικό του ΜΑΣΗΕ
GHG _{tot}	συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε όλη τη διάρκεια ζωής του ΜΑΣΗΕ
h_{PN}	συνάστηση που δηλώνει το είδος των κόμβων (συνεγείς ή διακριτοί) σε ένα
1 14	υβοιδικό δίκτυο Petri
H_{a}	νεωδαιτικό ύψος υδατόπτωσης
Hnet	καθαρό ύψος υδατόπτωσης
HHV_{H2}	ανώτερη θερμογόνος δύναμη H2 (141.8 MJ/kg)
i _r	ετήσιο επιτόκιο προεξόφλησης
I	(1) ένταση ρεύματος
Ι	(2) πυκνότητα ενέργειας της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας
I_b	άμεση ηλιακή ακτινοβολία
I_d	διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία
I_m	ένταση ρεύματος σημείου μέγιστης ισχύος φωτοβολταϊκού συστήματος
Io	πυκνότητα ενέργειας της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας
Isc	ένταση βραχυκύκλωσης φωτοβολταϊκού συστήματος
I_T	πυκνότητα ενέργειας της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο
	επίπεδο του φωτοβολταϊκού συστήματος
IC	αρχικό κόστος συστήματος
<i>IC_{max}</i>	μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή αρχικού κόστους
int(x)	συνάρτηση υπολογισμού ακέραιου μέρους του αριθμού x
k	αριθμός επανάληψης αλγορίθμου προσομοιωμένης ανόπτησης
k_T	δείκτης αιθριότητας
k_w	παράμετρος μορφής κατανομής Weibull
L_{loc}	γεωγραφικό μήκος τοποθεσίας
L_{st}	γεωγραφικό μήκος μεσημβρινού στον οποίο βρίσκεται η τοποθεσία
$Level_i$	μέγεθος i-οστού συνόλου μη κυριαρχουσών λύσεων γενετικού αλγορίθμου
	πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης
LHV_{H2}	κατώτερη θερμογόνος δύναμη H2 (120 MJ/kg)
m_{H2}	απαιτούμενη μάζα $ m H_2$ σε μια κυψέλη καυσίμου
M_0	αρχική σήμανση δικτύου Petri
max(KHE) _{feas}	μέγιστη τιμή κόστους ηλεκτρικής ενέργειας για τις εφικτές λύσεις ενός
	δεδομένου πληθυσμού του γενετικού αλγορίθμου
n _{bat}	απόδοση συσσωρευτή
n _{batc}	απόδοση φόρτισης συσσωρευτή
n _{batd}	απόδοση εκφόρτισης συσσωρευτή
n _{conv}	απόδοση μετατροπέα
n_d	ημέρα του έτους
n_{el}	ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης μικρού υδροηλεκτρικού έργου
n _{electrol}	απόδοση μονάδας ηλεκτρόλυσης
n_{FC}	βαθμος αποδοσης κυψελης καυσίμου
n_h	υδραυλικός βαθμός απόδοσης μικρού υδροηλεκτρικού έργου
n _{hydro}	συνολικός βαθμός απόδοσης μικρού υδροηλεκτρικού έργου

n _{inv}	απόδοση αντιστροφέα
n_m	μηχανικός βαθμός απόδοσης μικρού υδροηλεκτρικού έργου
n _{rect}	απόδοση ανορθωτή
n_V	ογκομετρικός βαθμός απόδοσης μικρού υδροηλεκτρικού έργου
$n_{x(i)}$	αριθμός των λύσεων οι οποίες υπερέχουν της λύσης x _(i) του γενετικού αλγορίθμου
N _{cycle}	αριθμός κύκλων λειτουργίας συσσωρευτή
Ngeneparam	αριθμός δυαδικών ψηφίων σε κάθε γονίδιο του χρωμοσώματος του γενετικού αλγορίθμου
N _{Markov}	μήκος των αλυσίδων Markov αλγορίθμου προσομοιωμένης ανόπτησης
N _{maxparam}	συνολικός αριθμός επιλογών που υπάρχει για κάθε μία από τις παραμέτρους του ΜΑΣΗΕ
N_{off}	σύνολο απογόνων γενετικού αλγορίθμου
N _{par}	σύνολο γονέων γενετικού αλγορίθμου
N_{pop}	πληθυσμός γενετικού αλγορίθμου
N _{sims}	αριθμός των προσομοιώσεων λειτουργίας του ΜΑΣΗΕ που εκτελούνται σε
	κάθε γενεά του γενετικού αλγορίθμου πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης
NOCT	ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκού στοιχείου
$OR_{\Delta t}$	απαιτούμενη ποσότητα λειτουργικής εφεδρείας κατά το χρονικό βήμα Δt
p(E,T)	πιθανότητα του υλικού να έχει μια δεδομένη ενέργεια Ε σε μια δεδομένη
	θερμοκρασία Τ, εφόσον έχει επιτευχθεί θερμοδυναμική ισορροπία
p_i	θέση δικτύου Petri
p_m	πιθανότητα μετάλλαξης
Р	ισχύς
P_{air}	ισχύς αέριας δέσμης
P_{convin}	ισχύς εισόδου μετατροπέα
P _{convout}	ισχύς εξόδου μετατροπέα
P_{dsl}	ισχύς ντηζελογεννήτριας
P _{dslmax}	μέγιστη ισχύς ντηζελογεννήτριας
$P_{electrol}$	ισχύς μονάδας ηλεκτρόλυσης
$P_{electrolmax}$	μέγιστη ισχύς μονάδας ηλεκτρόλυσης
P_{FC}	ισχύς κυψέλης καυσίμου
P _{FCmax}	μέγιστη ισχύς κυψέλης καυσίμου
P_{hydro}	ισχύς εξόδου ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου
P_{load}	τρέχουσα τιμή ηλεκτρικού φορτίου
P_m	μέγιστη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος
P_{PN}	σύνολο θέσεων δικτύου Petri
P_{PNc}	υποσύνολο συνεχών θέσεων δικτύου Petri
P_{PNd}	υποσύνολο διακριτών θέσεων δικτύου Petri
P_{PV}	ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού συστήματος
P_R	ονομαστική ισχύς ανεμογεννήτριας
P_{STC}	ονομαστική ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος κάτω από Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής
P_{WT}	ισχύς ανεμογεννήτριας
P_{WTth}	θεωρητική ισχύς ανεμογεννήτριας
pen _{fRES}	κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης περιορισμού ελάχιστης ετήσιας ενέργειας του ΜΑΣΗΕ που παράγεται από τεχνολογίες ΑΠΕ
pen _{FCgen}	κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης περιορισμού μέγιστης ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου από μια γεννήτρια του ΜΑΣΗΕ

pen _{IC}	κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης περιορισμού αρχικού κόστους του ΜΑΣΗΕ
<i>pen</i> _{sizecomp}	κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης περιορισμού μεγέθους των συστατικών του ΜΑΣΗΕ
<i>pen</i> _{tot}	κανονικοποιημένη τιμή συνολικής συνάρτησης τιμωρίας
pen _{AI}	κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης περιορισμού μέγιστης ετήσιας απώλειας ισχύος του ΜΑΣΗΕ
$pen_{A\Phi}$	κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης περιορισμού μέγιστης ετήσιας απώλειας φορτίου του ΜΑΣΗΕ
Pr	ατμοσφαιρική πίεση
Pr_0	ατμοσφαιρική πίεση πρότυπων συνθηκών μέτρησης (101.325 kPa)
Q_{hydro}	παροχή νερού που διέρχεται από τον υδροστρόβιλο
Q_{hydro}	ονομαστική παροχή υδροστροβίλου
Q_r	απομένουσα παροχή του ποταμού που αφήνεται ανεκμετάλλευτη για περιβαλλοντικούς λόγους
Q_s	παροχή του ποταμού
<i>r</i> _{load}	απαιτούμενο ποσοστό λειτουργικής εφεδρείας φορτίου
r_{PV}	απαιτούμενο ποσοστό λειτουργικής εφεδρείας φωτοβολταϊκού συστήματος
r_{WT}	απαιτούμενο ποσοστό λειτουργικής εφεδρείας ανεμογεννήτριας
rnd(0, 1)	ομοιόμορφα κατανεμημένος τυχαίος αριθμός στο διάστημα (0, 1)
R_b	δείκτης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας
R _{comp}	διάρκεια ζωής του εξαρτήματος comp του συστήματος
$R_{gen(h)}$	διαρκεια ζωης γεννητριας gen (σε h)
R _{rem}	εναπομενουσα ζωη εξαρτηματος στο τελος της διαρκειας ζωης του ΜΑΣΗΕ
R _{rep}	οιαρκεία κοστους αντικαταστασης εςαρτηματος του ΜΑΣΗΕ
K _{SIPS}	οιαρκεία ζωης του ΜΑΣΗΕ
3	είναι η εναπομείνασα άζια του εξαρτηματος στο τέλος της διαρκείας ζώης του ΜΑΣΗΕ
$S_{x(i)}$	σύνολο που περιλαμβάνει τις λύσεις στις οποίες η λύση x _(i) του γενετικού
SEE(; D)	αλγορισμού υπερεχεί
$SFF(i_r, R_{comp})$ $SFF(i_r, R_{comp})$	παράγοντας απόσβεσης του ΜΑΣΗΕ
$sign(\omega)$	πυράγοντας αποορεόης του ΜΑΖΠΕ
size	uένεθος του ε ^ξ αοτήματος <i>comp</i> του συστήματος
size	μέγεσος του εξαρτηματός <i>comp</i> του σσοτηματός
SOC	ατιμείο κατάστασης φόρτισης κατά τη στρατηγική φόρτισης κύκλου
	λειτουονίας συσσωρευτή
t _c	ωρολογιακή ώρα
ti	μετάβαση δικτύου Petri
t_s	ηλιακή ώρα
T	θερμοκρασία (σε °C)
$T_{(K)}$	θερμοκρασία (σε °K)
T_0	θερμοκρασία πρότυπων συνθηκών μέτρησης (15°C = 288.15°K)
T_a	θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα
T_c	θερμοκρασία φωτοβολταϊκών στοιχείων
T _{in}	αρχική θερμοκρασία αλγορίθμου προσομοιωμένης ανόπτησης
T_k	θερμοκρασίες στην k επανάληψη του αλγορίθμου της προσομοιωμένης ανόπτησης
T_{PN}	μεταβάσεων δικτύου Petri
T_{PNc}	υποσύνολο συνεχών μεταβάσεων δικτύου Petri

T_{PNd}	υποσύνολο διακριτών μεταβάσεων δικτύου Petri
T_{PNi}	υποσύνολο άμεσων μεταβάσεων δικτύου Petri
T_{PNt}	υποσύνολο χρονικών μεταβάσεων δικτύου Petri
T_{STC}	θερμοκρασία κάτω από Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (25°C)
V	τάση ηλεκτρικού ρεύματος
V _{air}	ταχύτητα του ανέμου
V_{bat}	τάση συσσωρευτή
V_{in}	ταχύτητα έναρξης λειτουργίας ανεμογεννήτριας
V_m	τάση σημείου μέγιστης ισχύος φωτοβολταϊκού συστήματος
V_{oc}	τάση ανοιχτοκύκλωσης φωτοβολταϊκού συστήματος
Vout	ταχύτητα διακοπής λειτουργίας ανεμογεννήτριας
V_{PN}	διάνυσμα που ορίζει τις μέγιστες ταχύτητες ενεργοποίησης των μεταβάσεων
	σε ένα συνεχές δίκτυο Petri
V_R	ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας ανεμογεννήτριας
\overline{V}_{annual}	μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου
W	βάρος τόξου σε ένα δίκτυο Petri
W_{PN}	συνάρτηση βαρών των τόξων ενός δικτύου Petri
$x_{(i)}$	λύση γενετικού αλγορίθμου
$x_{(j)}$	λύση γενετικού αλγορίθμου
z	υψόμετρο
Zanem	ύψος ανεμομέτρου
Zhub	ύψος πλήμνης ανεμογεννήτριας

Ελληνικά σύμβολα

$a(T_k)$	συνάρτηση της θερμοκρασίας T_k στον αλγόριθμο της προσομοιωμένης
	ανόπτησης
$\operatorname{AI}_{\Delta t}$	απώλεια ισχύος κατά το χρονικό βήμα Δt της προσομοίωσης
$A\Phi_{\Delta t}$	απώλεια φορτίου κατά το χρονικό βήμα Δt της προσομοίωσης
β	κλίση φωτοβολταϊκού συστήματος σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο
β_{conv}	μόνιμες απώλειες μετατροπέα
β_{dis}	βάθος εκφόρτισης συσσωρευτή
β_{dismax}	μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης συσσωρευτή
γ	γωνία αζιμουθίου φωτοβολταϊκού συστήματος
γ_s	γωνία αζιμουθίου του ήλιου
δ	ηλιακή απόκλιση
δ_d	παράμετρος απόστασης αλγορίθμου προσομοιωμένης ανόπτησης
δH_f	απώλειες τριβής του αγωγού προσαγωγής ενός μικρού υδροηλεκτρικού
	έργου
ΔE	αύξηση ενέργειας συστήματος στον αλγόριθμο της προσομοιωμένης
	ανόπτησης
Δt	διάρκεια χρονικού βήματος προσομοίωσης
θ	γωνία πρόσπτωσης φωτοβολταϊκού συστήματος
θ_z	γωνία ζενίθ του ήλιου
KHE	κόστος ηλεκτρικής ενέργειας
KHE _{marg}	οριακή τιμή κόστους ηλεκτρικής ενέργειας
ρ_{air}	πυκνότητα του αέρα
$ ho_{air0}$	πυκνότητα του αέρα στις πρότυπες συνθήκες μέτρησης (1.225 kg/m³)
<i>Рснзон</i>	πυκνότητα μεθανόλης (0.7918 kg/L στους 25°C)
$ ho_g$	διάχυτη ανακλαστικότητα του εδάφους (albedo)
ρ_w	πυκνότητα του νερού (1 kg/L)
σ_{Tk}	τυπική απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας T_k στον αλγόριθμο της
	προσομοιωμένης ανόπτησης
Σ_{PN}	σύνολο χρωμάτων των θέσεων ενός έγχρωμου δικτύου Petri
$ au_{PN}$	μεταβλητή που αποδίδει την ταχύτητα ενεργοποίησης σε κάθε μετάβαση
	(διακριτή ή συνεχή) ενός υβριδικού δικτύου Petri
φ	γεωγραφικό πλάτος τοποθεσίας
ω	γωνία ώρας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται τη μελέτη των μικρών απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που εμπεριέχουν τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προτείνοντας μεθοδολογίες που σχετίζονται με την οικονομική αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της δομής τους, την προσομοίωση και ανάλυση αξιοπιστίας τους, καθώς και το συνυπολογισμό του περιβαλλοντικού κόστους στην οικονομική τους αποτίμηση.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ολοένα και μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον για τα μικρά απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα συστήματα αυτά παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε γεωγραφικά απομονωμένες και/ή μικρού πληθυσμού περιοχές (π.χ., μικρά νησιά ή ορεινές αγροτικές κοινότητες) όπου η ηλεκτροδότηση, παράγοντας που σχετίζεται άμεσα με την ευμάρεια και τη βελτίωση των συνθηκών ζωής των ανθρώπων που ζουν σε αυτές τις περιοχές, δεν είναι δυνατή μέσω μιας οικονομικά εφικτής σύνδεσης στο υπάρχον διασυνδεδεμένο εθνικό ή τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών είναι τα ακόλουθα:

- Είναι μονίμως και πλήρως απομονωμένα από το εθνικό ή τοπικό διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.
- Περιλαμβάνουν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπουν ορισμένες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν την ηλιακή ενέργεια, την αιολική ενέργεια, την υδροηλεκτρική ενέργεια, τη βιομάζα, και τη γεωθερμία, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρωτεύουσα πηγή ενέργειας σε ένα απομονωμένο σύστημα, καθώς οι ανανεώσιμες πηγές είναι συνήθως παρούσες (και πολλές φορές σε αφθονία) σε γεωγραφικά απομονωμένες και αραιοκατοικημένες περιοχές. Επιπλέον, ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημά τους σχετίζεται με τις επιδράσεις που έχουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου οι συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Σε πολλές χώρες η υιοθέτηση νέων ενεργειακών πολιτικών σχετίζεται με την επιβολή ποινών σε συστήματα παραγωγής ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα τα οποία συνεισφέρουν στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (κυρίως CO₂), προωθώντας με αυτό τον τρόπο τις «καθαρές» τεχνολογίες που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ., ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μικρά υδροηλεκτρικά έργα). Από την άλλη πλευρά, το γεγονός ότι οι τεχνολογίες των ανανεώσιμων

πηγών ενέργειας είναι εξαρτώμενες από μια πηγή η οποία δεν είναι ελεγχόμενη έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μπορεί να γίνει, πέραν της εγκατάστασης συμβατικών ενεργειακών τεχνολογιών, με τη χρήση τεχνολογιών αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, που λειτουργούν ως ένα μέσο εξισορρόπησης της ενέργειας του συστήματος.

Τα μικρά απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας απαντώνται κυρίως σε υποανάπτυκτες και αναπτυσσόμενες χώρες, καθώς και σε χώρες με πολλά μικρά νησιά (όπως η Ελλάδα). Ειδικότερα για την Ελλάδα, αξίζει να τονιστεί ότι από τις 560000 ιδιωτικές απομονωμένες αγροικίες που υπάρχουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση και δεν έχουν πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο, ένα ποσοστό 10% περίπου ανήκει στη χώρα μας [1.1]. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων αυτών είναι το υψηλό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι αρκετά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των διασυνδεδεμένων συστημάτων, και οφείλεται κυρίως στο κόστος του πετρελαίου που καταναλώνουν οι ντηζελογεννήτριες που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όταν δεν επαρκεί η ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας για την κάλυψη του φορτίου.

Η ανάλυση και ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αποβεί μια εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των διαθέσιμων επιλογών και της αβεβαιότητας που υπάρχει σε βασικές παραμέτρους, όπως το μέγεθος του φορτίου και η μελλοντική τιμή του καυσίμου. Η χρήση τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προσθέτει στο πρόβλημα επιπλέον πολυπλοκότητα, καθώς η ισχύς που παράγουν είναι διακοπτόμενη, εποχιακή και μη ελεγχόμενη, ενώ η διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εμπεριέχει αβεβαιότητα.

1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ως σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές κατανάλωσης, τις οποίες εξυπηρετεί το ΣΗΕ. Ένα ΣΗΕ χρειάζεται να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις [1.2]:

- Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε όλες τις περιοχές κατανάλωσης που εξυπηρετούνται από αυτό.
- 2. Ικανοποίηση της διαρκώς μεταβαλλόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Παροχή ποιοτικής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να διασφαλίζεται σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.
- Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με το ελάχιστο δυνατό οικονομικό κόστος και τις ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Ένα ΣΗΕ αποτελείται από τα ακόλουθα τέσσερα κύρια μέρη:

- Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που μετατρέπει μια μορφή πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από συμβατικές μονάδες και από μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ).
- 2. Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που μεταφέρει την ισχύ από τις μονάδες παραγωγής προς τα σημεία όπου γίνεται η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, επειδή έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και κατά συνέπεια οικονομικότερη λειτουργία. Από το

σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτούνται απευθείας οι καταναλωτές υψηλής τάσης.

- Το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι υπεύθυνο για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης.
- 4. Τα φορτία, που αποτελούν τις συνολικές απαιτήσεις σε ισχύ των καταναλωτών που είναι συνδεδεμένοι στο ΣΗΕ, και εκφράζονται σε kW ή MW. Η μεταβαλλόμενη ζήτηση ισχύος από τους καταναλωτές συναρτήσει του χρόνου, μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά μέσω της καμπύλης φορτίου. Η μέγιστη τιμή του φορτίου στη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου ονομάζεται αιχμή φορτίου της περιόδου αυτής.



Σχήμα 1.1: Επίδραση του πλήθους των κατοικιών στην ημερήσια καμπύλη φορτίου.

Τα ΣΗΕ διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: 1) τα διασυνδεδεμένα ΣΗΕ, και 2) τα απομονωμένα ΣΗΕ. Στα διασυνδεδεμένα ΣΗΕ, μεγάλες κεντρικές μονάδες παραγωγής εξυπηρετούν ένα ευρύ γεωγραφικό και ποσοτικό φάσμα ηλεκτρικών φορτίων. Αντίθετα, τα απομονωμένα ΣΗΕ βρίσκονται εγκατεστημένα σε απομονωμένες γεωγραφικά περιοχές, οι οποίες δεν έχουν τη δυνατότητα διασύνδεσης με ένα ευρύτερο σύνολο συστημάτων. Το μέγεθος των απομονωμένων ΣΗΕ μπορεί να ποικίλλει από πολλά MW (για μεγάλα νησιωτικά δίκτυα), έως την τάξη του 1 kW (για μια απομονωμένη αγροικία). Στα απομονωμένα ΣΗΕ χρησιμοποιείται συνήθως ένας συνδυασμός από δύο ή περισσότερες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε η συνεργασία μεταξύ τους να αντιμετωπίζει τους εγγενείς περιορισμούς της καθεμιάς από αυτές. Τα συστήματα αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται ως υβριδικά, και τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούν ως πηγές ηλεκτρικής ενέργειας και τις ΑΠΕ, καθώς αυτές είναι παρούσες σε ικανοποιητικά μεγέθη σε απομονωμένες γεωγραφικά περιοχές. Τα απομονωμένα ΣΗΕ διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την ισχύ που διαθέτουν [1.3]:

- Στα μεγάλα απομονωμένα ΣΗΕ, που διαθέτουν εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη των 50 MW.
- Στα απομονωμένα ΣΗΕ μεσαίου μεγέθους, των οποίων η εγκατεστημένη ισχύς κυμαίνεται ανάμεσα στα 7 MW και τα 50 MW.
- Στα μικρά απομονωμένα ΣΗΕ (ΜΑΣΗΕ), που διαθέτουν ονομαστική ισχύ μικρότερη των 7 MW. Η μελέτη των ΜΑΣΗΕ αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα ΜΑΣΗΕ συνδυάζει το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ένα ελάχιστου μεγέθους ή μη υπάρχον σύστημα μεταφοράς, και με ένα εξαιρετικά μικρό και αρκετά συνεπτυγμένο σύστημα διανομής [1.4]. Επιπλέον, η μορφή της καμπύλης φορτίου ενός ΜΑΣΗΕ σχετίζεται με τον αριθμό των καταναλωτών που εξυπηρετούνται. Στο Σχήμα 1.1 φαίνονται οι καμπύλες φορτίου για διαφορετικό αριθμό κατοικιών, από όπου διαπιστώνεται ότι όσο ο αριθμός των κατοικιών αυξάνει, τόσο εξομαλύνεται η καμπύλη φορτίου και ταυτόχρονα μειώνεται το φορτίο αιχμής ανά κατοικία.

1.3 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

1.3.1 Βελτιστοποίηση δομής ΜΑΣΗΕ

Η πλειονότητα των μελετώμενων ΜΑΣΗΕ περιλαμβάνει τεχνολογίες που βασίζονται σε ΑΠΕ, οι οποίες συνήθως συνδυάζονται με τεχνολογίες αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας και/ή με συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφία έχουν μελετηθεί ΜΑΣΗΕ που εμπεριέχουν ανεμογεννήτριες (ΑΓ) και συσσωρευτές [1.5], φωτοβολταϊκά (ΦΒ) και συσσωρευτές [1.6], συνδυασμό ΑΓ, ΦΒ και συσσωρευτών [1.7]-[1.8], μικρά υδροηλεκτρικά έργα [1.9], και ηλιακές θερμικές τεχνολογίες [1.10]. Σε πολλές περιπτώσεις, εκτός των τεχνολογιών που βασίζονται σε ΑΠΕ, στα ΜΑΣΗΕ περιλαμβάνονται και συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συνήθως ντηζελογεννήτριες) [1.11]-[1.13]. Η εγκατάσταση συσσωρευτών βοηθά στη βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας των παραπάνω υβριδικών συστημάτων [1.14]-[1.15]. Μια εναλλακτική και πολλά υποσχόμενη λύση για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η χρήση συστήματος που περιλαμβάνει δεξαμενή υδρογόνου, μονάδα ηλεκτρόλυσης και κυψέλες καυσίμου [1.16]-[1.17].

Για την εύρεση της οικονομικά βέλτιστης δομής ενός ΜΑΣΗΕ έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός μεθοδολογιών. Από την κατηγορία των κλασσικών μεθόδων βελτιστοποίησης, έχουν χρησιμοποιηθεί ο γραμμικός προγραμματισμός [1.18]-[1.20] και ο δυναμικός προγραμματισμός [1.21]. Ιδιαίτερα δημοφιλής είναι η χρήση στατιστικών μεθόδων [1.22]-[1.24] και πιθανοτικών μεθόδων [1.25], οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα που υπάρχει σε πολλές παραμέτρους του συστήματος. Για το σχεδιασμό απομονωμένων ΣΗΕ έχουν επίσης εφαρμοστεί μεθοδολογίες της τεχνικής νοημοσύνης, που περιλαμβάνουν τα νευρωνικά δίκτυα [1.26]-[1.27] και τα νευροασαφή συστήματα [1.28]. Επιπλέον, το πρόβλημα έχει επιλυθεί με χρήση ευρετικών μεθόδων [1.29]-[1.31]. Η χρήση όλων των παραπάνω μεθοδολογιών έχει ως αποτέλεσμα την εύρεση υποβέλτιστων λύσεων, οι οποίες συνδυάζονται συνήθως με αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις.

Η πιο άμεση μέθοδος επίλυσης του προβλήματος της οικονομικά βέλτιστης δομής ενός ΜΑΣΗΕ είναι η πλήρης απαρίθμηση όλων των δυνατών λύσεων, καθώς το συγκεκριμένο πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Η προσέγγιση αυτή ακολουθείται από το λογισμικό HOMER [1.32] και εξασφαλίζει την εύρεση της βέλτιστης λύσης, αλλά έχει ως μειονέκτημα τον πολύ υψηλό υπολογιστικό φόρτο. Τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί η χρήση γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος [1.33]-[1.36], καθώς συνδυάζουν τις λογικές υπολογιστικές απαιτήσεις με την εύρεση λύσεων πολύ καλής ποιότητας.

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα που αφορά την οικονομική λειτουργία ενός ΜΑΣΗΕ είναι η επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής συνεργασίας μεταξύ των διαφόρων συστατικών του. Το μεγάλο πλήθος εναλλακτικών διαθέσιμων επιλογών που υπάρχουν σε ένα υβριδικό ΜΑΣΗΕ έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός σημαντικού αριθμού στρατηγικών, που σχετίζονται τόσο με τη βέλτιστη συνεργασία μεταξύ των τεχνολογιών παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας [1.37]-[1.40], όσο και με την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου λαμβάνοντας υπόψη τις ηλεκτρικές και θερμικές ανάγκες του συστήματος [1.41].

1.3.2 Μοντελοποίηση και ανάλυση αξιοπιστίας ΣΗΕ με δίκτυα Petri

Τα δίκτυα Petri (ΔP) είναι ένα εργαλείο που συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των μεθόδων προσομοίωσης με το επιπρόσθετο πλεονέκτημα της γραφικής αναπαράστασης. Οι ιδιότητες αυτές επιτρέπουν την εφαρμογή των ΔP τόσο στη μελέτη των ΣΗΕ [1.42]-[1.43], όσο και στη μοντελοποίηση ποικίλων σεναρίων αξιοπιστίας και ασφάλειας σε τεχνολογικά συστήματα [1.44]. Ειδικότερα για το χώρο των ΣΗΕ, τα ΔP έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής [1.45]-[1.46], την επίλυση του προβλήματος επαναφοράς ενός ΣΗΕ [1.47], καθώς και για την ανάλυση αξιοπιστίας και τη διάγνωση βλαβών των συστημάτων μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας [1.48]-[1.52]. Όσον αφορά τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα ΔP έχουν χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση διασυνδεδεμένων ΣΗΕ [1.53]-[1.54], απομονωμένων συστημάτων πλοίων [1.55], καθώς και στον έλεγχο της θερμοκρασίας μιας μονάδας συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού [1.56]. Παρόλα αυτά, όλοι οι παραπάνω τύποι συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν μόνο συμβατικές πηγές ενέργειας. Η ανάλυση αξιοπιστίας ΣΗΕ που περιλαμβάνουν τεχνολογίες ΑΠΕ εμπεριέχει σημαντικές δυσκολίες λόγω της μη ελεγχόμενης παραγωγής ενέργειας από αυτές [1.57]-[1.58], και η μοντελοποίηση ενός συστήματος αυτής της κατηγορίας με ΔΡ είναι μια καινοτόμος διαδικασία.

1.3.3 Περιβαλλοντική αποτίμηση ΜΑΣΗΕ

Η περιβαλλοντική αποτίμηση ενός ΜΑΣΗΕ εξετάζεται συνήθως σε συνεργασία με την οικονομική του αποτίμηση, και οι μεθοδολογίες που έχουν προταθεί ανήκουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις κλασσικές μεθόδους και τις μεθευρετικές μεθόδους. Οι κλασσικές μέθοδοι χρησιμοποιούν τη προσέγγιση του αθροιστικού μέσου, η οποία θεωρεί ένα κόστος τιμωρίας που σχετίζεται με τις αέριες εκπομπές, το οποίο προσαρμόζεται στην αντικειμενική συνάρτηση κόστους του συστήματος. Με αυτό τον τρόπο η περιβαλλοντική και οικονομική βελτιστοποίηση ανάγεται σε ένα απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης της συνολικής συνάρτησης κόστους [1.59]. Η μεθοδολογία αυτή ακολουθείται από το λογισμικό HOMER [1.32]. Οι μεθευρετικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί χρησιμοποιούν γενετικούς αλγορίθμους πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης, οι οποίο υπολογίζουν το σύνολο Pareto των μη κυριαρχουσών λύσεων που ελαχιστοποιούν το κόστος και τις αέριες εκπομπές του συστήματος [1.60]. Οι παραπάνω μεθοδολογίες θεωρούν ως εκπομπές του συστήματος μόνο τις απευθείας εκπομπές κατά τη διάρκεια λειτουργίας του. Για την ανάλυση των αέριων εκπομπών του συστήματος σε όλα τα στάδια ζωής των συστατικών του χρησιμοποιείται η μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής [1.61]-[1.62], η οποία όμως δεν έχει συνδυαστεί με την οικονομική ανάλυση του συστήματος.

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η δομή της εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο 2° Κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανάλυσης των μικρών απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία βασίζεται στην ετήσια προσομοίωση της λειτουργίας τους ανά σταθερά χρονικά βήματα μικρής διάρκειας. Η ανάλυση αυτή περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση των εξαρτημάτων που περιέχονται στο σύστημα, καθώς και τον τρόπο συνεργασίας τους. Επιπλέον, παρουσιάζεται η μεθοδολογία οικονομικής αποτίμησης που χρησιμοποιείται, καθώς η επιλογή του βέλτιστου συστήματος βασίζεται στο κριτήριο της ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους, που είναι το άθροισμα του κόστους επένδυσης και του κόστους λειτουργίας του συστήματος.

Στο 3° Κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία και συγκρίνονται τα αποτελέσματα επίλυσης του σύνθετου προβλήματος συνδυαστικής βελτιστοποίησης της δομής ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας καταρχήν τρεις δημοφιλείς μεθευρετικές μεθόδους: την αναζήτηση ταμπού, τους γενετικούς αλγορίθμους και την προσομοιωμένη ανόπτηση. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, προτείνονται επιπλέον δυο τρόποι συνεργασίας των παραπάνω μεθευρετικών μεθόδων, που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της καθεμιάς από αυτές.

Στο 4° Κεφάλαιο γίνεται αξιολόγηση ενός συνόλου από εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας του συστήματος. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση της μεταβολής του αιολικού και ηλιακού δυναμικού, της προσθήκης συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου στα φωτοβολταϊκά συστήματα, της αύξησης του ηλεκτρικού φορτίου του συστήματος, της αύξησης της τιμής του καυσίμου ντήζελ, της μείωσης της τιμής αγοράς των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ επιπλέον μελετάται η επίδραση της αλλαγής του συστήματος αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας από συσσωρευτές σε δεξαμενή υδρογόνου.

Στο 5° Κεφάλαιο παρουσιάζεται μια νέα προσέγγιση στην προσομοίωση και ανάλυση αξιοπιστίας μικρών απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε δίκτυα Petri. Επιπλέον, προτείνονται ορισμένες προσθήκες και τροποποιήσεις στη συνήθη μεθοδολογία των δικτύων Petri, έτσι ώστε να μπορέσουν να μελετηθούν με αποδοτικότερο τρόπο τα βασικότερα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποτίμηση της λειτουργίας του συστήματος βασίζεται στον υπολογισμό εννέα δεικτών αξιοπιστίας και τεσσάρων δεικτών επίδοσης.

Στο 6° Κεφάλαιο περιγράφεται η οικονομική και περιβαλλοντική αποτίμηση ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία λαμβάνει ως οικονομικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας, και ως περιβαλλοντικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου του συστήματος, όπως αυτές υπολογίζονται από την εφαρμογή της μεθοδολογίας ανάλυσης κύκλου ζωής των συστατικών του προς μελέτη συστήματος. Το παραπάνω πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης, και η επίλυσή του υλοποιείται με τη συνεργασία ενός γενετικού αλγορίθμου πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης και μιας διαδικασίας τοπικής αναζήτησης.

Στο 7° Κεφάλαιο γίνεται μία ανασκόπηση των μεθόδων που αναπτύχθηκαν, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και η συμβολή της διατριβής. Επίσης, προτείνονται νέα πεδία έρευνας και μελέτης σαν συνέχεια της παρούσας διατριβής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Ι.Κ. Καλδέλης, Διαχείριση της αιολικής ενέργειας 2^η έκδοση. Εκδόσεις Σταμούλη: Αθήνα, 2005.
- [1.2] Π.Σ. Γεωργιλάκης, Ηλεκτρική οικονομία. Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2006.
- [1.3] Ε.Σ. Καραπιδάκης, "Συμβολή υπολογιστικής νοημοσύνης στην εκτίμηση δυναμικής ασφάλειας αυτόνομων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο," Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2003.
- [1.4] R. Billinton and R. Karki, "Capacity planning in small isolated power systems using probabilistic methods," *IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*, vol. 146, no. 1, pp. 61-64, Jan. 1999.
- [1.5] J.K. Kaldellis, "Optimum autonomous wind-power system sizing for remote consumers, using long-term wind speed data," *Applied Energy*, vol. 71, pp. 215-233, 2002.
- [1.6] J.K. Kaldellis, "Optimum technoeconomic energy autonomous photovoltaic solution for remote consumers throughout Greece," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 2745-2760, 2004.
- [1.7] S. Diaf, D. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system," *Energy Policy*, vol. 35, pp. 5708-5718, 2007.
- [1.8] A.N. Celik, "Optimisation and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic-wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 43, pp. 2453-2468, 2002.
- [1.9] S. Doolla and T.S. Bhatti, "Automatic generation control of an isolated small-hydro power plant," *Electric Power Systems Research*, vol. 76, pp. 889-896, 2006.
- [1.10] T. Tsoutsos, V. Gekas, and K. Marketaki, "Technical and economical evaluation of solar thermal power generation," *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 873-886, 2003.
- [1.11] G.N. Kariniotakis and G.S. Stavrakakis, "A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated diesel-wind turbines systems interaction. Part II: Implementation of the algorithm and case-studies with induction generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 3, pp. 584-590, 1995.
- [1.12] S.A. Papathanassiou and M.P. Papadopoulos, "Dynamic characteristics of autonomous winddiesel systems," *Renewable Energy*, vol. 23, pp. 293-311, 2001.
- [1.13] J.G. McGowan and J.F. Manwell, "Hybrid wind/PV/diesel system experiences," *Renewable Energy*, vol. 16, pp. 928-933, 1999.
- [1.14] M. Muselli, G. Notton, and A. Louche, "Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management," *Solar Energy*, vol. 65, pp. 143-157, 1999.
- [1.15] M.A. Elhadidy and S.M. Shaahid, "Promoting applications of hybrid (wind + photovoltaic + diesel + battery) power systems in hot regions," *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 517-528, 2003.
- [1.16] E.I. Zoulias, R. Glockner, N. Lymberopoulos, T. Tsoutsos, I. Vosseler, O. Gavalda, H.J. Mydske, and P. Taylor, "Integration of hydrogen energy technologies in stand-alone power

systems analysis of the current potential for applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, pp. 432-462, 2006.

- [1.17] D.B. Nelson, M.H. Nehrir, and C. Wang, "Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 1641-1656, 2006.
- [1.18] R. Chedid and S. Rahman, "Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 12, no. 1, pp. 79-85, 1997.
- [1.19] R. Yokoyama, K. Ito, and Y. Yuasa, "Multiobjective optimal unit sizing hybrid power generation systems utilizing photovoltaic and wind energy," *Transactions of the ASME: Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 116, pp. 167-173, 1994.
- [1.20] A.K. Akella, M.P. Sharma, and R.P. Saini, "Optimum utilization of renewable energy sources in a remote area," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, pp. 894-908, 2007.
- [1.21] A.G. Bakirtzis and P.S. Dokopoulos, "Short term generation scheduling in a small autonomous system with unconventional energy sources," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 1230-1236, 1988.
- [1.22] C. Protogeropoulos, B.J. Brinkworth, and R.H. Marshall, "Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage," *International Journal of Energy Research*, vol. 21, pp. 465-479, 1997.
- [1.23] G.B. Shrestha and L. Goel, "A study on optimal sizing of stand-alone photovoltaic stations," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, no. 4, pp. 373-378, 1998.
- [1.24] B.S. Borowy and Z.M. Salameh, "Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 11, no. 2, pp. 367-375, 1996.
- [1.25] A.D. Bagul, Z.M. Salameh, and B. Borowy, "Sizing of a standalone hybrid windphotovoltaic system using a three-event probability density approximation," *Solar Energy*, vol. 56, pp. 323-335, 1996.
- [1.26] L. Hontoria, J. Aguilera, and P. Zufiria, "A new approach for sizing standalone photovoltaic systems based in neural networks," *Solar Energy*, vol. 78, pp. 313-319, 2005.
- [1.27] A. Mellit, M. Benghanem, A. Hadj Arab, and A. Guessoum, "An adaptive artificial neural network model for sizing of stand-alone photovoltaic system: application for isolated sites in Algeria," *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 1501-1524, 2005.
- [1.28] A. Mellit, "Artificial intelligence based-modeling for sizing of a standalone photovoltaic power system: proposition for a new model using neuro-fuzzy system (ANFIS)," in *Proceedings of the 3rd International IEEE Conference on Intelligent Systems*, vol. 1, pp. 605-611, 2006.
- [1.29] W.D. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan, and V. Gerez, "Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/pv systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, no. 1, pp. 70-75, 1998.
- [1.30] S. Ashok, "Optimised model for community-based hybrid energy system," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 1155-1164, 2007.

- [1.31] E.S. Gavanidou and A.G. Bakirtzis, "Design of a stand alone system with renewable energy sources using trade off methods," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 7, no. 1, pp. 42-48, 1992.
- [1.32] HOMER, the micropower optimization model. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <u>http://www.nrel.gov/homer</u>
- [1.33] R. Dufo-Lopez and J.L. Bernal-Agustin, "Design and control strategies of PV-diesel systems using genetic algorithms," *Solar Energy*, vol. 79, pp. 33-46, 2005.
- [1.34] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, and K. Kalaitzakis, "Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms," *Solar Energy*, vol. 80, pp. 1072-1088, 2006.
- [1.35] R. Dufo-Lopez, J.L. Bernal-Agustin, and J. Contreras, "Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 1102-1126, 2007.
- [1.36] T. Senjyua, D. Hayashia, A. Yonaa, N. Urasakia, and T. Funabashi, "Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 1917-1933, 2007.
- [1.37] C.D. Barley and C.B. Winn, "Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems," *Solar Energy*, vol. 58, pp. 165-179, 1996.
- [1.38] Bagen and R. Billinton, "Evaluation of different operating strategies in small stand-alone power systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 3, pp. 654-660, Sept. 2005.
- [1.39] S.R. Vosen and J.O. Keller, "Hybrid energy storage systems for stand-alone electric power systems: optimization of systems performance and cost through control strategies," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 24, 1139-1156, 1999.
- [1.40] O. Ulleberg, "The importance of control strategies in PV-hydrogen systems," *Solar Energy*, vol. 76, pp. 323-329, 2004.
- [1.41] C.A. Hernandez-Aramburo, T.C. Green, and N. Mugniot, "Fuel consumption minimization of a microgrid," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 3, pp. 673-681, 2005.
- [1.42] M. Jamil, "Current status of Petri nets Theory in power systems," *Electric Power Components and Systems*, vol. 33, pp. 263-276, 2005.
- [1.43] Z. Lin, F. Wen, C.Y. Chung, and K.P. Wong, "A survey on the applications of Petri net theory in power systems," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-7, 2006.
- [1.44] W.G. Schneeweiss, "Tutorial: Petri nets as a graphical description medium for many reliability scenarios," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 50, no. 2, pp. 159-164, June 2001.
- [1.45] B. Wang, "Petri net model in unit commitment problem with time constraints," *Computer Applications*, vol. 23, no. 5, pp. 24-27, 2003.
- [1.46] J. Yu, J. Z. Zhou, H. H. Dai, J. J. Yang, and B. Hua, "Compound controlled colored Petri net model of unit commitment," *Power System Technology*, vol. 28, no. 11, pp. 62-66, 2004.
- [1.47] N.A. Fountas, N.D. Hatziargyriou, and K.P. Valavanis, "Hierarchical time-extended Petri nets as a generic tool for power system restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 837-843, 1997.

- [1.48] J. Wang, Y. Deng, and G. Xu, "Reachability analysis of real time systems using time Petri nets," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, vol. 30, no. 5, pp. 725-735, Oct. 2000.
- [1.49] V. Volovoi, G. Kavalieratos, M. Waters, and D. Mavris, "Modeling the reliability of distribution systems using Petri nets," in *Proceedings of the 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, pp. 567-572, 2004.
- [1.50] C.S. Chen, C.H. Lin, and H.Y. Tsai, "A rule-based expert system with colored Petri net models for distribution system service restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 1073-1080, 2002.
- [1.51] K.L. Lo, H.S. Ng., and J. Trecat, "Power systems fault diagnosis using Petri nets," *IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 3, pp. 231-236, May 1997.
- [1.52] P.S. Georgilakis, J.A. Katsigiannis, K.P. Valavanis, and A.T. Souflaris, "A systematic stochastic Petri net based methodology for transformer fault diagnosis and repair actions," *Journal of Intelligent Robotic Systems*, vol. 45, pp. 181-201, 2006.
- [1.53] N. Lu, J.H. Chow, and A.A. Descrochers, "A multi-layer Petri net model for deregulated electric power systems," in *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 513-518, 2002.
- [1.54] H. Salefhar and T. Li, "Stochastic Petri nets for reliability assessment of power generating systems with operating considerations," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, pp. 459-464, 1999.
- [1.55] M. Dumitrescu, "Stochastic Petri nets architectural modules for power system availability," in *Proceedings of Electronics, Circuits and Systems*, vol. 2, pp. 745-748, 2002.
- [1.56] M. Gribaudo, A. Horváth, A. Bobbio, E. Tronci, E. Ciancamerla, and M. Minichino, "Fluid Petri nets and hybrid model-checking: a comparative case study," *Reliability Engineering* and System Safety, vol. 81, pp. 239-257, 2003.
- [1.57] A.G. Bakirtzis, "A probabilistic method for the evaluation of the reliability of stand-alone wind energy conversion systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 7, no. 1, pp. 99-107, 1992.
- [1.58] R. Billinton and R. Karki, "Reliability/cost implications of utilizing photovoltaics in small isolated power systems," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 79, pp. 11-16, 2003.
- [1.59] R.W. Wies, R.A. Johnson, A.N. Agrawal, and T.J. Chubb, "Simulink model for economic analysis and environmental impacts of a PV with diesel-battery system for remote villages," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 692-700, 2005.
- [1.60] J.L. Bernal-Agustin, R. Dufo-Lopez, and D.M. Rivas-Ascaso, "Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2227-2244, 2006.
- [1.61] F.I. Khan, K. Hawboldt, and M.T. Iqbal, "Life cycle analysis of wind-fuel cell integrated system," *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 157-177, 2005.
- [1.62] Y. Kemmoku, K. Ishikawa, S. Nakagawa, T. Kawamoto, and T. Sakakibara, "Life cycle CO₂ emissions of a photovoltaic/wind/diesel generating system," *Electrical Energy in Japan*, vol. 138, no. 2, pp. 14-23, 2002.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η βέλτιστη σχεδίαση και η μοντελοποίηση ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εμπεριέχει σημαντικές δυσκολίες, λόγω του μεγάλου αριθμού των διαθέσιμων επιλογών σχεδίασης, της αβεβαιότητας και μεταβλητότητας σημαντικών παραμέτρων όπως η ζήτηση φορτίου, και της αδυναμίας ελέγχου του ρυθμού παροχής της πρωτογενούς ενέργειας σε ορισμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ο άνεμος και η ηλιακή ακτινοβολία. Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανάλυσης συστημάτων αυτού του τύπου, η οποία βασίζεται στην ετήσια προσομοίωση της λειτουργίας τους ανά σταθερά χρονικά βήματα μικρής διάρκειας. Η ανάλυση αυτή περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση των εζαρτημάτων που περιέχονται σε ένα μικρό απομονωμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και του τρόπου συνεργασίας τους. Επιπλέον, παρουσιάζεται η μεθοδολογία οικονομικής αποτίμησης που χρησιμοποιείται, καθώς η επιλογή του βέλτιστου συστήματος βασίζεται στο κριτήριο της ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους, που είναι το άθροισμα του κόστους επένδυσης και του κόστους λειτουργίας του συστήματος.

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσομοίωση, ανά σταθερά χρονικά βήματα, της λειτουργίας ενός ΜΑΣΗΕ που περιλαμβάνει τεχνολογίες ΑΠΕ μπορεί να γίνει με τη χρησιμοποίηση των παρακάτω τριών κατηγοριών μοντέλων [2.1], [2.2]:

- Των λογιστικών μοντέλων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης επίδοσης των προς μελέτη συστημάτων, τη διαστασιολόγηση και την οικονομική τους αποτίμηση. Η είσοδος των μοντέλων αυτών περιλαμβάνει, εκτός από τα στοιχεία των εξαρτημάτων του συστήματος (π.χ., ισχείς, χαρακτηριστικά λειτουργίας, κλπ), κατάλληλα επιλεγμένες χρονοσειρές φορτίου και δεδομένων που σχετίζονται με τις τεχνολογίες ΑΠΕ. Ως έξοδος δίνεται η παραγόμενη ενέργεια (συνολική και ανά μονάδα), το κόστος λειτουργίας, κλπ. Τα λογιστικά μοντέλα διαιρούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:
 - a. Τα στατιστικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούν μεγάλα χρονικά βήματα (μηνιαία ή ετήσια), και βασίζονται σε στατιστικές τεχνικές για να προβλέψουν τη βραχυπρόθεσμη μεταβλητότητα που υπάρχει μέσα σε αυτά. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η απλότητα και η ταχύτητά τους, ενώ τα μειονεκτήματά τους είναι η περιορισμένη ακρίβεια και η μικρή τους ευελιξία στους συνδυασμούς εξαρτημάτων που μπορούν να μοντελοποιήσουν.

Παραδείγματα στατιστικών μοντέλων είναι το RETScreen [2.3], το PVSYST [2.4], και το NSol!.

- b. Τα μοντέλα χρονοσειρών, τα οποία χρησιμοποιούν χρονικά βήματα που κυμαίνονται συνήθως από 10 λεπτά έως μία ώρα, και υποθέτουν ότι οι χρονικά εξαρτημένες μεταβλητές τους (π.χ., ηλεκτρικό φορτίο, δεδομένα ΑΠΕ) παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια του χρονικού βήματος. Εάν τα μοντέλα αυτά συνδυαστούν με στατιστικά μοντέλα, έτσι ώστε να μοντελοποιούν τις διακυμάνσεις των χρονικά εξαρτημένων μεταβλητών τους κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος, το εύρος των χρονικών βημάτων μπορεί να μειωθεί μέχρι και το ένα λεπτό. Τα μοντέλα χρονοσειρών παρέχουν σημαντικά μεγαλύτερες δυνατότητες μοντελοποίησης και πιο ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με τα στατιστικά μοντέλα, έχοντας ως μειονέκτημα τις αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις. Παραδείγματα μοντέλων χρονοσειρών είναι το HOMER [2.5], το HYBRI2 [2.6], το PV-DesignPro [2.7], και το PV*SOL [2.8].
- Των μοντέλων μόνιμης κατάστασης λειτουργίας, με τα οποία υπολογίζονται οι επιπτώσεις της λειτουργίας του συστήματος στην τάση και τη συχνότητα του δικτύου.
- 3. Των μοντέλων δυναμικής ανάλυσης, με τα οποία εξετάζεται η συμπεριφορά του ΜΑΣΗΕ κατά τις έκτακτες καταστάσεις (π.χ., βραχυκυκλώματα, ζεύξη και απόζευξη γεννητριών, κλπ), καθώς και η ευστάθειά του, λαμβανομένης υπόψη και της λειτουργίας των μηχανισμών προστασίας, οι οποίοι επίσης προσομοιώνονται.

Η κατηγορία μοντέλου που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή είναι το λογιστικό μοντέλο χρονοσειρών, καθώς στόχος είναι η διαστασιολόγηση ενός ΜΑΣΗΕ που μπορεί να περιέχει ένα μεγάλο συνδυασμό εξαρτημάτων, καθώς και η οικονομική του αποτίμηση. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζεται ο τρόπος μοντελοποίησης των εξαρτημάτων ενός ΜΑΣΗΕ, ο τρόπος συνεργασίας μεταξύ τους, και η μεθοδολογία οικονομικής αποτίμησης που χρησιμοποιείται.

2.2 ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στις μονάδες μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής περιλαμβάνονται οι τεχνολογίες ΑΠΕ που παρουσιάζουν αδυναμία ελέγχου της παραγόμενης ενέργειας, λόγω της αστάθειας που παρουσιάζεται στην παροχή της πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιούν. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία και χρησιμοποιούνται σε ΜΑΣΗΕ είναι οι ανεμογεννήτριες (ΑΓ), τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) συστήματα και τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα (ΥΗΕ).

2.2.1 Ανεμογεννήτριες

Οι ΑΓ μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι ΑΓ μπορεί να είναι δύο τύπων: ΑΓ **οριζόντιου άξονα** και ΑΓ **κατακόρυφου άξονα**. Οι ΑΓ οριζόντιου άξονα παρουσιάζουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα και έχουν κυριαρχήσει στην πράξη. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τα βασικά μέρη μιας ΑΓ οριζόντιου άξονα.



Σχήμα 2.1: Βασικά μέρη ΑΓ οριζόντιου άξονα.

Η ισχύς της αέριας δέσμης P_{air} (σε kW), εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα ρ_{air} (σε kg/m³), το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής μέσα από την οποία διέρχεται η αέρια δέσμη A (σε m²), και την ταχύτητα του ανέμου V_{air} (σε m/s), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_{air} = \frac{(1/2) \cdot \rho_{air} \cdot A \cdot V_{air}^3}{1000}.$$
 (2.1)

Η θεωρητική ισχύς που παράγει μια ΑΓ P_{WTth} (σε kW) περιγράφεται από την εξίσωση:

$$P_{WTth} = \frac{(1/2) \cdot C_P \cdot \rho_{air} \cdot A \cdot V_{air}^3}{1000}.$$
(2.2)

όπου C_P είναι ο συντελεστής ισχύος της ΑΓ, που περιγράφει το κλάσμα της ισχύος αέριας δέσμης P_{air} που θα μετατραπεί σε μηχανικό έργο από την ΑΓ. Ο συντελεστής ισχύος C_P περιλαμβάνει όλες τις αεροδυναμικές απώλειες της ΑΓ και έχει ως θεωρητική μέγιστη τιμή την $C_{Pmax} = 16/27 = 0.593$, που καλείται και **όριο Betz**, ενώ στην πράξη δεν υπερβαίνει την τιμή $C_P = 0.5$.

Εκτός από τις αεροδυναμικές απώλειες που περιγράφηκαν παραπάνω, υπάρχουν και άλλοι περιορισμοί που μειώνουν ακόμα περισσότερο την πραγματικά παραγόμενη ισχύ της ΑΓ P_{WT}. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι [2.9]:

- Για μικρές ταχύτητες ανέμου η ΑΓ δεν περιστρέφεται, επειδή οι απώλειες κενού φορτίου (τριβές στον άξονα, μειωτήρα, κλπ) είναι μεγαλύτερες από την παραγόμενη ισχύ της μηχανής. Η ταχύτητα στην οποία αρχίζει η λειτουργία της ΑΓ ονομάζεται ταχύτητα έναρξης λειτουργίας V_{in}, με τυπικές τιμές από 2.5 m/s έως 5 m/s.
- 2. Από μια τιμή της ταχύτητας του ανέμου και μετά, η ωφέλιμη ισχύς της ΑΓ παραμένει για λειτουργικούς λόγους περίπου σταθερή, με αποτέλεσμα να χάνεται ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας του ανέμου, ιδιαίτερα σε υψηλές ταχύτητες (π.χ., $V_{air} \ge 12$ m/s). Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς από την ΑΓ ονομάζεται **ονομαστική ισχύς** P_R, ενώ η μικρότερη ταχύτητα του ανέμου στην οποία παράγεται η ονομαστική ισχύς της ΑΓ ονομάζεται ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας V_R . Η μη υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος P_R όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ορισμένη τιμή, μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικές αρχές ελέγχου: τον αεροδυναμικό έλεγγο και τον έλεγγο του βήματος της έλικας [2.1]. Στον αεροδυναμικό έλεγχο, η παραγωγή ισχύος καθορίζεται από τις εγγενείς αεροδυναμικές ιδιότητες του πτερυγίου, και δεν υπάρχει κανένα κινούμενο μέρος που να ρυθμίζεται. Στον έλεγχο βήματος της έλικας, η γωνία των πτερυγίων του δρομέα μπορεί να ρυθμίζεται ενεργά από το σύστημα ελέγχου της μηχανής. Ο αεροδυναμικός έλεγχος εφαρμόζεται κυρίως στις μικρού μεγέθους ΑΓ λόγω της απλότητάς του, ενώ ο έλεγχος βήματος της έλικας εφαρμόζεται κυρίως στις μεσαίου και μεγάλου μεγέθους ΑΓ λόγω της καλύτερης ποιότητας ισχύος που προσφέρει, η οποία συνδυάζεται με μικρότερες μηγανικές καταπονήσεις των πτερυγίων [2.10].
- 3. Για λόγους ασφάλειας της εγκατάστασης, επιβάλλεται η διακοπή λειτουργίας της ΑΓ σε πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας V_{out} κυμαίνεται μεταξύ 20 m/s για μικρές μηχανές έως και 30 m/s για ιδιαίτερα στιβαρές κατασκευές.
- 4. Κατά τη λειτουργία της ΑΓ χρειάζεται να αφαιρεθούν οι μηχανικές απώλειες στον άξονα και το μειωτήρα, καθώς και οι ηλεκτρικές απώλειες της γεννήτριας, πριν τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος P_{wt}. Οι ηλεκτρομηχανολογικές απώλειες είναι σχετικά περιορισμένες, και κυμαίνονται ανάμεσα στο 3% και το 10% της ισχύος αέριας δέσμης P_{air}.



Σχήμα 2.2: Σύγκριση πυκνότητας ισχύος αέριας δέσμης και ΑΓ.
Η συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου V_{air} και της πραγματικά παραγόμενης ισχύος P_{WT} από μια ΑΓ δίνεται από την **καμπύλη ισχύος** της ΑΓ. Στο Σχήμα 2.2 συγκρίνεται η πυκνότητα ισχύος (σε kW/m²) της αέριας δέσμης σε σχέση με τη θεωρητικά μέγιστη πυκνότητα ισχύος μιας ΑΓ (για $C_P = C_{Pmax}$), καθώς και με την πυκνότητα ισχύος που προκύπτει από πραγματικές καμπύλες ισχύος ΑΓ με αεροδυναμικό έλεγχο και με έλεγχο βήματος.

Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου V_{air} πραγματοποιείται με συσκευές που ονομάζονται ανεμόμετρα. Ένα ανεμόμετρο τοποθετείται συνήθως σε ύψος $z_{anem} = 10$ m από το έδαφος, ώστε να επιτυγχάνεται μια αντιπροσωπευτική καταγραφή του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής. Η ταχύτητα του ανέμου όμως αυξάνει σημαντικά με το ύψος από το έδαφος στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις. Επειδή το ύψος πλήμνης της ΑΓ z_{hub} είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερο του ύψους ανεμομέτρου z_{anem} , η ταχύτητα του ανέμου χρειάζεται να τροποποιηθεί κατάλληλα. Για το σκοπό αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο εξισώσεις: ο **εκθετικός νόμος** και ο **λογαριθμικός νόμος**. Ο εκθετικός νόμος εμφανίζει ικανοποιητική ακρίβεια για ύψη έως 100 m. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται ο εκθετικός νόμος, ο οποίος υπολογίζει την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος πλήμνης της ΑΓ $V_{air}(z_{hub})$ σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V_{air}(z_{hub}) = V_{air}(z_{anem}) \cdot \left(\frac{z_{hub}}{z_{anem}}\right)^a$$
(2.3)

όπου $V_{air}(z_{anem})$ είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του ανεμομέτρου και *a* μια παράμετρος, της οποίας η ακριβής τιμή εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους. Οι τιμές της παραμέτρου *a* κυμαίνονται μεταξύ του 0.08 για λείες επιφάνειες (πάγος, θάλασσα) και του 0.45 για αστικές περιοχές. Τυπική τιμή της παραμέτρου *a*, που λαμβάνεται και στην παρούσα διατριβή, είναι η a = 0.20 [2.9].

Η καμπύλη ισχύος μιας ΑΓ αναφέρεται σε πρότυπες συνθήκες μέτρησης στο επίπεδο της θάλασσας, που αντιστοιχούν σε θερμοκρασία $T_0 = 15$ °C (288.15°K) και ατμοσφαιρική πίεση $Pr_0 = 101.325$ kPa. Η πυκνότητα του αέρα υπό αυτές τις συνθήκες έχει τιμή $\rho_{air0} = 1.225$ kg/m³. Εάν οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας μιας περιοχής είναι διαφορετικές από αυτές που αντιστοιχούν στις πρότυπες συνθήκες μέτρησης, η προκύπτουσα ισχύς P_{WT} από την καμπύλη ισχύος χρειάζεται να αναπροσαρμοστεί, πολλαπλασιαζόμενη με το λόγο της πυκνότητας του αέρα ρ_{air} της περιοχής προς την πυκνότητα ρ_{air0} . Ο λόγος αυτός υπολογίζεται από τη σχέση [2.11]:

$$\frac{\rho_{air}}{\rho_{air0}} = \left(\frac{Pr}{Pr_0}\right) \cdot \left(\frac{T_0}{T_{(K)}}\right) = \left(\frac{Pr}{101.325}\right) \cdot \left(\frac{288.15}{273.15+T}\right)$$
(2.4)

όπου *Pr* είναι η ατμοσφαιρική πίεση της περιοχής (σε kPa), $T_{(K)}$ είναι η θερμοκρασία της περιοχής σε °K, και *T* είναι η θερμοκρασία της περιοχής σε °C. Η ατμοσφαιρική πίεση *Pr* μειώνεται με την αύξηση του ύψους *z* (σε m) από την επιφάνεια της θάλασσας, και για ύψη έως 5000 m μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση [2.12]:

$$Pr = 101.29 - 0.011837 \cdot z + 4.793 \cdot 10^{-7} \cdot z^2.$$
(2.5)

Η πραγματική αποδοτικότητα μιας ΑΓ υπολογίζεται μέσω του **συντελεστή φορτίου** (ΣΦ). Ο ετήσιος ΣΦ διαιρεί την ενέργεια που παράγει η ΑΓ σε ένα χρόνο E_{WTyear} (σε kWh) με την ενέργεια που θα παρήγαγε θεωρητικά η ΑΓ εάν λειτουργούσε στην ονομαστική της ισχύ P_R (σε kW) και για τις 8760 ώρες του έτους:

$$\Sigma \Phi = \frac{E_{WTyear}}{P_R \cdot 8760 \text{ h}}.$$
(2.6)

Ο ΣΦ είναι αδιάστατος αριθμός και εξαρτάται από το αιολικό δυναμικό της τοποθεσίας και από τον τύπο της ΑΓ. Οι τιμές του συνήθως κυμαίνονται ανάμεσα στο 0.25 (για περιοχές με χαμηλό αιολικό δυναμικό) και στο 0.40 (για περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό) [2.13].

Για να γίνει δυνατή η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς μιας ΑΓ, είναι απαραίτητη η κατάλληλη μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος της. Στην περίπτωση που εφαρμόζεται αεροδυναμικός έλεγχος, η μοντελοποίηση επιτυγχάνεται με προσαρμογή της καμπύλης ισχύος σε κατάλληλη καμπύλη. Στο Σχήμα 2.3 δείχνεται γραφικά η προσαρμογή των πραγματικών σημείων της καμπύλης ισχύος μιας ΑΓ με αεροδυναμικό έλεγχο σε καμπύλη η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{WT} = 5.36 \cdot 10^{-7} \cdot V_{air}^{7} - 6.01 \cdot 10^{-5} \cdot V_{air}^{6} + 2.68 \cdot 10^{-3} \cdot V_{air}^{5} - 0.06 \cdot V_{air}^{4} + 0.71 \cdot V_{air}^{3} - 4.23 \cdot V_{air}^{2} + 12.12 \cdot V_{air} - 13.18$$
(2.7)
$$\gamma \iota \alpha \quad V_{in} \leq V_{air} \leq V_{aur}.$$

Για τη συγκεκριμένη ΑΓ, η ονομαστική ισχύς είναι $P_R = 10$ kW, η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας είναι $V_{in} = 3$ m/s, ενώ η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας είναι $V_{out} = 24$ m/s. Η επιλογή της παραπάνω εξίσωσης έβδομης τάξης έγινε λόγω της ακριβούς συσχέτισης που επιτυγχάνεται (συντελεστής $R^2 = 99.87\%$), και λόγω του γεγονότος ότι η προκύπτουσα παραγόμενη ισχύς της ΑΓ P_{WT} παρουσιάζει αποκλειστικά θετικές τιμές στο διάστημα ταχυτήτων ανάμεσα στη V_{in} και τη V_{out} .



Σχήμα 2.3: Μοντελοποίηση καμπύλης ισχύος ΑΓ με αεροδυναμικό έλεγχο.

Στην περίπτωση που στην ΑΓ εφαρμόζεται έλεγχος βήματος της έλικας, η καμπύλη ισχύος έχει τη μορφή του Σχήματος 2.4 και μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις διακριτές περιοχές:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & \gamma \iota \alpha & V_{air} < V_{in} \\ f_{WT}(V_{air}) & \gamma \iota \alpha & V_{in} \le V_{air} < V_R \\ P_R & \gamma \iota \alpha & V_R \le V_{air} \le V_{out} \\ 0 & \gamma \iota \alpha & V_{air} > V_{out} \end{cases}$$
(2.8)



Σχήμα 2.4: Καμπύλη ισχύος ΑΓ με έλεγχο του βήματος της έλικας.

Στην εξίσωση (2.8), ο όρος $f_{WT}(V_{air})$ αντιπροσωπεύει μια συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου V_{air} . Εάν είναι γνωστές οι τιμές των σημείων της πραγματικής καμπύλης ισχύος, ο υπολογισμός της $f_{WT}(V_{air})$ μπορεί να γίνει με τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στις ΑΓ με αεροδυναμικό έλεγχο. Εάν όμως είναι μόνο γνωστές οι παράμετροι V_{in} , V_R και P_R , η τιμή της συνάρτησης $f_{WT}(V_{air})$ υπολογίζεται από τη σχέση [2.14]:

$$f_{WT}(V_{air}) = a_{WT} + b_{WT} \cdot V_{air} + c_{WT} \cdot V_{air}^2$$

$$\tag{2.9}$$

όπου *a_{wt}*, *b_{wt}* και *c_{wt}* είναι συντελεστές της καμπύλης ισχύος της AΓ, των οποίων οι τιμές υπολογίζονται από την επίλυση του ακόλουθου συστήματος εξισώσεων:

$$a_{WT} + b_{WT} \cdot V_{in} + c_{WT} \cdot V_{in}^{2} = 0$$

$$a_{WT} + b_{WT} \cdot V_{R} + c_{WT} \cdot V_{R}^{2} = P_{R}$$

$$a_{WT} + b_{WT} \cdot V_{c} + c_{WT} \cdot V_{c}^{2} = P_{R} \cdot \left(\frac{V_{c}}{V_{R}}\right)^{3}$$
(2.10)

όπου:

$$V_c = \frac{V_{in} + V_R}{2}.$$
 (2.11)

Από την επίλυση του συστήματος (2.10) προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές για τους συντελεστές a_{WT} , b_{WT} και c_{WT} :

$$a_{WT} = \frac{P_R \cdot V_{in} \cdot [V_c - 2 \cdot V_R \cdot (V_c / V_R)^3]}{2 \cdot (V_R - V_c)^2}$$

$$b_{WT} = \frac{P_R \cdot [V_R - 3 \cdot V_c + 4 \cdot V_c \cdot (V_c / V_R)^3]}{2 \cdot (V_R - V_c)^2}$$

$$c_{WT} = \frac{P_R \cdot [1 - 2 \cdot (V_c / V_R)^3]}{2 \cdot (V_R - V_c)^2}.$$
(2.12)

2.2.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Αποτελούνται από διόδους ημιαγωγών (συνήθως πυριτίου), οι οποίες καθώς δέχονται στην επιφάνειά τους την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνουν διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και την πίσω όψη τους. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, και το ρεύμα που παράγεται είναι συνεχές. Ο βαθμός απόδοσης ενός ΦΒ συστήματος σε πραγματικές συνθήκες μπορεί να φτάσει έως 14%.

Σε ένα ΦΒ σύστημα, η θεμελιώδης μονάδα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση ενός ΦΒ στοιχείου βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ 0.5 V και 0.6 V. Λόγω του ότι υπάρχουν πολύ λίγες συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν σε τόσο χαμηλές τάσεις, τα ΦΒ στοιχεία συνδέονται σε σειρά και σχηματίζουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Τα ΦΒ πλαίσια αποτελούν τις βασικές δομικές μονάδες ενός ΦΒ συστήματος, και αποτελούνται συνήθως από 36 ΦΒ στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Η ταξινόμηση των ΦΒ πλαισίων γίνεται ανάλογα με την ισχύ που αυτά αποδίδουν κάτω από τις πρότυπες συνθήκες δοκιμής (ΠΣΔ), που αναφέρονται σε πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας 1 kW/m², θερμοκρασία 25°C, και τιμή μάζας αέρα ΑΜ1.5, που σχετίζεται με το μήκος διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα. Η ισχύς εξόδου που μετράται υπό ΠΣΔ εκφράζεται σε "Watt αιχμής" ή W_p. Ο συνδυασμός πολλών ΦΒ πλαισίων, σε σειρά ή παράλληλα, συνήθως σε μια επίπεδη επιφάνεια, αποτελεί τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται η ιεραρχία των ΦΒ συστημάτων.



Σχήμα 2.5: Η ιεραρχία των ΦΒ συστημάτων.

Το ΦΒ στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τις περισσότερες ηλεκτρικές πηγές, οι οποίες διατηρούν σταθερή περίπου τάση στην περιοχή της κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των ΦΒ στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά (και μη γραμμικά) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, ακόμα και εάν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή. Η μεταβολή της τάσης V σε συνάρτηση με την ένταση Ι ενός ΦΒ στοιχείου ορίζει την καμπύλη Ι-V. Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη I-V για ένα ΦB στοιχείο πυριτίου, καθώς και η αντίστοιχη καμπύλη P-V του ΦB στοιχείου που προκύπτει, όπου P είναι η ισχύς που αποδίδεται. Σε κατάσταση βραχυκύκλωσης του ΦΒ στοιχείου, η ένταση του ρεύματος παίρνει τη μέγιστή της τιμή Isc, ενώ η τάση μηδενίζεται. Σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης του ΦΒ στοιχείου, η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται, αλλά η τάση παίρνει τη μέγιστή της τιμή V_{oc}. Επομένως, στη βραχυκυκλωμένη και στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση η ισχύς P του ΦΒ στοιχείου μηδενίζεται. Στο υπόλοιπο τμήμα της καμπύλης I-V, η ισχύς είναι μεγαλύτερη του μηδενός (αφού I > 0 και V > 0), επομένως υπάρχει ένα σημείο στη λειτουργία ενός ΦΒ στοιχείου στο οποίο η αποδιδόμενη ισχύς Ρ μεγιστοποιείται. Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς συμβολίζεται με P_m και αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης V_m και έντασης I_m (Σχήμα 2.6). Είναι πολύ σημαντικό η λειτουργία ενός ΦΒ συστήματος να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο **σημείο μέγιστης ισχύος** *P_m*, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοσή του.



Σχήμα 2.6: Καμπύλες Ι-V και Ρ-V ενός ΦΒ στοιχείου πυριτίου.

Οι καμπύλες *I-V* και *P-V* ενός ΦΒ πλαισίου έχουν αντίστοιχη μορφή με αυτές που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 2.6 και αφορούν τα ΦΒ στοιχεία. Κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, η μορφή των καμπυλών αυτών επηρεάζεται. Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζεται η εξάρτηση της καμπύλης *I-V* ενός ΦΒ πλαισίου από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας *G* και τη θερμοκρασία *T*. Η ένταση βραχυκύκλωσης *I*_{sc} είναι σχεδόν ανάλογη της πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας *G*, ενώ και η τάση ανοιχτοκύκλωσης *V*_{oc} επηρεάζεται αυξητικά, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό. Από την άλλη πλευρά, αύξηση της θερμοκρασίας *T* μειώνει την τάση ανοιχτοκύκλωσης *I*_{sc} που παρατηρείται με την αύξηση της θερμοκρασίας *T* είναι πολύ μικρότερης τάξης μεγέθους.



Σχήμα 2.7: Εξάρτηση της καμπύλης Ι-V ενός ΦΒ πλαισίου από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία.

Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζονται οι καμπύλες *I-V* ενός ΦΒ πλαισίου για διαφορετικές πυκνότητες ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας *G*, καθώς επίσης και τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας (ΣΛ) του ΦΒ πλαισίου, που τροφοδοτεί μια σταθερή ωμική αντίσταση. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η τάση V_m που αντιστοιχεί στα σημεία μέγιστης ισχύος δεν επηρεάζεται σημαντικά από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας *G*. Αντίθετα, για δεδομένο ωμικό φόρτιο και για διαφορετικές τιμές της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας *G*. Αντίθετα, για δεδομένο ωμικό φόρτιο και για διαφορετικές τιμές της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας *G*. Ματίσεια, για δεδομένο ωμικό φόρτιο και για διαφορετικές τιμές σημαντικά σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της V_m . Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, τα ΦΒ συστήματα συνεργάζονται με μια διάταξη που ονομάζεται **ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος** υπό οποιεσδήποτε συνθήκες.



Σχήμα 2.8: Εξάρτηση της καμπύλης *I-V* ενός ΦΒ πλαισίου από την ηλιακή ακτινοβολία και το σημείο λειτουργίας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις τα ΦΒ πλαίσια είναι μόνιμα στερεωμένα σε μια βάση που δεν μετακινείται. Παρόλα αυτά, τα ΦΒ στοιχεία βελτιστοποιούν την απόδοσή τους όταν οι ηλιακές ακτίνες είναι κάθετες σε αυτά. Για το λόγο αυτό, τα ΦΒ πλαίσια μπορούν να συνδυαστούν με συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου. Οι συσκευές αυτές μετακινούν το ΦΒ πλαίσιο σε μια προκαθορισμένη τροχιά έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, και επομένως η ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται. Τα συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του συλλέγεται. Τα συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του συλλέγεται. Τα συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του συλλέγεται.

- Συστήματα παρακολούθησης οριζόντιου άξονα. Στα συστήματα αυτά, τα ΦΒ πλαίσια παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου περιστρεφόμενα γύρω από έναν άξονα, ο οποίος είναι οριζόντιος και έχει συνήθως τη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης.
- Συστήματα παρακολούθησης κατακόρυφου άζονα. Σε αυτά τα συστήματα, τα ΦΒ πλαίσια έχουν σταθερή κλίση και περιστρέφονται γύρω από ένα κατακόρυφο άξονα.
- Συστήματα παρακολούθησης δύο αξόνων. Σε αυτή την κατηγορία συστημάτων, η επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου τοποθετείται συνεχώς κάθετα στις ακτίνες του ήλιου, περιστρέφοντας το ΦΒ πλαίσιο γύρω από δύο άξονες.

Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζονται σχηματικά οι τρεις τύποι συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου. Τα συστήματα αυτά αυξάνουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία, αλλά παράλληλα αυξάνουν το κόστος και τη διαδικασία συντήρησης. Για το λόγο αυτό, η εγκατάστασή τους δεν είναι πάντοτε συμφέρουσα, και πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 2.9: Λειτουργία συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου.

Η ισχύς εξόδου μιας ΦΒ συστοιχίας P_{PV} (kW) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση [2.15]:

$$P_{PV} = f_{PV} \cdot P_{STC} \cdot \frac{G_T}{G_{STC}} \cdot \left(1 + (T_c - T_{STC}) \cdot C_T\right)$$
(2.13)

όπου f_{PV} είναι ο συνολικός συντελεστής απωλειών της ΦΒ συστοιχίας, P_{STC} είναι η ονομαστική ισχύς της ΦΒ συστοιχίας (σε kW_p) κάτω από ΠΣΔ, G_T είναι η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας (σε kW/m²), G_{STC} είναι η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κάτω από ΠΣΔ (1 kW/m²), T_c είναι η θερμοκρασία σε °C των ΦΒ στοιχείων, T_{STC} η θερμοκρασία κάτω από ΠΣΔ (25°C), και C_T είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής των ΦΒ στοιχείων (/°C), ο οποίος δείχνει τον τρόπο που μεταβάλλεται η απόδοση του ΦΒ στοιχείου σε σχέση με τη θερμοκρασία λειτουργίας του. Στους περισσότερους τύπους ΦΒ στοιχείων παρατηρείται μείωση της απόδοσής τους όταν η θερμοκρασία τους αυξάνεται. Στον Πίνακα 2.1 [2.16] δίνονται τυπικές τιμές του C_T για τους τρεις πιο συνήθεις τύπους ΦΒ πλαισίων: μονοκρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου και άμορφου πυριτίου. Ο συνολικός συντελεστής απωλειών f_{PV} προσμετρά τις διαφοροποιήσεις ανάμεσα στην ονομαστική επίδοση και την πραγματική επίδοση ενός ΦΒ πλαισίου, και λαμβάνει υπόψη απώλειες όπως η κάλυψη του πλαισίου από σκόνη και η ηλικία του πλαισίου. Τυπικές τιμές συντελεστών απωλειών για το ΦΒ πλαισίου. Τυπικές τιμές συντελεστών απωλειών για το ΦΒ πλαισίου σπό σκόνη και η ηλικία του πλαισίου από σκόνη, 0.90 λόγω γήρανσης και 0.99 λόγω λοιπών απωλειών [2.17], επομένως η τιμή του f_{PV} που θεωρείται στην παρούσα διατριβή λαμβάνεται ίση με 0.80, που είναι ίση με το γινόμενο των τριών παραπάνω συντελεστών. Η θερμοκρασία T_c μπορεί να υπολογιστεί από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα T_a (σε °C) και την πυκνότητα ισχύος της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας G (σε kW/m²) χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση [2.18]:

$$T_c = T_a + \frac{(NOCT - 20)}{0.8} \cdot G$$
 (2.14)

όπου NOCT είναι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου. Η NOCT αποτελεί τη συμβατική θερμοκρασία λειτουργίας ενός ΦΒ στοιχείου σε συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης, υπό πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 0.8 kW/m², θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα 20°C και ταχύτητα ανέμου 1 m/s. Τυπική τιμή της NOCT είναι οι 48°C.

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές του θερμοκρασιακού συντελεστή C _T για τους τρεις πιο συνήθεις τύπ	ιους ΦΒ
πλαισίων.	

Τύπος ΦΒ πλαισίου	Θερμοκρασιακός συντελεστής C_T (/°C)
Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο	-0.004
Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	-0.004
Άμορφο πυρίτιο	-0.0011

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ο συνολικός συντελεστής απωλειών f_{PV} δεν ταυτίζεται με το συντελεστή απόδοσης του ΦΒ πλαισίου. Η ακολουθούμενη μεθοδολογία υπολογισμού της ισχύος εξόδου P_{PV} μιας ΦΒ συστοιχίας λαμβάνει υπόψη την ονομαστική ισχύ του ΦΒ πλαισίου κάτω από ΠΣΔ και όχι την επιφάνεια που αυτό καταλαμβάνει. Δύο ΦΒ πλαίσια που καταλαμβάνουν την ίδια επιφάνεια και έχουν διαφορετικούς συντελεστές απόδοσης θα έχουν και διαφορετική ονομαστική ισχύ, επομένως δεν είναι απαραίτητη η γνώση του συντελεστή απόδοσης του ΦΒ πλαισίου. Ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο που χρειάζεται να τονιστεί είναι ότι οι ΦΒ συστοιχίες που μοντελοποιούνται στην παρούσα διατριβή περιλαμβάνουν ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος. Η ύπαρξη της διάταξης αυτής αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για να δώσει η εξίσωση (2.13) ακριβή αποτελέσματα.

Στην εξίσωση (2.13), η μόνη παράμετρος που μεταβάλλεται σε ωριαία βάση είναι η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας, G_T . Ο υπολογισμός της G_T βασίζεται στις μετρήσεις της πυκνότητας ισχύος της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας G που έχουν ληφθεί σε μια περιοχή, λαμβάνοντας όμως υπόψη και το γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η G_T δεν είναι ίση με την G, καθώς το επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας δεν ταυτίζεται συνήθως με το οριζόντιο επίπεδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της G_T με μια πολύπλοκη μεθοδολογία που λαμβάνει υπόψη:

 Την τρισδιάστατη γεωμετρία που περιγράφει την κίνηση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας και λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό της ΦΒ συστοιχίας.

- Την μεταβαλλόμενη ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ανώτατο σημείο της γήινης ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια του χρόνου.
- 3. Τον τρόπο μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της γήινης ατμόσφαιρας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά βήματα υπολογισμού της G_T. Περισσότερες λεπτομέρειες υπάρχουν στην [2.19].

Κατά το πρώτο μέρος των υπολογισμών της G_T , η περιγραφή του προσανατολισμού της ΦΒ συστοιχίας χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους, την κλίση β της ΦΒ συστοιχίας σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο, και τη γωνία αζιμουθίου γ που περιγράφει την κατεύθυνση προς την οποία είναι στραμμένη η ΦΒ συστοιχία. Για τοποθεσίες του βόρειου ημισφαιρίου, όπως η Ελλάδα, μηδενική τιμή του γ αντιστοιχεί σε νότια κατεύθυνση, θετικές τιμές του γ αναφέρονται σε δυτικούς προσανατολισμούς, και αρνητικές τιμές του γ σε ανατολικούς προσανατολισμούς. Οι άλλοι παράγοντες που χρειάζονται για την περιγραφή της ηλιακής γεωμετρίας είναι το γεωγραφικό πλάτος φ της τοποθεσίας της ΦΒ συστοιχίας, η **ημέρα του έτους** n_d , και η ώρα της ημέρας. Η ημέρα του έτους n_d επιδρά στην **ηλιακή απόκλιση** δ , που δίνει το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο οι ακτίνες του ήλιου είναι κάθετες στην επιφάνεια της γης κατά το ηλιακό μεσημέρι. Η ηλιακή απόκλιση υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n_d)}{365}\right). \tag{2.15}$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η ημέρα του έτους n_d λαμβάνει ακέραιες τιμές μεταξύ του 1 (1^η Ιανουαρίου) και του 365 (31^η Δεκεμβρίου). Στους υπολογισμούς που υπεισέρχεται η ώρα της ημέρας, χρειάζεται πρώτα να γίνει μετατροπή της **ωρολογιακής ώρας** t_c σε **ηλιακή ώρα** t_s σύμφωνα με την εξίσωση:

$$t_{s} = t_{c} + \left(\frac{L_{loc} - L_{st}}{15^{\circ}/h}\right) + E_{s}$$
(2.16)

όπου L_{loc} είναι το γεωγραφικό μήκος της τοποθεσίας εγκατάστασης, L_{st} είναι το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού που ορίζει τη ζώνη ώρας της τοποθεσίας, και E_s η διαφορά σε ώρες μεταξύ μιας ημέρας 24 ωρών και μιας ηλιακής ημέρας. Τα παραπάνω γεωγραφικά μήκη εκφράζονται σε μοίρες ανατολικά του μεσημβρινού του Greenwich. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στην εξίσωση (2.16) η τιμή της t_c που λαμβάνεται αναφέρεται στο ενδιάμεσο σημείο του χρονικού βήματος ανάλυσης που έχει θεωρηθεί. Για παράδειγμα, εάν το χρονικό διάστημα μελέτης είναι από τις 12:00 έως τις 12:30 το μεσημέρι (χρονικό βήμα 30 λεπτών), η τιμή του t_c που λαμβάνεται είναι η 12.25, που αντιστοιχεί σε ώρα 12:15. Η παράμετρος E_s υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_s = 3.82 \cdot \begin{pmatrix} 0.000075 + 0.001868 \cdot \cos B - 0.032077 \cdot \sin B \\ -0.014615 \cdot \cos 2B - 0.04089 \cdot \sin 2B \end{pmatrix}.$$
 (2.17)

Η τιμή της παραμέτρου B (σε μοίρες), που είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της E_s , δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$B = \frac{360 \cdot (n_d - 1)}{365} \,. \tag{2.18}$$

Η ηλιακή ώρα σχετίζεται με τη θέση του ήλιου στον ουρανό, η οποία περιγράφεται από τη γωνία ώρας ω. Η γωνία ώρας έχει τιμή μηδέν στο ηλιακό μεσημέρι, αρνητική τιμή πριν το ηλιακό

μεσημέρι και θετική τιμή μετά το ηλιακό μεσημέρι. Υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση, η οποία βασίζεται στο γεγονός ότι ο ήλιος μετακινείται στον ουρανό κατά 15° σε μία ώρα:

$$\omega = (t_s - 12) \cdot 15^{\circ} / h \,. \tag{2.19}$$

Η γωνία πρόσπτωσης θ μιας ΦΒ συστοιχίας ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της καθέτου στη ΦΒ συστοιχία. Εάν είναι γνωστή η κλίση β και η γωνία αζιμουθίου γ μιας ΦΒ συστοιχίας που βρίσκεται σε τοποθεσία γεωγραφικού πλάτους φ , η γωνία πρόσπτωσης θ υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta$$

- sin $\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma$
+ cos $\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega$ (2.20)
+ cos $\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega$
+ cos $\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega$

όπου δ είναι η ηλιακή απόκλιση και ω είναι η γωνία ώρας. Επομένως, η εξίσωση (2.20) μπορεί να δώσει την τιμή της θ για οποιαδήποτε ημέρα του έτους και για οποιαδήποτε ώρα της ημέρας. Μια επιπλέον γωνία που θα χρειαστεί σε επόμενους υπολογισμούς είναι η γωνία ζενίθ του ήλιου θ_z , που είναι η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της κατακόρυφης, ή ισοδύναμα η γωνία πρόσπτωσης μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και μιας οριζόντια τοποθετημένης ΦΒ συστοιχίας. Η τιμή της θ_z προκύπτει από την εξίσωση (2.20), θέτοντας την κλίση β της ΦΒ συστοιχίας ίση με 0°:

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\phi \cdot \sin\delta . \tag{2.21}$$

Το δεύτερο μέρος των υπολογισμών της G_T αφορά τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ανώτατο σημείο της γήινης ατμόσφαιρας. Αν και η ποσότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο ήλιος θεωρείται ότι παραμένει χρονικά σταθερή, η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ανώτατο σημείο της γήινης ατμόσφαιρας μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους εξαιτίας της μεταβαλλόμενης απόστασης γης-ήλιου, λόγω της εκκεντρότητας της τροχιάς της γης. Ο υπολογισμός της **εξωγήινης κάθετης ακτινοβολίας** G_{on} (σε kW/m²), που ορίζεται ως η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κάθετη στις ηλιακές ακτίνες, η οποία βρίσκεται στο ανώτατο σημείο της γήινης ατμόσφαιρας, γίνεται με την ακόλουθη σχέση:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n_d}{365}\right) \right)$$
(2.22)

όπου G_{sc} είναι η ηλιακή σταθερά (1.367 kW/m²) και n_d είναι η ημέρα του έτους. Ο υπολογισμός της εξωγήινης οριζόντιας ακτινοβολίας G_o (σε kW/m²), που ορίζεται ως η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια που βρίσκεται στο ανώτατο σημείο της γήινης ατμόσφαιρας, γίνεται με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$G_o = G_{on} \cdot \cos\theta_z = G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n_d}{365}\right)\right) \cdot (\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\phi \cdot \sin\delta)$$
(2.23)

όπου θ_z είναι η γωνία ζενίθ του ήλιου. Η ολοκλήρωση της εξίσωσης (2.23) για μια χρονική περίοδο μεταξύ των γωνιών ώρας ω₁ και ω₂, που ορίζουν την αρχή και το τέλος της χρονικής περιόδου (ω₁<ω₂), χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας ενέργειας της εξωγήινης ηλιακής

ακτινοβολίας I_o σε μία οριζόντια επιφάνεια στο ανώτατο σημείο της ατμόσφαιρας (σε kWh/m²) για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο:

$$I_o = \frac{12}{\pi} \cdot G_{on} \cdot \left[\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{\pi \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{180} \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta \right].$$
(2.24)

Το τρίτο μέρος των υπολογισμών της G_T αφορά τον τρόπο μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της γήινης ατμόσφαιρας. Θεωρώντας ότι οι μετρήσεις της πυκνότητας ισχύος της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας G γίνονται ανά σταθερά χρονικά διαστήματα διάρκειας Δt (σε h), και ότι η τιμή της G παραμένει σταθερή εντός του κάθε χρονικού διαστήματος, η πυκνότητα ενέργειας της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας I (σε kWh/m²) δίνεται από τη σχέση:

$$I = G \cdot \Delta t \,. \tag{2.25}$$

Η εξίσωση (2.24) αναφέρεται στην εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία, ενώ οι μετρήσεις της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας *Ι* λαμβάνονται στην επιφάνεια της γης. Απαιτείται λοιπόν ο υπολογισμός ενός δείκτη που προσδιορίζει το ποσό της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά διαπερνά την ατμόσφαιρα και φτάνει στην επιφάνεια της γης. Αυτός ο δείκτης ονομάζεται δείκτης αιθριότητας k_T, και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$k_T = \frac{I}{I_o} \,. \tag{2.26}$$

Η ποσότητα της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας I που φτάνει στην επιφάνεια της γης μπορεί να διαιρεθεί σε δύο συνιστώσες: την **άμεση ακτινοβολία** I_b (σε kWh/m²) και τη **διάχυτη ακτινοβολία** I_d (σε kWh/m²). Η άμεση ακτινοβολία είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης χωρίς σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Η διάχυτη ακτινοβολία είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης με αλλαγμένη διεύθυνση, αφού έχει υποστεί σκέδαση στην ατμόσφαιρα και ανάκλαση από το έδαφος. Επομένως, η διάχυτη ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια της γης με τυχαίες διευθύνσεις από όλο τον ουράνιο θόλο. Το άθροισμα της I_b και I_d μας δίνει την ολική ακτινοβολία I:

$$I = I_b + I_d \,. \tag{2.27}$$

Η διάκριση μεταξύ άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας είναι σημαντική κατά τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια ΦΒ συστοιχία, καθώς ο προσανατολισμός της συστοιχίας επηρεάζεται με διαφορετικό τρόπο από την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία. Η ανάλυση της ολικής ακτινοβολίας σε άμεση και διάχυτη πραγματοποιείται μέσω της συσχέτισης του Erbs [2.20], που προσδιορίζει τη διάχυτη ακτινοβολία I_d ως συνάρτηση του δείκτη αιθριότητας k_T :

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases}
1 - 0.09 \cdot k_T & \gamma \iota \alpha \ k_T \le 0.22 \\
0.9511 - 0.1604 \cdot k_T + 4.388 \cdot k_T^2 - 16.638 \cdot k_T^3 + 12.336 \cdot k_T^4 & \gamma \iota \alpha \ 0.22 < k_T \le 0.80 \\
0.165 & \gamma \iota \alpha \ k_T > 0.80
\end{cases} .$$
(2.28)

Μετά τον προσδιορισμό της διάχυτης ακτινοβολίας είναι εφικτός ο υπολογισμός της άμεσης ακτινοβολίας με χρήση της εξίσωσης (2.27). Για τον υπολογισμό της πυκνότητας ενέργειας της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας *I_T* (σε kWh/m²) που προσπίπτει στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, αντίστοιχο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας I_o και της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας I, χρησιμοποιείται το μοντέλο HKDR [2.21]. Το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι η διάχυτη ακτινοβολία αποτελείται από τρεις συνιστώσες: μια ισότροπη συνιστώσα που προέρχεται από όλα τα μέρη του ουράνιου θόλου, μια συνιστώσα που προέρχεται από την κατεύθυνση του ήλιου, και μια συνιστώσα που λαμβάνει υπόψη την επιπλέον ποσότητα διάχυτης ακτινοβολίας που προέρχεται από τον ορίζοντα. Ο προσδιορισμός της πρώτης συνιστώσας γίνεται με τη βοήθεια του δείκτη R_b , ο οποίος δίνει το λόγο της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια προς την άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια:

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}.$$
(2.29)

Η δεύτερη συνιστώσα του μοντέλου HKDR περιγράφεται από το δείκτη ανισοτροπίας A_i, που είναι ένα μέτρο της ατμοσφαιρικής μετάδοσης της άμεσης ακτινοβολίας:

$$A_i = \frac{I_b}{I_o} \,. \tag{2.30}$$

Η τρίτη συνιστώσα του μοντέλου HKDR περιγράφεται από τον παράγοντα f, και βασίζεται στο γεγονός ότι περισσότερη ποσότητα διάχυτης ακτινοβολίας προέρχεται από τον ορίζοντα παρά από το υπόλοιπο μέρος του ουράνιου θόλου. Η τιμή του παράγοντα f δίνεται από τη σχέση:

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} . \tag{2.31}$$

Η τελική εξίσωση του μοντέλου ΗΚDR είναι η ακόλουθη:

$$I_{T} = (I_{b} + I_{d} \cdot A_{i}) \cdot R_{b} + I_{d} \cdot (1 - A_{i}) \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) \cdot \left[1 + f \cdot \sin^{3}\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] + I \cdot \rho_{g} \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$
(2.32)

όπου ρ_g είναι η διάχυτη ανακλαστικότητα του εδάφους ή albedo. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται τιμές της ρ_g για διάφορα είδη επιφανειών. Στην παρούσα διατριβή λαμβάνεται η τιμή $\rho_g = 0.20$.

Πίνακας 2.2: Τιμές albedo για διάφορες κατηγορίες επιφανειών.

Είδος επιφάνειας	Albedo ρ_g
Επιφάνεια νερού, θάλασσα	0.05
Ασφαλτόστρωμα	0.07
Αγρός σκοτεινόχρωμος	0.08
Αγρός πράσινος	0.15
Βραχώδης επιφάνεια	0.20
Επιφάνεια τσιμέντου	0.24 - 0.30
Χιόνι	0.60

Η τιμή της I_T που προκύπτει και αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα διάρκειας Δt (σε h), χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας G_T που προσπίπτει στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας:

$$G_T = \frac{I_T}{\Delta t}.$$
(2.33)

Η ανάλυση που προηγήθηκε αφορά ΦΒ συστοιχίες μόνιμα στερεωμένες σε βάση που δεν μετακινείται, στις οποίες η κλίση β και η γωνία αζιμουθίου γ παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια του έτους. Ένας πρακτικός κανόνας σχετικά με τη χωροθέτηση ΦΒ συστοιχιών αυτού του τύπου, έτσι ώστε η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να είναι μέγιστη, προτείνει την υιοθέτηση κλίσης ίσης με το γεωγραφικό πλάτος φ της τοποθεσίας της ΦΒ συστοιχίας και γωνίας αζιμουθίου ίσης με το μηδέν.

Στην περίπτωση που η ΦΒ συστοιχία συνδυάζεται με σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου, χρειάζεται η τροποποίηση ορισμένων ενδιάμεσων εξισώσεων υπολογισμού της G_T. Εφόσον το χρησιμοποιούμενο σύστημα παρακολούθησης είναι οριζόντιου άξονα με διεύθυνση Ανατολή-Δύση, η κλίση β της ΦΒ συστοιχίας δίνεται από τη σχέση:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\tan \theta_z \cdot |\cos \gamma_s| \right) \tag{2.34}$$

όπου θ_z είναι η γωνία ζενίθ του ήλιου και γ_s είναι η γωνία αζιμουθίου του ήλιου. Η γ_s είναι η γωνία (σε μοίρες) που σχηματίζει η προβολή των ηλιακών ακτίνων στο οριζόντιο επίπεδο με τη κατεύθυνση του νότου. Θετικές τιμές του γ_s αναφέρονται σε θέσεις του ήλιου δυτικά της νότιας κατεύθυνσης, και αρνητικές τιμές του γ_s αναφέρονται σε θέσεις του ήλιου ανατολικά της νότιας κατεύθυνσης. Η γωνία αζιμουθίου του ήλιου του ήλιου γ_s υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\gamma_s = \operatorname{sign}(\omega) \cdot \left| \cos^{-1} \cdot \left(\frac{\cos \theta_z \cdot \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cdot \cos \phi} \right) \right|$$
(2.35)

όπου sign(ω) είναι η συνάρτηση προσήμου της γωνίας ώρας ω , που λαμβάνει τιμή +1 εάν $\omega > 0$, τιμή -1 εάν $\omega < 0$, και τιμή 0 εάν $\omega = 0$. Η τιμή της γωνίας αζιμουθίου γ της ΦΒ συστοιχίας θα λαμβάνει τις τιμές 0° ή 180°, ανάλογα με την τιμή της γωνίας αζιμουθίου του ήλιου γ_s :

$$\gamma = \begin{cases} 0^{\circ} & \epsilon \dot{\alpha} v \ |\gamma_s| < 90^{\circ} \\ 180^{\circ} & \epsilon \dot{\alpha} v \ |\gamma_s| \ge 90^{\circ}. \end{cases}$$
(2.36)

Εάν το σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου είναι κατακόρυφου άξονα, η κλίση β της ΦΒ συστοιχίας διατηρείται σταθερή (συνήθως ίση με το γεωγραφικό πλάτος φ της τοποθεσίας), ενώ η γωνία αζιμουθίου γ της ΦΒ συστοιχίας είναι ίση με τη γωνία αζιμουθίου του ήλιου γ_s :

$$\gamma = \gamma_s. \tag{2.37}$$

Όταν χρησιμοποιείται σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου δύο αξόνων, η γωνία πρόσπτωσης θ ελαχιστοποιείται σε κάθε χρονικό διάστημα, οπότε:

$$\beta = \theta_z \tag{2.38}$$

$$\gamma = \gamma_s \tag{2.39}$$

2.2.3 Μικρά υδροηλεκτρικά έργα

Τα υδροηλεκτρικά έργα (YHE) αξιοποιούν την υδραυλική ενέργεια, με τη μετατροπή της αρχικά σε μηχανική ενέργεια μέσω ενός μηχανισμού που ονομάζεται υδροστρόβιλος, και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτρικής γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος που είναι συνδεδεμένη με τον υδροστρόβιλο. Τα YHE χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα **μικρά YHE** και τα **μεγάλα YHE**. Οι διαφορές μεταξύ μικρών και μεγάλων YHE δεν είναι μόνο ποσοτικές, αλλά κυρίως ποιοτικές. Ένα YHE χαρακτηρίζεται ως μικρό όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μικρότερη των 10 MW, χωρίς η τιμή αυτή να αποτελεί ένα γενικά αποδεκτό όριο. Οι σημαντικότερες ποιοτικές διαφορές μεταξύ των μικρών YHE σε σχέση με τα μεγάλα YHE είναι η εγκατάσταση τυποποιημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού στα μικρά YHE, το διαφορετικό πρόγραμμα εκμετάλλευσης (τα μεγάλα YHE χρησιμοποιούνται κυρίως για κάλυψη των αιχμών φορτίου σε διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά δίκτυα), και οι σημαντικά μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που τα μικρά YHE επιφέρουν κατά την κατασκευή και τη λειτουργία τους [2.22].

Τα μικρά ΥΗΕ τροφοδοτούνται κυρίως από ποταμούς και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως φυσικής παροχής και ρυθμιζόμενης παροχής. Στα μικρά ΥΗΕ φυσικής παροχής δεν υπάρχει αποθήκευση νερού και η παραγόμενη ισχύς είναι ανάλογη της παροχής του νερού που διέρχεται από τον αγωγό προσαγωγής και οδηγείται στον υδροστρόβιλο. Στα μικρά ΥΗΕ ρυθμιζόμενης παροχής το νερό μπορεί να αποθηκευτεί σε μία ή περισσότερες δεξαμενές, έχοντας ως αποτέλεσμα την καλύτερη διαχείριση της παραγόμενης ισχύος. Για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους, τα περισσότερα μικρά ΥΗΕ είναι είτε φυσικής παροχής, είτε αποθηκεύουν μικρούς όγκους νερού σε τεχνητές δεξαμενές ή φυσικές λίμνες. Η μοντελοποίηση που παρουσιάζεται στη συνέχεια αναφέρεται σε μικρά ΥΗΕ φυσικής παροχής.

Η ισχύς εξόδου *P_{hydro}* (σε kW) ενός μικρού ΥΗΕ εξαρτάται από την παροχή νερού και το ύψος υδατόπτωσης σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [2.23]:

$$P_{hydro} = n_{hydro} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H_{net} \cdot Q_{hydro}$$
(2.40)

όπου n_{hydro} είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης του μικρού ΥΗΕ, ρ_w είναι η πυκνότητα του νερού (1 kg/L), g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s²), H_{net} είναι το καθαρό ύψος υδατόπτωσης (σε m), και Q_{hydro} είναι η παροχή νερού που διέρχεται από τον υδροστρόβιλο (σε m³/s). Ο συνολικός βαθμός απόδοσης n_{hydro} προκύπτει σαν γινόμενο του υδραυλικού βαθμού απόδοσης n_h , του μηχανικού βαθμού απόδοσης n_m , του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης n_{el} , και του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης n_y :

$$n_{hydro} = n_h \cdot n_m \cdot n_{el} \cdot n_V \,. \tag{2.41}$$

Τυπικές τιμές των παραπάνω βαθμών απόδοσης είναι οι ακόλουθες: $n_h = 87\%$, $n_m = 98\%$, $n_{el} = 98.5\%$, $n_V = 99\%$ [2.23]. Το καθαρό ύψος υδατόπτωσης H_{net} δίνεται από τη σχέση:

$$H_{net} = H_g - \delta H_f \tag{2.42}$$

όπου H_g είναι το γεωδαιτικό ύψος υδατόπτωσης (σε m), και δ H_f είναι οι απώλειες τριβής του αγωγού προσαγωγής (σε m), οι οποίες εξαρτώνται από την παροχή Q_{hydro} , τις διαστάσεις και το υλικό του αγωγού προσαγωγής. Οι απώλειες δ H_f μπορούν να φτάσουν έως και το 20% του ύψους H_g , για μικρά ΥΗΕ που παρουσιάζουν μεγάλο ύψος υδατόπτωσης. Η παροχή νερού που διέρχεται από τον υδροστρόβιλο Q_{hydro} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{hydro} = \begin{cases} \min(Q_s - Q_r, w_{max} \cdot Q_{nom}) & \epsilon \acute{av} \quad Q_s - Q_r \ge w_{min} \cdot Q_{nom} \\ 0 & \epsilon \acute{av} \quad Q_s - Q_r < w_{min} \cdot Q_{nom} \end{cases}$$
(2.43)

όπου Q_s είναι η παροχή του ποταμού (σε m³/s), Q_r είναι η απομένουσα παροχή του ποταμού που αφήνεται ανεκμετάλλευτη για περιβαλλοντικούς λόγους (σε m³/s), Q_{nom} είναι η ονομαστική παροχή του υδροστροβίλου (σε m³/s), w_{min} είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη παροχή του υδροστροβίλου εκφρασμένη ως ποσοστό της Q_{nom} , και w_{max} είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη παροχή του υδροστροβίλου εκφρασμένη ως ποσοστό της Q_{nom} . Δεδομένα για την παροχή του ποταμού Q_s προσφέρονται από μετρήσεις ανά σταθερά χρονικά διαστήματα, ενώ η τιμή της παροχή για την θεωρείται σταθερή σε όλη τη διάρκεια του έτους. Η ονομαστική παροχή Q_{nom} είναι η παροχή για την οποία έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί ο υδροστρόβιλος. Τυπικές τιμές για τις w_{min} και w_{max} σε ένα ΜΑΣΗΕ είναι οι $w_{min} = 35\%$ και $w_{max} = 115\%$ [2.22].

2.3 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Μια γεννήτρια είναι μια συσκευή που καταναλώνει καύσιμο για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις συμπαράγει και θερμική ενέργεια. Στις γεννήτριες παρουσιάζεται το χαρακτηριστικό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τη ζήτηση, καθώς και εκείνο της γρήγορης απόκρισής τους στη συνεχώς μεταβαλλόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζεται στα ΜΑΣΗΕ. Επιπλέον, όταν οι γεννήτριες συνδυάζονται με μονάδες μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής (π.χ., ΑΓ ή ΦΒ), μπορούν να προσφέρουν εφεδρική ενέργεια στις περιόδους όπου η παραγωγή ενέργειας των τεχνολογιών ΑΠΕ δεν επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης. Στις γεννήτριες συμπεριλαμβάνονται οι μηχανές εσωτερικής καύσης, οι κυψέλες καυσίμου, και οι μικρογεννήτριες. Η ποικιλία καυσίμων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι μεγάλη, και περιλαμβάνει το πετρέλαιο (ντήζελ), τη βενζίνη, το φυσικό αέριο, το υδρογόνο, τη μεθανόλη, την αιθανόλη, το προπάνιο, το βιοντήζελ, και το βιοαέριο.

Η πιο συνηθισμένη πηγή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε ΜΑΣΗΕ στις μέρες μας είναι η ντηζελογεννήτρια, που αποτελείται από μια ηλεκτρική γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος, που καθοδηγείται από μια παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης που ακολουθεί τον κύκλο του Diesel. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι συνήθως το πετρέλαιο, και τα μεγέθη των ντηζελογεννητριών ποικίλουν ανάμεσα σε λίγα kW και το 1 MW. Για πολύ μικρά μεγέθη ντηζελογεννητριών ποικίλουν ατόμεσα σε λίγα kW και το 1 MW. Για πολύ μικρά μεγέθη των υτηζελογεννητριών ποικίλουν ανάμεσα σε λίγα kW και το 1 MW. Για πολύ μικρά μεγέθη ταν ντηζελογεννητριών και τη βενζίνη ή το προπάνιο. Οι μικρογεννήτριες έχουν γίνει εμπορικά διαθέσιμες τα τελευταία χρόνια και τα μεγέθη τους κυμαίνονται ανάμεσα στα 25 kW και τα 250 kW [2.2]. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια εντελώς διαφορετική τεχνολογία που μετατρέπει απευθείας τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική, και αναμένεται να χρησιμοποιηθούν ευρέως τα επόμενα χρόνια.

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που μοντελοποιούνται σε μια γεννήτρια είναι η μέγιστη και ελάχιστη παραγόμενη ισχύς, ο τύπος καυσίμου που χρησιμοποιείται και η καμπύλη κατανάλωσης, που σχετίζει την ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Η κατανάλωση καυσίμου μιας γεννήτριας απαρτίζεται από δύο συνιστώσες: την πάγια κατανάλωση καυσίμου F_{genfix} που καταναλώνεται σε συνθήκες μηδενικού φορτίου, και την οριακή κατανάλωση $F_{genmarg}$ που εξαρτάται από την παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας. Στη συνέχεια παρατίθενται αναλυτικότερα στοιχεία για τη μοντελοποίηση των ντηζελογεννητριών και των κυψελών καυσίμου.

2.3.1 Ντηζελογεννήτριες

Για τη μοντελοποίηση των ντηζελογεννητριών χρησιμοποιείται συνήθως η θεώρηση ότι η κατανάλωση καυσίμου (πετρελαίου) είναι γραμμική συνάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Επιπλέον, για να αποφευχθεί η πρόωρη φθορά του κινητήρα, η ελάχιστη παραγόμενη ισχύς μιας ντηζελογεννήτριας P_{dslmin} τίθεται συνήθως ίση με το 30% της μέγιστης (ονομαστικής) ισχύος P_{dslmax} [2.2]. Η κατανάλωση καυσίμου μιας ντηζελογεννήτριας F_{dsl} (σε L/h) δίνεται από την εξίσωση [2.24]:

$$F_{dsl} = 0.08415 \cdot P_{dslmax} + 0.246 \cdot P_{dsl} \qquad \text{yia} \quad P_{dslmin} \le P_{dsl} \le P_{dslmax} \tag{2.44}$$

όπου P_{dsl} είναι η ισχύς της ντηζελογεννήτριας (σε kW). Στην παραπάνω σχέση ο πρώτος όρος του αθροίσματος αντιπροσωπεύει την πάγια κατανάλωση καυσίμου, και ο δεύτερος την οριακή κατανάλωση καυσίμου. Στο Σχήμα 2.10 αναπαριστάνεται γραφικά η καμπύλη κατανάλωσης μιας ντηζελογεννήτριας.



Σχήμα 2.10: Καμπύλη κατανάλωσης μιας ντηζελογεννήτριας με καύσιμο ντήζελ.

Στην περίπτωση που το καύσιμο της ντηζελογεννήτριας είναι το βιοντήζελ, το οποίο παράγεται από φυτικά έλαια, η κατανάλωση καυσίμου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη [2.25]. Στην παρούσα διατριβή γίνεται η θεώρηση ότι η κατανάλωση βιοντήζελ F_{bio} (σε L/h) είναι 10% μεγαλύτερη σε σχέση με την κατανάλωση πετρελαίου F_{dsl} :

$$F_{bio} = 1.1 \cdot F_{dsl} = 0.092565 \cdot P_{dslmax} + 0.2706 \cdot P_{dsl} \qquad \gamma \iota \alpha \quad P_{dslmin} \le P_{dsl} \le P_{dslmax} \,. \tag{2.45}$$

2.3.2 Κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο, και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Συγκεκριμένα, στη μηχανή εσωτερικής καύσης το καύσιμο καίγεται για να παράγει έργο, απελευθερώνοντας παράλληλα και θερμότητα. Θεωρώντας ως καύσιμο το υδρογόνο, η αντίδραση καύσης είναι η ακόλουθη:

$$\mathrm{H}_{2} + \frac{1}{2}\mathrm{O}_{2} \rightarrow \mathrm{H}_{2}\mathrm{O}$$

Στις κυψέλες καυσίμου, η συνολική αντίδραση που πραγματοποιείται είναι η ίδια. Η διαφορά σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης έγκειται στο γεγονός ότι η αντίδραση αυτή διαχωρίζεται σε δύο ημιαντιδράσεις, που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικό τμήμα της κυψέλης καυσίμου:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$
$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$$

Η κυψέλη καυσίμου απαρτίζεται από τρία βασικά μέρη: την κάθοδο που τροφοδοτείται συνεχώς με οξειδωτικό (π.χ., αέρα), την άνοδο που τροφοδοτείται με καύσιμο, και τον ηλεκτρολύτη που λειτουργεί ως μια ιοντική γέφυρα μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Η κυψέλη καυσίμου παράγει συνεχές ρεύμα. Σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης, πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου και κραδασμών, και χαμηλές έως μηδενικές εκπομπές αερίων ρύπων κατά τη λειτουργία τους. Από την άλλη πλευρά, το κόστος τους παραμένει ακόμα υψηλό, ενώ επιπλέον παρουσιάζουν δύο βασικά τεχνικά προβλήματα [2.26]:

- Η ταχύτητα των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα σε αυτές είναι μικρή, κάτι που οδηγεί σε παραγωγή ρεύματος χαμηλής έντασης και χαμηλής ισχύος.
- 2. Το υδρογόνο δεν είναι ένα εύκολα διαθέσιμο καύσιμο.

Για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων έχουν δοκιμαστεί πολλοί διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου, οι οποίοι διαχωρίζονται κυρίως από τον ηλεκτρολύτη ο οποίος χρησιμοποιείται. Οι βασικές πληροφορίες για τους έξι τύπους κυψελών καυσίμου που έχουν επικρατήσει σήμερα δίνονται στον Πίνακα 2.3.

Τύπος κυψέλης καυσίμου	Κινούμενο ιόν	Θερμοκρασία λειτουογίας (°C)	Εφαρμογές
Αλκαλική (AFC)	OH	50-200	Διαστημικά οχήματα
Πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης (PEMFC)	H^{+}	30-100	Οχήματα, κινητές εφαρμογές, παραγωγή ηλεκτρισμού και συμπαραγωγή χαμηλής ισχύος
Απευθείας μετατροπής της μεθανόλης (DMFC)	H^{+}	20-90	Φορητά ηλεκτρονικά συστήματα χαμηλής ισχύος
Φωσφορικού οξέος (PAFC)	H^{+}	220	Παραγωγή ηλεκτρισμού και συμπαραγωγή της τάξης των 200 kW
Τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)	CO ₃ ⁻²	650	Μεσαίας και μεγάλης κλίμακας συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού και συμπαραγωγής (έως την τάξη του MW)
Στερεού οξειδίου (SOFC)	O ⁻²	500-1000	Όλα τα μεγέθη συστημάτων παραγωγής ηλεκτρισμού και συμπαραγωγής (από 2 kW έως πολλά MW)

Πίνακας 2.3: Δεδομένα για διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου.

Ο πλέον κατάλληλος τύπος κυψελών καυσίμου για εγκατάσταση σε ΜΑΣΗΕ είναι εκείνος της πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης (PEMFC). Ο κύριος λόγος είναι ότι οι απαιτήσεις λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου στα ΜΑΣΗΕ είναι διαφορετικές από ότι στα διασυνδεδεμένα ΣΗΕ, καθώς στα ΜΑΣΗΕ η κυψέλη καυσίμου είναι πιθανό να εργάζεται αρκετά συχνά υπό μεταβαλλόμενο φορτίο, με την επιπλέον απαίτηση για συχνές διακοπές λειτουργίας και επανεκκινήσεις. Τα χαρακτηριστικά των PEMFC τα οποία τις κάνουν ιδιαίτερα κατάλληλες είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος που παρουσιάζουν, η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους που αποτελεί σημαντική προϋπόθεση για τη γρήγορη επανεκκίνησή τους, και το γεγονός ότι ο ηλεκτρολύτης τους είναι σε στερεή μορφή και δεν περιέχει διαβρωτικά υλικά. Επιπλέον, οι PEMFC είναι ήδη μια δοκιμασμένη τεχνολογία, καθώς έχουν εξελιχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό λόγω της χρήσης τους σχήματα.

Το καύσιμο που χρησιμοποιείται στις PEMFC είναι το υδρογόνο (H₂), και η παροχή του σε ένα ΜΑΣΗΕ μπορεί να επιτευχθεί μέσω δύο τεχνολογιών: 1) της ηλεκτρόλυσης νερού και αποθήκευσης του παραγόμενου υδρογόνου, και 2) της αναμόρφωσης υδρογονανθράκων. Η τεχνολογία της ηλεκτρόλυσης νερού εξετάζεται αναλυτικά στην ενότητα των διατάξεων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (ενότητα 2.4.3). Στη δεύτερη τεχνολογία χρησιμοποιείται μια συσκευή που ονομάζεται **αναμορφωτής**, η οποία αναμορφώνει υδρογονάνθρακες και δημιουργεί H₂ και άλλα προϊόντα. Μεγάλη προσοχή χρειάζεται να δοθεί στην απομάκρυνση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των προϊόντων που περιέχουν θείο (S), καθώς ο λευκόχρυσος (Pt) που χρησιμοποιείται ως καταλύτης στις PEMFC παρουσιάζει μεγάλη ευπάθεια ακόμα και σε μικροποσότητες των ενώσεων αυτών. Από τη μεγάλη ποικιλία καυσίμων που μπορούν να αναμορφωθούν (π.χ., πετρέλαιο, φυσικό αέριο, προπάνιο, κλπ), καταλληλότερη λύση για τα ΜΑΣΗΕ αποτελεί η μεθανόλη καθώς βρίσκεται σε υγρή μορφή και επομένως μεταφέρεται εύκολα, δεν περιέχει θείο, και η αναμόρφωσή της λαμβάνει χώρα σε σημαντικά μικρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με άλλους υδρογονάνθρακες, με αποτέλεσμα οι αναμορφωτές μεθανόλης να είναι χαμηλότερου κόστους και να απαιτούν μικρότερη συντήρηση [2.27].

Τα τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου PEMFC απεικονίζονται στο Σχήμα 2.11. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η απόδοση διατηρείται πρακτικά σταθερή σε όλο το εύρος λειτουργίας τους, ενώ ως ρεαλιστική τιμή του βαθμού απόδοσης μιας PEMFC μπορεί να θεωρηθεί το 50%.



Σχήμα 2.11: Τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου PEMFC.

Ο βαθμός απόδοσης μιας κυψέλης καυσίμου n_{FC} με καύσιμο το H₂ δίνεται από τη σχέση:

$$n_{FC} = \frac{3.6 \cdot E_{FC}}{m_{H2} \cdot \text{LHV}_{H2}} \tag{2.46}$$

όπου E_{FC} είναι η παραγωγή ενέργειας της κυψέλης καυσίμου (σε kWh) εντός ενός δεδομένου χρονικού διαστήματος, m_{H2} είναι η απαιτούμενη μάζα (σε kg) του H₂ σε αυτό το χρονικό διάστημα, LHV_{H2} είναι η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του H₂ (120 MJ/kg), ενώ ο παράγοντας 3.6 χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τις kWh σε MJ. Θέτοντας το χρονικό διάστημα ίσο με 1 h και την $E_{FC} = 1$ kWh, η προκύπτουσα m_{H2} είναι 0.06 kg (για $n_{FC} = 50\%$).

Θεωρώντας ότι η αναμόρφωση 1 kg μεθανόλης παράγει 0.14 kg H₂ [2.26], και ότι η πυκνότητα της μεθανόλης $\rho_{CH3OH} = 0.7918$ kg/L στους 25°C, η κατανάλωση μεθανόλης F_{CH3OH} (σε L/h) στην PEMFC θα είναι:

$$F_{CH3OH} = \frac{0.06}{0.14 \cdot 0.7918} \cdot P_{FC} = 0.541 \cdot P_{FC} \qquad \text{yia } 0 \text{ kW} \le P_{FC} \le P_{FCmax}$$
(2.47)

όπου P_{FC} είναι η παραγόμενη ισχύς (σε kW) και P_{FCmax} η μέγιστη παραγόμενη ισχύς (σε kW) της κυψέλης καυσίμου PEMFC. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τη μορφή της εξίσωσης (2.47), στην μοντελοποίηση των κυψελών καυσίμου η πάγια κατανάλωση καυσίμου θεωρείται αμελητέα.

2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.4.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας βελτιώνουν τη λειτουργία ενός ΜΑΣΗΕ σε τρεις κατευθύνσεις:

- Επιτρέπουν τη σταθερή και ευσταθή λειτουργία του ΜΑΣΗΕ, παρά το γεγονός ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μεταβάλλεται σε σημαντικό βαθμό και με γρήγορους ρυθμούς.
- Παρέχουν ενέργεια τις περιόδους που κάποια μονάδα του ΜΑΣΗΕ δεν είναι διαθέσιμη, π.χ., κατά τη διάρκεια της νύχτας για ένα ΦΒ σύστημα, στην περίπτωση που κάποια μονάδα συντηρείται ή επισκευάζεται, κλπ.
- 3. Επιτρέπουν σε μονάδες ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής (π.χ., ΑΓ ή ΦΒ), να προσφέρουν ηλεκτρική ενέργεια ανάλογα με τη ζήτηση, καθώς η ισχύς που αυτές παράγουν σε κάθε χρονική στιγμή μπορεί πλέον να διαφέρει από την ισχύ που διατίθεται στον καταναλωτή.

Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται όλες οι ώριμες και ελπιδοφόρες τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας ενός ΣΗΕ, ταξινομημένες σε σχέση με τη χρονική διάρκεια χρήσης τους, καθώς και σε σχέση με την ισχύ που μπορούν να εξυπηρετήσουν. Η τεχνολογία της αποθήκευσης υδρογόνου δεν περιλαμβάνεται στο Σχήμα 2.12, καθώς πριν την εγκατάστασή της και την επιλογή του μεγέθους της χρειάζεται να έχει προηγηθεί οικονομοτεχνική αποτίμηση, λαμβάνοντας υπόψη και την εγκατεστημένη ισχύ των κυψελών καυσίμου [2.28]. Σε ένα ΜΑΣΗΕ, οι τεχνολογίες αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται ή αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στο άμεσο μέλλον είναι οι συσσωρευτές, η αποθήκευση υδρογόνου, οι σφόνδυλοι και οι υπερπυκνωτές.



Σχήμα 2.12: Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τη χρονική διάρκεια χρήσης και την ισχύ που μπορούν να εξυπηρετήσουν.

2.4.2 Συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές λειτουργούν με συνεχές ρεύμα έχοντας την ίδια αρχή λειτουργίας με τις κυψέλες καυσίμου, με τη διαφορά ότι η κυψέλη καυσίμου είναι μια συσκευή συνεχούς μετατροπής ενέργειας όσο διάστημα τροφοδοτείται με καύσιμο, ενώ ο συσσωρευτής είναι μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας και επομένως περιορισμένης χρήσης. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι συσσωρευτών, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, περιγράφονται στον Πίνακα 2.4.

Τύπος συσσωρευτή	Ειδική ενέργεια	Πυκνότητα	Ειδική ισχύς	Ονομαστική τάση
1 000 y 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	(Wh/kg)	ενέργειας (Wh/L)	(W/kg)	κυψέλης (V)
Μολύβδου-οξέος	30	75	250	2.0
Νικελίου-καδμίου	50	80	150	1.2
Νικελίου-μεταλλικού υδριδίου	65	150	200	1.2
Λιθίου-ιόντος	90	150	300	3.6
Ψευδαργύρου-αέρα	230	270	105	1.65

Πίνακας 2.4: Βασικά χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων τύπων συσσωρευτών.

Από τους τύπους συσσωρευτών του Πίνακα 2.4, οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος παραμένουν η επικρατέστερη λύση για χρήση σε ΜΑΣΗΕ. Αν και οι υπόλοιποι τύποι συσσωρευτών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος σε έναν ή περισσότερους τομείς, το μικρότερο κόστος ανά μονάδα

χωρητικότητας κάνει τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος τη βέλτιστη επιλογή σήμερα [2.28]. Η βασική δομική μονάδα των συσσωρευτών είναι η κυψέλη, η οποία αποτελείται από την κάθοδο (μια πλάκα εμπλουτισμένη με Pb), την άνοδο (μια πλάκα εμπλουτισμένη με PbO₂), και τον ηλεκτρολύτη (διάλυμα H₂SO₄). Η λειτουργία ενός συσσωρευτή μολύβδου-οξέος περιγράφεται από την ακόλουθη αμφίδρομη αντίδραση:

$$PbO_{2} + Pb + 2H_{2}SO_{4} \xrightarrow{\epsilon \kappa \phi \delta \rho \tau \iota \sigma \eta} 2PbSO_{4} + 2H_{2}O.$$

Οι τέσσερις πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επίδοση ενός συσσωρευτή είναι 1) η χωρητικότητα, 2) η απόδοση, 3) ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης, και 4) η διάρκεια ζωής. Η χωρητικότητα C_{bat} μετράται σε Ah και δείχνει το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί στο συσσωρευτή. Επειδή όμως η τάση του συσσωρευτή V_{bat} έχει σχεδόν σταθερή τιμή κατά τη λειτουργία του, είναι πιο χρήσιμο αντί της χωρητικότητας C_{bat} να υπολογίζεται η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί στο συσσωρευτή E_{bat} (σε kWh), σύμφωνα με την εξίσωση [2.29]:

$$E_{bat} = \frac{C_{bat} \cdot V_{bat}}{1000} \,. \tag{2.48}$$

Η απόδοση δίνει το κλάσμα της ενέργειας που αρχικά αποθηκεύεται στο συσσωρευτή και στη συνέχεια μπορεί να ανακτηθεί. Τυπική τιμή απόδοσης για τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος είναι η $n_{bat} = 80\%$ [2.30]. Στην παρούσα διατριβή οι αποδόσεις φόρτισης n_{batc} και εκφόρτισης n_{batd} του συσσωρευτή λαμβάνονται και οι δύο ίσες με την τετραγωνική ρίζα της ολικής απόδοσης n_{bat} :

$$n_{batc} = n_{batd} = \sqrt{n_{bat}} = 89.44\% . \tag{2.49}$$

Οι μέγιστοι ρυθμοί φόρτισης και εκφόρτισης αποτελούν ένα μέτρο του πόσο γρήγορα μπορεί να απορροφήσει και να απελευθερώσει ενέργεια ο συσσωρευτής. Τα ρεύματα φόρτισης I_{batc} (σε A) και εκφόρτισης I_{batd} (σε A) ενός συσσωρευτή εκφράζονται στη μορφή C_{bat}/t_{bat} , όπου C_{bat} είναι η χωρητικότητα (σε Ah) και t_{bat} είναι ο χρόνος φόρτισης ή εκφόρτισης (σε h). Σε ένα συσσωρευτή μολύβδου-οξέος, τα μέγιστα ρεύματα φόρτισης $I_{batcmax}$ και εκφόρτισης $I_{batdmax}$ δεν πρέπει να υπερβαίνουν την τιμή $C_{bat}/5$ [2.31]. Επιπλέον, στη μοντελοποίηση των συσσωρευτών χρειάζεται να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτοί δεν επιτρέπεται να εκφορτιστούν κάτω από μια συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης. Για τους συσσωρευτές μολύβδουοξέος που χρησιμοποιούνται σε ΜΑΣΗΕ, το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης $β_{dismax}$ ορίζεται στο 80% της χωρητικότητάς τους. Ο περιορισμός του μέγιστου βάθους εκφόρτισης μειώνει την αξιοποιήσιμη χωρητικότητα C_{batr} (σε Ah) και την αξιοποιήσιμη ενέργεια E_{batr} (σε kWh) ως εξής:

$$C_{batr} = \beta_{dismax} \cdot C_{bat} = 0.80 \cdot C_{bat} \tag{2.50}$$

$$E_{batr} = \beta_{dismax} \cdot E_{bat} = 0.80 \cdot E_{bat} \,. \tag{2.51}$$

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή λαμβάνονται υπόψη δύο παράμετροι: ο αριθμός κύκλων λειτουργίας και το βάθος εκφόρτισης που αντιστοιχεί σε καθέναν από αυτούς. Κάθε κύκλος λειτουργίας περιλαμβάνει τη διαδοχική διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή. Με καλή προσέγγιση, μπορεί να θεωρηθεί ότι το γινόμενο του βάθους εκφόρτισης β_{dis} και του αριθμού των κύκλων λειτουργίας N_{cycle} παραμένει σταθερό [2.17]:

$$\beta_{dis} \cdot N_{cvcle} = \sigma \tau \alpha \theta \varepsilon \rho \dot{o} . \tag{2.52}$$

Η θεώρηση αυτή ουσιαστικά αντιστοιχεί σε κάθε συσσωρευτή μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας *E*_{batlife} (σε kWh), η οποία μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί πριν ο συσσωρευτής χρειαστεί να αντικατασταθεί.

Δευτερεύοντες παράγοντες που επηρεάζουν την επίδοση ενός συσσωρευτή είναι η θερμοκρασία, η αυτοεκφόρτιση και η γήρανση. Υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 20°C) μειώνουν το χρόνο ζωής του συσσωρευτή, ενώ χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 10°C) μειώνουν την ειδική ενέργεια και την ειδική ισχύ του συσσωρευτή. Επιπλέον, σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες υπάρχει ο κίνδυνος στερεοποίησης του ηλεκτρολύτη. Η επίδραση της θερμοκρασίας μπορεί να εξαλειφθεί με την τοποθέτηση των συσσωρευτών σε μέρη που προφυλάσσονται από υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες. Κατά την αυτοεκφόρτιση, ένας φορτισμένος συσσωρευτής εκφορτίζεται ακόμα και αν δεν είναι συνδεδεμένος σε εξωτερικό φορτίο. Παρόλα αυτά, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι συνήθως μικρός σε σχέση με τους τυπικούς ρυθμούς εκφόρτισης που παρατηρούνται σε συσσωρευτές ΣΗΕ, και για το λόγο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη. Όσον αφορά τη γήρανση, παρατηρείται ελάττωση της χωρητικότητας του συσσωρευτή με την αύξηση του αριθμού των κύκλων λειτουργίας του. Στην παρούσα διατριβή, η επίδραση της γήρανσης δεν λαμβάνεται υπόψη.

2.4.3 Δεξαμενές υδρογόνου

Αν και η αναμόρφωση υδρογονανθράκων αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για παραγωγή H_2 ως καύσιμο για τις κυψέλες καυσίμου, υπάρχουν περιπτώσεις που είναι πιο πρόσφορη και αποδοτική η απευθείας αποθήκευση του H_2 . Αυτό μπορεί να συμβεί τόσο σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος, στις οποίες δεν μπορεί να δικαιολογηθεί το κόστος του εξοπλισμού αναμόρφωσης, όσο και σε περιπτώσεις ΣΗΕ που περιλαμβάνουν τεχνολογίες ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής. Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε H_2 κατά τις περιόδους υψηλής παραγωγής και χαμηλής ζήτησης ενέργειας γίνεται μέσω των μονάδων ηλεκτρόλυσης, οι οποίες χρησιμοποιούν τις ίδιες μεμβράνες και λειτουργούν με αντίθετο τρόπο σε σχέση με τις PEMFC (παράγουν H_2 από νερό), ενώ συνήθως χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα.

Οι κυριότερες μέθοδοι αποθήκευσης του H_2 είναι οι ακόλουθες:

- 1. Αποθήκευση του H_2 ως συμπιεσμένο αέριο σε δεξαμενές υδρογόνου.
- 2. Αποθήκευση του H_2 ως υγρό σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (22°K).
- 3. Προσρόφηση του H₂ σε μεταλλικό υδρίδιο.

Από τις παραπάνω μεθόδους, η πιο διαδεδομένη είναι η αποθήκευση συμπιεσμένου αέριου H₂ σε δεξαμενές υδρογόνου. Σε ένα ΜΑΣΗΕ, ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης, τη δεξαμενή καυσίμου, και την κυψέλη καυσίμου (τύπου PEMFC). Η απόδοση της μονάδας ηλεκτρόλυσης $n_{electrol}$, συμπεριλαμβάνοντας την ενέργεια που απαιτείται για να συμπιεστεί το παραγόμενο αέριο στη δεξαμενή υδρογόνου, κυμαίνεται ανάμεσα στο 60% και το 70% [2.26]. Στην παρούσα διατριβή έχει θεωρηθεί η τιμή $n_{electrol} = 65\%$. Η απόδοση αυτή είναι ίση με το λόγο του ενεργειακού περιεχομένου του H₂ (που βασίζεται στην ανώτερη θερμογόνο δύναμή του) προς την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε κατά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Δεδομένου ότι η τιμή της ανώτερης θερμογόνου δύναμης του H₂ είναι HHV_{H2} = 141.8 MJ/kg, ή ισοδύναμα HHV_{H2} = 39.4 kWh/kg, η παραγόμενη μάζα του H₂ ανά μονάδα ενέργειας που καταναλώνεται στη μονάδα ηλεκτρόλυσης dm_{H2el}/dE (σε kg/kWh) θα είναι:

$$dm_{H2el}/dE = \frac{1}{HHV_{H2}/n_{electrol}} = 0.0165 \text{ kg/kWh}.$$
 (2.53)

Η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να καταναλώσει μια μονάδα ηλεκτρόλυσης $P_{electrol}$ (σε kW) έχει ως μέγιστη τιμή την $P_{electrolmax}$ (σε kW). Επομένως, η παραγόμενη μάζα του H₂, m_{H2el} (σε kg), που προκύπτει από ηλεκτρόλυση σε χρονικό διάστημα Δt (σε h) είναι:

$$m_{H2el} = \begin{pmatrix} dm_{H2el} / \\ dE \end{pmatrix} \cdot P_{electrol} \cdot \Delta t \qquad \text{omov} \quad 0 \quad \text{kW} \le P_{electrol} \le P_{electrolmax}$$
(2.54)

Ένας επιπλέον περιορισμός που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η χωρητικότητα της δεξαμενής υδρογόνου C_{H2tank} (σε kg H₂). Εάν η αποθηκευμένη ποσότητα H₂ πρόκειται να υπερβεί τη χωρητικότητα C_{H2tank} , η μονάδα ηλεκτρόλυσης προσαρμόζει τη λειτουργία της έτσι ώστε να μη γίνει υπέρβαση αυτού του ορίου.

Στην περίπτωση που χρειάζεται να παραχθεί ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου, η κατανάλωση του H_2 , F_{H2} (σε kg/h), θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση (βλ. ενότητα 2.3.2):

$$F_{H2} = 0.06 \cdot P_{FC} \qquad \text{yia } 0 \text{ kW} \le P_{FC} \le P_{FCmax} \tag{2.55}$$

όπου P_{FC} είναι η παραγόμενη ισχύς (σε kW) και P_{FCmax} η μέγιστη παραγόμενη ισχύς (σε kW) της κυψέλης καυσίμου.

2.4.4 Λοιπές αποθηκευτικές διατάζεις

Εναλλακτικές τεχνολογίες αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ΜΑΣΗΕ είναι οι σφόνδυλοι και οι υπερπυκνωτές. Οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν ενέργεια σε ένα στρεφόμενο δίσκο που είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια. Ο σφόνδυλος αποθηκεύει ενέργεια επιταχύνοντας το στρεφόμενο δίσκο, ενώ ανακτά ενέργεια μέσω της επιβράδυνσής του. Οι υπερπυκνωτές αποτελούν εξέλιξη των πυκνωτών και επιτυγχάνουν πολύ μεγαλύτερες τιμές χωρητικότητας. Αυτό οφείλεται στο ότι ενώ οι συμβατικοί πυκνωτές αποθηκεύουν το ηλεκτρικό φορτίο σε υλικό το οποίο περιέχει μικροπόρους που καταλαμβάνουν τεράστια επιφάνεια (της τάξης των $10^6 \text{ m}^2/\text{kg}$), και επομένως μπορούν να αποθηκεύσουν πολλαπλάσια ποσότητα φορτίου.

Οι σφόνδυλοι και οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν υψηλότερη ειδική ισχύ και χαμηλότερη ειδική ενέργεια σε σχέση με τους συσσωρευτές, και συνήθως παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια για χρονικά διαστήματα έως 100 δευτερόλεπτα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μοντελοποίησή τους να κάνει απαραίτητη την υιοθέτηση χρονικών βημάτων προσομοίωσης μικρότερων του ενός λεπτού, και επομένως να απαιτεί τη χρήση μοντέλων μόνιμης κατάστασης λειτουργίας ή μοντέλων δυναμικής ανάλυσης, κάτι που βρίσκεται πέρα από τους στόχους της παρούσας διατριβής.

2.5 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ

2.5.1 Μετατροπείς

Στα ΜΑΣΗΕ συνήθως εμπεριέχεται συνδυασμός τεχνολογιών και φορτίων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε ένα τέτοιο σύστημα απαιτείται μετατροπή από συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο και αντιστρόφως, η οποία επιτυγχάνεται με χρήση μετατροπέων. Ανάλογα με τη

δομή του προς μελέτη συστήματος, ένας μετατροπέας μπορεί να είναι **αντιστροφέας** (ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο), **ανορθωτής** (ο οποίος μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές), ή συνδυασμός και των δύο. Στην παρούσα διατριβή οι μετατροπείς θεωρούνται ότι περιλαμβάνουν αντιστροφείς και ανορθωτές. Η μοντελοποίηση των μετατροπέων γίνεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση [2.32]:

$$P_{convout} = n_{conv} \cdot (P_{convin} - \beta_{conv}) \tag{2.56}$$

όπου $P_{convolt}$ είναι η ισχύς εξόδου του μετατροπέα (σε kW), P_{convin} είναι η ισχύς εισόδου του μετατροπέα (σε kW), n_{conv} είναι η απόδοση του μετατροπέα, και β_{conv} είναι οι μόνιμες απώλειες του μετατροπέα (σε kW). Η τιμή των απωλειών β_{conv} θεωρείται αμελητέα σε σχέση με την ισχύ εισόδου P_{convin} , και επομένως δεν λαμβάνεται υπόψη ($\beta_{conv} = 0$ kW). Η απόδοση του μετατροπέα λαμβάνεται ως $n_{conv} = 90\%$ και για τις δύο κατευθύνσεις λειτουργίας ($n_{inv} = 90\%$ για τον αντιστροφέα και $n_{rect} = 90\%$ για τον ανορθωτή) [2.2].

2.6 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΑΣΗΕ

Η αξιολόγηση ενός ΜΑΣΗΕ γίνεται με βάση το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (KHE), το οποίο εκφράζεται σε €/kWh και δείχνει το μέσο κόστος του συστήματος ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η ηλεκτρική ενέργεια που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του KHE εκφράζει το φορτίο που στην πραγματικότητα εξυπηρετείται από το ΜΑΣΗΕ, και όχι τη ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου, καθώς τα δύο αυτά μεγέθη διαφοροποιούνται στην περίπτωση που παρατηρείται απώλεια φορτίου κατά τη λειτουργία του συστήματος. Το KHE υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{KHE} = \frac{C_{antot}}{E_{anloadserved}}$$
(2.57)

όπου C_{antot} είναι το συνολικό κόστος του ΜΑΣΗΕ σε ετήσια βάση (σε €) και $E_{anloadserved}$ είναι η ετήσια ζήτηση ενέργειας που ικανοποιείται (σε kWh). Το συνολικό κόστος C_{antot} υπολογίζεται αθροίζοντας τα κόστη όλων των εξαρτημάτων του συστήματος σε ετήσια βάση C_{ancomp} (σε €), και λαμβάνει υπόψη το κόστος κεφαλαίου του κάθε εξαρτήματος σε ετήσια βάση C_{ancap} (σε €), το κόστος αντικατάστασης του κάθε εξαρτήματος σε ετήσια βάση C_{anrep} (σε €), το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης $C_{ano&m}$ (σε €), και το ετήσιο κόστος καυσίμου C_{anfuel} (σε €):

$$C_{antot} = \sum C_{ancomp} \qquad \acute{o}\pi ov \qquad C_{ancomp} = C_{ancap} + C_{anrep} + C_{ano\&m} + C_{anfuel} \,. \tag{2.58}$$

Το κόστος κεφαλαίου ενός εξαρτήματος σε ετήσια βάση Cancap υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{ancap} = C_{cap} \cdot \text{CRF}(i_r, R_{SIPS})$$
(2.59)

όπου C_{cap} είναι το κόστος κεφαλαίου του εξαρτήματος (σε \in), και CRF(i_r , R_{SIPS}) είναι ο παράγοντας ανάκτησης κεφαλαίου που υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$CRF(i_r, R_{SIPS}) = \frac{i_r \cdot (1+i_r)^{R_{SIPS}}}{(1+i_r)^{R_{SIPS}} - 1}$$
(2.60)

όπου *i*_r είναι το ετήσιο επιτόκιο προεξόφλησης, στο οποίο περιλαμβάνεται ο πληθωρισμός και χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του εφάπαξ κόστους σε κόστος ετήσιας βάσης, ενώ η παράμετρος R_{SIPS} περιγράφει τη διάρκεια ζωής του ΜΑΣΗΕ (σε έτη). Το κόστος αντικατάστασης ενός εξαρτήματος σε ετήσια βάση C_{anrep} υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{anrep} = C_{rep} \cdot f_{rep} \cdot \text{SFF}(i_r, \ R_{comp}) - S \cdot \text{SFF}(i_r, \ R_{SIPS})$$
(2.61)

όπου C_{rep} είναι το κόστος αντικατάστασης του εξαρτήματος (σε €), f_{rep} είναι ένας παράγοντας που προκύπτει από το γεγονός ότι η διάρκεια ζωής ενός εξαρτήματος μπορεί να είναι διαφορετική από τη διάρκεια ζωής του ΜΑΣΗΕ, SFF(i_r , R_{comp}) είναι ο παράγοντας απόσβεσης του εξαρτήματος, R_{comp} είναι η διάρκεια ζωής του εξαρτήματος (σε έτη), S είναι η εναπομείνασα αξία του εξαρτήματος στο τέλος της διάρκειας ζωής του ΜΑΣΗΕ (σε €), και SFF(i_r , R_{SIPS}) είναι ο παράγοντας απόσβεσης του ΜΑΣΗΕ. Η τιμή του παράγοντα f_{rep} δίνεται από την σχέση:

$$f_{rep} = \begin{cases} CRF(i_r, R_{SIPS}) / & \gamma \iota \alpha R_{rep} > 0 \\ & / CRF(i_r, R_{rep}) & \gamma \iota \alpha R_{rep} > 0 \\ 0 & \gamma \iota \alpha R_{rep} = 0 \end{cases}$$
(2.62)

όπου R_{rep} είναι η διάρκεια κόστους αντικατάστασης (σε έτη) που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{rep} = R_{comp} \cdot \operatorname{int} \left(\frac{R_{SIPS}}{R_{comp}} \right).$$
(2.63)

Στην παραπάνω σχέση η συνάρτηση int(x) υπολογίζει το ακέραιο μέρος του αριθμού x. Ο παράγοντας απόσβεσης ενός εξαρτήματος $SFF(i_r, R_{comp})$ υπολογίζει τη μελλοντική αξία μιας σειράς από ίσες ετήσιες ταμειακές ροές, και είναι ίσος με:

SFF
$$(i_r, R_{comp}) = \frac{i_r}{(1+i_r)^{R_{comp}} - 1}$$
 (2.64)

όπου i_r είναι το ετήσιο επιτόκιο προεξόφλησης. Η εναπομείνασα αξία S του εξαρτήματος δίνεται από τη σχέση:

$$S = C_{rep} \cdot \frac{R_{rem}}{R_{comp}}$$
(2.65)

όπου *R_{rem}* είναι η εναπομένουσα ζωή του εξαρτήματος στο τέλος της διάρκειας ζωής του ΜΑΣΗΕ (σε έτη):

$$R_{rem} = R_{comp} - (R_{SIPS} - R_{rep}).$$
(2.66)

Περισσότερες πληροφορίες σε σχέση με την οικονομική μοντελοποίηση υπάρχουν στην αναφορά [2.33].

2.7 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΜΑΣΗΕ

Στην προσομοίωση λειτουργίας ενός ΜΑΣΗΕ, πέραν της μοντελοποίησης των μεμονωμένων εξαρτημάτων που το απαρτίζουν, είναι σημαντικός και ο καθορισμός του τρόπου συνεργασίας τους. Η επίλυση αυτού του προβλήματος απαιτεί αποφάσεις που πρέπει να λαμβάνονται σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης, οι οποίες θα καθορίζουν τις τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκονται σε λειτουργία, την ισχύ που αυτές χρειάζεται να παράγουν, τον τρόπο φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών (εάν υπάρχουν), κλπ. Μια παράμετρος που επιδρά σημαντικά στις αποφάσεις για την κατανομή ενέργειας στο ΜΑΣΗΕ είναι η **λειτουργική εφεδρεία**.

2.7.1 Λειτουργική εφεδρεία

Η λειτουργική εφεδρεία είναι η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να εξυπηρετήσει άμεσα μια ξαφνική αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, ή μια ξαφνική μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τεχνολογίες ΑΠΕ. Η λειτουργική εφεδρεία προσφέρει ένα περιθώριο ασφαλείας που βοηθά στην εξασφάλιση της αξιόπιστης παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, παρά τη μεταβλητότητα του ηλεκτρικού φορτίου και την αβεβαιότητα ως προς την παραγώμενη ενέργεια από τεχνολογίες ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής. Η λειτουργική εφεδρεία είναι περισσότερο γνωστή στα ΣΗΕ ως **στρεφόμενη εφεδρεία**. Ο όρος αυτός δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή καθώς ορισμένα από τα εξαρτήματα ενός ΜΑΣΗΕ, όπως οι κυψέλες καυσίμου και οι συσσωρευτές, μπορούν να παρέχουν εφεδρική ενέργεια αλλά δεν περιέχουν στρεφόμενα μέρη [2.34].

Η κάλυψη της συνολικά ζητούμενης ενέργειας ενός ΜΑΣΗΕ, που είναι ίση με το άθροισμα της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και της λειτουργικής εφεδρείας, μπορεί να γίνει από τις τεχνολογίες ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής, από τις γεννήτριες και από τους συσσωρευτές. Για τις τεχνολογίες ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής (ΑΓ, ΦΒ, ή μικρά ΥΗΕ), η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι αυτή που παράγουν κατά τη τρέχουσα χρονική στιγμή. Στις γεννήτριες, η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια προκύπτει από τη μέγιστη ισχύ που μπορούν να παράγουν. Στους συσσωρευτές, η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον συσσωρευτή, το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης και την απόδοση εκφόρτισης.

Η απαιτούμενη ποσότητα λειτουργικής εφεδρείας $OR_{\Delta t}$ (σε kWh) υπολογίζεται για κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης διάρκειας Δt (σε h) από την ακόλουθη εξίσωση:

$$OR_{\Delta t} = r_{load} \cdot P_{load} \cdot \Delta t + r_{WT} \cdot P_{WT} \cdot \Delta t + n_{inv} \cdot r_{PV} \cdot P_{PV} \cdot \Delta t$$
(2.67)

όπου r_{load} είναι το απαιτούμενο ποσοστό της λειτουργικής εφεδρείας σε σχέση με την τρέχουσα τιμή του ηλεκτρικού φορτίου P_{load} (σε kW), r_{WT} είναι το απαιτούμενο ποσοστό της λειτουργικής εφεδρείας σε σχέση με την τρέχουσα παραγόμενη ισχύ της AΓ P_{WT} (σε kW), r_{PV} είναι το απαιτούμενο ποσοστό της λειτουργικής εφεδρείας σε σχέση με την τρέχουσα παραγόμενη ισχύ του ΦΒ συστήματος P_{PV} (σε kW), ενώ n_{inv} είναι η απόδοση του μετατροπέα που περιλαμβάνεται μεταξύ του φορτίου εναλλασσόμενου ρεύματος και του ΦΒ συστήματος. Στην παραπάνω εξίσωση δεν περιλαμβάνεται όρος για τα μικρά ΥΗΕ, καθώς η παραγόμενη ισχύς τους P_{hydro} παρουσιάζει αμελητέες διακυμάνσεις εντός του βήματος της προσομοίωσης. Οι τιμές των r_{load} , r_{WT} και r_{PV} είναι σταθερές για όλα τα χρονικά βήματα της προσομοίωσης.

Στην περίπτωση που η συνολικά παραγόμενη ισχύς του συστήματος σε μια δεδομένη χρονική στιγμή δεν καλύπτει το φορτίο και τις απαιτήσεις σε εφεδρεία, τότε υπάρχει **απώλεια ισχύος**. Θα πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των όρων της απώλειας φορτίου και της απώλειας ισχύος. Ο όρος της απώλειας ισχύος σημαίνει την απώλεια της παραγόμενης ισχύος που μπορεί να προκαλέσει ή να μην προκαλέσει απώλεια φορτίου του συστήματος [2.35].

2.7.2 Βέλτιστη επιλογή λειτουργίας γεννητριών και συσσωρευτών

Σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης, η απόφαση για τη λειτουργία των γεννητριών και συσσωρευτών του συστήματος εξαρτάται από το εάν οι τεχνολογίες ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής (ΑΓ και/ή ΦΒ και/ή μικρά ΥΗΕ) μπορούν από μόνες τους να καλύψουν το ηλεκτρικό φορτίο και τη λειτουργική εφεδρεία. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, χρειάζεται να προσφερθεί ενέργεια στο σύστημα από τις γεννήτριες και/ή τους συσσωρευτές. Το κριτήριο με το οποίο επιλέγεται ο βέλτιστος συνδυασμός αυτών των εξαρτημάτων είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους. Στην περίπτωση των γεννητριών, το συνολικό κόστος προκύπτει ως το άθροισμα του πάγιου κόστους λειτουργίας και του οριακού κόστους λειτουργίας [2.28]. Το πάγιο κόστος λειτουργίας C_{genfix} (σε \in) είναι το κόστος που απαιτείται για να τεθεί σε λειτουργία η γεννήτρια χωρίς να παράγει καθόλου ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου χρονικού βήματος, και λαμβάνει υπόψη τη διάρκεια του χρονικού βήματος Δt (σε h), το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της γεννήτριας $R_{gen(h)}$ (σε h), την πάγια κατανάλωση καυσίμου F_{genfix} (σε μονάδες μέτρησης της ποσότητας του καυσίμου (π.χ., L, kg, m³) ανά ώρα), και την τιμή του καυσίμου $C_{genfuel}$ (σε \notin ανά μονάδα μέτρησης της ποσότητας του καυσίμου):

$$C_{genfix} = C_{geno\&m} \cdot \Delta t + \frac{C_{genrep} \cdot \Delta t}{R_{gen(h)}} + F_{genfix} \cdot C_{genfuel} \cdot \Delta t .$$
(2.68)

Το οριακό κόστος λειτουργίας $C_{genmarg}$ (σε \in) της γεννήτριας σε ένα χρονικό διάστημα Δt (σε h) εξαρτάται από την οριακή κατανάλωση καυσίμου $F_{genmarg}$ της γεννήτριας (σε μονάδες μέτρησης της ποσότητας του καυσίμου ανά ώρα) και από την τιμή του καυσίμου $C_{genfuel}$ (σε \in ανά μονάδα μέτρησης της ποσότητας του καυσίμου):

$$C_{genmarg} = F_{genmarg} \cdot C_{genfuel} \cdot \Delta t .$$
(2.69)

Στην περίπτωση των συσσωρευτών, το πάγιο κόστος C_{batfix} είναι ίσο με μηδέν, καθώς δεν υπάρχει κόστος λειτουργίας των συσσωρευτών έτσι ώστε αυτοί να είναι έτοιμοι να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Το οριακό κόστος των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος $C_{batmarg}$ (σε €) είναι ίσο με το άθροισμα του κόστους φθοράς $C_{batwear}$ και του κόστους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας $C_{batstore}$ [2.28]:

$$C_{batmarg} = C_{batwear} + C_{batstore} \,. \tag{2.70}$$

Το κόστος φθοράς $C_{batwear}$ (σε \in) είναι το κόστος ανακύκλωσης ενέργειας διαμέσου των συσσωρευτών, και εξαρτάται από το κόστος αντικατάστασης του συσσωρευτή C_{batrep} (σε \in), την ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται στο συσσωρευτή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος $E_{bat\Delta t}$ (σε kWh), την ποσότητα ενέργειας $E_{batlife}$ (σε kWh) που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα συσσωρευτή κατά τη διάρκεια ζωής του, και την απόδοση εκφόρτισης του συσσωρευτή n_{batd} :

$$C_{batwear} = \frac{C_{batrep} \cdot E_{bat\Delta t}}{E_{batlife} \cdot n_{batd}}.$$
(2.71)

Το κόστος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας C_{batstore} εξαρτάται από την στρατηγική συνεργασίας των γεννητριών και των συσσωρευτών, και θα ο υπολογισμός του θα εξεταστεί στην ενότητα 2.7.3.

2.7.3 Στρατηγικές συνεργασίας μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών

Στην περίπτωση που κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος της προσομοίωσης ο βέλτιστος συνδυασμός εξαρτημάτων απαιτεί τη συνεργασία μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών, χρειάζεται να εξεταστεί ένα επιπλέον ζήτημα, το οποίο σχετίζεται με τον τρόπο που θα φορτιστούν οι

συσσωρευτές από τις γεννήτριες του συστήματος. Η επίλυση αυτού του ζητήματος δεν μπορεί να γίνει με απλούς οικονομικούς υπολογισμούς, καθώς η βέλτιστη συνεργασία μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών εξαρτάται από τη μελλοντική προσφορά και ζήτηση ενέργειας στο ΜΑΣΗΕ [2.28]. Δύο συνήθεις στρατηγικές συνεργασίας μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών είναι η **στρατηγική** παρακολούθησης φορτίου και η **στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή**. Έχει αποδειχτεί ότι για ένα μεγάλο εύρος περιπτώσεων, η καλύτερη από τις δύο παραπάνω στρατηγικές είναι ουσιαστικά ισοδύναμη με μια ιδανική στρατηγική πρόβλεψης, που θεωρεί γνωστή τη μελλοντική προσφορά και ζήτηση ενέργειας στο σύστημα [2.36].

Κατά τη στρατηγική παρακολούθησης φορτίου, οι συσσωρευτές δεν φορτίζονται από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν οι γεννήτριες, αλλά μόνο από την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας των τεχνολογιών ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής. Η μόνη περίπτωση κατά την οποία μια γεννήτρια φορτίζει το συσσωρευτή είναι όταν η ζητούμενη ενέργεια που πρέπει να προσφερθεί από τη γεννήτρια είναι μικρότερη της ελάχιστης ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από αυτήν, ενώ ταυτόχρονα ο συσσωρευτής δεν είναι πλήρως φορτισμένος.

Κατά τη στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή, όταν μια γεννήτρια χρειάζεται να εξυπηρετήσει το φορτίο παρέχει τη μέγιστη δυνατή ισχύ, και η περίσσεια ενέργειας (εάν υπάρχει) αποθηκεύεται στο συσσωρευτή. Η στρατηγική αυτή προϋποθέτει και τον καθορισμό ενός **σημείου** κατάστασης φόρτισης SOC_{cc}, που δείχνει το επίπεδο φόρτισης που πρέπει να φτάσει ο συσσωρευτής πριν σταματήσει να λειτουργεί η γεννήτρια. Η τιμή του SOC_{cc} πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα στην ελάχιστη και στη μέγιστη κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή, δηλαδή:

$$(1 - \beta_{dismax}) \le \text{SOC}_{cc} \le 100\% \tag{2.72}$$

όπου β_{dismax} είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης. Η βέλτιστη τιμή του SOC_{cc} για τη λειτουργία ενός ΜΑΣΗΕ δεν είναι δεδομένη, αλλά εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος. Σε κάθε περίπτωση όμως, είναι επιθυμητή η επιλογή υψηλών τιμών για το SOC_{cc}, καθώς έτσι μειώνεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι συσσωρευτές βρίσκονται σε χαμηλή κατάσταση φόρτισης, ενώ επιπλέον μειώνεται ο αριθμός επανεκκινήσεων των γεννητριών και ο αριθμός των κύκλων λειτουργίας των συσσωρευτών. Στην παρούσα διατριβή, κάθε φορά που υιοθετείται η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή, ελέγχονται τέσσερις τιμές του SOC_{cc}: 70%, 80%, 90% και 100%.

Η επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής συνεργασίας μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών προκύπτει από την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος και για τις δύο στρατηγικές, και κατόπιν την επιλογή εκείνης της λύσης που παρουσιάζει το ελάχιστο κόστος [2.36]. Πρέπει να τονιστεί όμως ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η στρατηγική παρακολούθησης φορτίου τείνει να είναι η βέλτιστη επιλογή σε ΜΑΣΗΕ με μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ τεχνολογιών ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής, ενώ η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή τείνει να είναι η βέλτιστη επιλογή σε ΜΑΣΗΕ με μικρή εγκατεστημένη ισχύ τεχνολογιών ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής.

Η στρατηγική συνεργασίας μεταξύ των γεννητριών και των συσσωρευτών επηρεάζει και τον υπολογισμό του κόστους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας $C_{batstore}$. Στην περίπτωση υιοθέτησης της στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου, οι γεννήτριες δεν παράγουν επιπλέον ενέργεια για τη φόρτιση των συσσωρευτών, και επομένως ισχύει ότι $C_{batstore} = 0$. Αντίθετα, κατά τη στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή, οι γεννήτριες παράγουν επιπλέον ενέργεια για τη φόρτιση των συσσωρευτών, και επομένως η τιμή του $C_{batstore}$ είναι ίση με το κόστος του επιπλέον καυσίμου που καταναλώνεται για το σκοπό αυτό.

2.8 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί του προβλήματος αναφέρονται στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση της λειτουργίας του ΜΑΣΗΕ χρησιμοποιώντας σταθερό χρονικό βήμα Δt (σε h), με δεδομένα τον τύπο των εξαρτημάτων που περιλαμβάνονται στο ΜΑΣΗΕ, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και το κόστος των εξαρτημάτων αυτών.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη τη διάρκεια ζωής του ΜΑΣΗΕ:

$$\min(KHE) \tag{2.73}$$

υπό τους ακόλουθους περιορισμούς:

1. Περιορισμός αρχικού κόστους του συστήματος IC (σε \in):

$$IC \le IC_{max} \tag{2.74}$$

όπου *IC_{max}* είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή αρχικού κόστους (σε €). Ο περιορισμός αυτός ορίζει, για ένα δεδομένο συνδυασμό εξαρτημάτων που απαρτίζουν το MAΣHE, το μέγιστο δυνατό μέγεθός τους.

Περιορισμός μέγιστης ετήσιας απώλειας φορτίου:

$$f_{A\Phi} = \frac{\sum_{\Delta t}^{\text{year}} (A\Phi_{\Delta t} \cdot \Delta t)}{E_{anload}} \le f_{A\Phi max}$$
(2.75)

όπου $f_{A\Phi}$ είναι το κλάσμα της απώλειας φορτίου, $A\Phi_{\Delta t}$ είναι η απώλεια φορτίου (σε kW) κατά το χρονικό βήμα Δt της προσομοίωσης (σε h), E_{anload} είναι η ετήσια ζήτηση ενέργειας (σε kWh), και $f_{A\Phi max}$ είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο κλάσμα της απώλειας φορτίου.

3. Περιορισμός της μέγιστης ετήσιας απώλειας ισχύος:

$$f_{\rm AI} = \frac{\sum_{\Delta t}^{\rm year} ({\rm AI}_{\Delta t} \cdot \Delta t)}{E_{anload}} \le f_{\rm AImax}$$
(2.76)

όπου f_{AI} είναι το κλάσμα της απώλειας ισχύος, $AI_{\Delta t}$ είναι η απώλεια ισχύος (σε kW) κατά το χρονικό βήμα Δt της προσομοίωσης (σε h), E_{anload} είναι η ετήσια ζήτηση ενέργειας (σε kWh), και f_{AImax} είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο κλάσμα της απώλειας ισχύος.

4. Περιορισμός μέγιστης ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου από τις γεννήτριες του ΜΑΣΗΕ:

$$\sum_{\Delta t}^{\text{year}} FC_{gen\Delta t} \le FC_{angenmax} \quad \forall \quad gen$$
(2.77)

όπου $FC_{gen\Delta t}$ είναι η κατανάλωση καυσίμου της γεννήτριας gen κατά το χρονικό βήμα Δt της προσομοίωσης (σε h), και $FC_{angenmax}$ είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ετήσια κατανάλωση καυσίμου της γεννήτριας gen. Οι μονάδες της κατανάλωσης καυσίμου εξαρτώνται από τον τύπο καυσίμου που καταναλώνει η κάθε γεννήτρια.

5. Περιορισμός ελάχιστης ετήσιας ενέργειας που παράγεται από τεχνολογίες ΑΠΕ, ως συνάρτηση της συνολικής ετήσιας ενέργειας που παράγει το σύστημα:

$$f_{RES} = \frac{E_{anRES}}{E_{antot}} \ge f_{RESmin} \qquad \acute{o}\pi ov \qquad 0 \le f_{RESmin} \le 1$$
(2.78)

όπου f_{RES} είναι το κλάσμα της παραγόμενης ενέργειας από τεχνολογίες ΑΠΕ, E_{anRES} είναι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τεχνολογίες ΑΠΕ (σε kWh), E_{antot} είναι η συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια του ΜΑΣΗΕ (σε kWh), και f_{RESmin} είναι το ελάχιστο επιτρεπόμενο κλάσμα της παραγόμενης ενέργειας από τεχνολογίες ΑΠΕ. Ως τεχνολογίες ΑΠΕ λαμβάνονται οι ΑΓ, τα ΦΒ συστήματα, τα μικρά ΥΗΕ, οι ντηζελογεννήτριες που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το βιοντήζελ, και οι κυψέλες καυσίμου των οποίων το καύσιμο προέρχεται από ηλεκτρόλυση νερού και όχι από αναμόρφωση υδρογονανθράκων.

6. Περιορισμοί μεγέθους των συστατικών του ΜΑΣΗΕ:

$$size_{comp} \ge 0 \quad \forall \quad comp$$
 (2.79)

$$size_{comp} \leq size_{compmax} \quad \forall \quad comp$$
 (2.80)

όπου $size_{comp}$ είναι το μέγεθος του κάθε εξαρτήματος comp του συστήματος, και $size_{compmax}$ είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Μ.Π. Παπαδόπουλος, Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.
- [2.2] P. Lilienthal, T. Lambert, and P. Gilman, "Computer modeling of renewable power systems," *Elsevier Encyclopaedia of Energy*, vol. 1, pp. 633-647, 2004.
- [2.3] RETScreen international. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.retscreen.net
- [2.4] PVSYST. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <u>http://www.pvsyst.com</u>
- [2.5] HOMER, the micropower optimization model. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <u>http://www.nrel.gov/homer</u>
- [2.6] HYBRID2, the hybrid system simulation code. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2/download.html
- [2.7] PV-DesignPro. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <u>http://www.mauisolarsoftware.com</u>
- [2.8] PV*SOL. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <u>http://www.valentin.de</u>
- [2.9] Ι.Κ. Καλδέλης, Διαχείριση της αιολικής ενέργειας 2^η Εκδοση. Εκδόσεις Σταμούλη: Αθήνα, 2005.
- [2.10] European Commission, *Wind energy the facts*. Technical Report, European Wind Energy Association (EWEA), 2003.
- [2.11] J.F. Manwell, A. Rogers, G. Hayman, C.T. Avelar, and J.G. McGowan, *HYBRID2 a hybrid system simulation model, theory manual.* Renewable Energy Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Massachusetts, 1998.
- [2.12] J.F. Manwell, J.G. McGowan, and A.L. Rogers, *Wind energy explained*. John Wiley & Sons: Chichester, 2002.
- [2.13] T. Ackermann, Wind power in power systems. John Wiley & Sons: Chichester, 2005.
- [2.14] C. G. Justus, "Wind energy statistics for large arrays of wind turbines (New England and central U.S. regions)," *Solar Energy*, vol. 20, pp. 379-386, 1978.
- [2.15] M. Thomson and D.G. Infield, "Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems," *IET Renewable Power Generation*, vol. 1, no. 1, pp. 33-40, 2007.
- [2.16] RETScreen international, *Photovoltaic project model online user manual*. Ministry of Natural Resources: Canada, 2005.
- [2.17] Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά συστήματα. Εκδόσεις Ζήτη: Θεσσαλονίκη, 2006.
- [2.18] T. Markvart and L. Castañer, *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. Elsevier: UK, 2003.
- [2.19] J.A. Duffie and W.A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes 3rd edition*. John Wiley & Sons: New Jersey, 2006.
- [2.20] D.G. Erbs, S.A. Klein, and J.A. Duffie, "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation," *Solar Energy*, vol. 28, no. 4, pp. 293-302, 1982.
- [2.21] D.T. Reindl, W.A. Beckman, and J.A. Duffie, "Evaluation of hourly tilted surface radiation models," *Solar Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 9-17, 1990.
- [2.22] Δ.Ε. Παπαντώνης, Μικρά υδροηλεκτρικά έργα. Εκδόσεις Συμεών: Αθήνα, 2001.

- [2.23] Ι.Κ. Καλδέλλης και Κ.Α. Καββαδίας, Υπολογιστικές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας, αιολική ενέργεια – μικρά υδροηλεκτρικά. Εκδόσεις Σταμούλη: Αθήνα, 2005.
- [2.24] O. Skarstein and K. Uhlen, "Design considerations with respect to long-term diesel saving in wind/diesel plants," *Wind Engineering*, vol. 13, pp. 72-87, 1989.
- [2.25] G. Knothe, J.V. Gerpen, and J. Krahl, *The biodiesel handbook*. AOCS Press: Illinois, 2005.
- [2.26] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel cell systems explained* -2^{nd} *Edition*. John Wiley & Sons: Chichester, 2003.
- [2.27] T. Ruberti, "Off-grid hybrids: fuel cell solar-PV hybrids," *Refocus*, vol. 4, no. 5, pp. 54-57, 2003.
- [2.28] F.A. Farret and M.G. Simões, *Integration of alternative sources of energy*. John Wiley & Sons: New Jersey, 2006.
- [2.29] Κ. Καγκαράκης, Φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Εκδόσεις Συμμετρία: Αθήνα, 1992.
- [2.30] D. Linden and T.B. Teddy, *Handbook of batteries 3rd edition*. McGraw-Hill: New York, 2002.
- [2.31] G.M. Masters, *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons: New Jersey, 2004.
- [2.32] Y. Sukamongkol, S. Chungpaibulpatana, and W. Ongsakul, "A simulation model for predicting the performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads," *Renewable Energy*, vol. 27, pp. 237-258, 2002.
- [2.33] E.P. DeGarmo, W.G. Sullivan, and J.A. Bontadelli, *Engineering economy* δ^{th} edition. Macmillan: New York, 1988.
- [2.34] NREL, HOMER software online help. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <u>http://www.nrel.gov/homer</u>
- [2.35] Ε.Ν. Διαλυνάς, Αξιοπιστία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1996.
- [2.36] C.D. Barley and C.B. Winn, "Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems," *Solar Energy*, vol. 58, pp. 165-179, 1996.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΕΘΕΥΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, και η επίλυσή του μπορεί να αποδειχτεί μια εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία. Σε αυτό το κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζονται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα επίλυσης του προβλήματος αυτού με τρεις δημοφιλείς μεθευρετικές μεθόδους: την αναζήτηση ταμπού, τους γενετικούς αλγορίθμους και την προσομοιωμένη ανόπτηση. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των μεθόδων αυτών είναι αντίστοιχης ποιότητας, ενώ ο αριθμός προσομοιώσεων λειτουργίας του συστήματος που εκτελούνται είναι πάρα πολύ μικρός σε σχέση με το συνολικό αριθμό προσομοιώσεων της μεθόδου της πλήρους απαρίθμησης. Επίσης, προτείνονται δυο τρόποι συνεργασίας των παραπάνω μεθευρετικών μεθόδων, που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της καθεμιάς από αυτές.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης ενός ΜΑΣΗΕ που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, οι μεταβλητές εισόδου, που περιλαμβάνουν τα μεγέθη των εξαρτημάτων του ΜΑΣΗΕ και τις στρατηγικές συνεργασίας γεννητριών και συσσωρευτών, μπορούν να λάβουν δεδομένες τιμές που ανήκουν σε ένα πεπερασμένο σύνολο. Το συγκεκριμένο πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, καθώς ο αριθμός όλων των πιθανών λύσεων είναι πεπερασμένος και προκύπτει ως αποτέλεσμα των δυνατών συνδυασμών των μεταβλητόν εισόδου. Η πιο απλή μέθοδος επίλυσης προβλημάτων αυτού του τύπου είναι η πλήρης απαρίθμηση των λύσεων. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει την εύρεση της βέλτιστης λύσης, αλλά μπορεί να αποδειχτεί εξαιρετικά χρονοβόρα, ιδιαιτέρα όταν ο αριθμός των τιμών των μεταβλητών εισόδου είναι μεγάλος και/ή η διαδικασία υπολογισμού της αντικειμενικής βελτιστοποίησης είναι η χρήση ευρετικών μεθόδων, που παράγουν λύσεις κοντά στην περιοχή των βέλτιστων, αλλά η μεγάλη πλειονότητα από αυτές χρησιμοποιείται μόνο για την επίλυση ενός δεδομένου προβλήματος.

Τα τελευταία χρόνια έχει παρουσιαστεί ένα σύνολο από νέες μεθόδους επίλυσης που καλούνται μεθευρετικές, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν με επιτυχία σε ένα μεγάλο εύρος δύσκολων προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης ή βελτιστοποίησης προβλημάτων συνεχών μεταβλητών. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των μεθευρετικών μεθόδων είναι η αναλογία που παρουσιάζουν με νόμους της φυσικής ή της βιολογίας. Στην παρούσα διατριβή, το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης ενός ΜΑΣΗΕ επιλύεται με τρεις δημοφιλείς μεθευρετικές μεθόδους: την αναζήτηση ταμπού, τους γενετικούς αλγορίθμους και την προσομοιωμένη ανόπτηση. Για την απευθείας σύγκριση της επίδοσης των μεθόδων αυτών έχει αναπτυχθεί ένα κοινό παράδειγμα εφαρμογής (ενότητα 3.2), που περιγράφει τη λειτουργία ενός σύνθετου ΜΑΣΗΕ.

3.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Το παράδειγμα εφαρμογής αναφέρεται στη μοντελοποίηση ενός ΜΑΣΗΕ του οποίου η διάρκεια ζωής R_{SIPS} έχει θεωρηθεί ίση με 20 έτη, ενώ η τιμή του ετήσιου επιτοκίου προεξόφλησης i_r λαμβάνεται ίση με 8%. Το φορτίο αιχμής του συστήματος έχει οριστεί ίσο με 50 kW, ενώ το προφίλ της καμπύλης φορτίου βασίζεται σε αυτό της καμπύλης φορτίου της Κρήτης για το έτος 2005. Λόγω των μικρών τιμών ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, το χρονικό βήμα Δt της προσομοίωσης έχει θεωρηθεί ίσο με 10 min (1/6 h). Τα δεδομένα της ταχύτητας ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας βασίζονται σε δεκάλεπτες μετρήσεις από την περιοχή της Αθήνας για το έτος 2005 [3.1]. Η τιμή των ανεμολογικών δεδομένων έχει αναπροσαρμοστεί έτσι ώστε η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου να είναι ίση με 6 m/s, που αποτελεί μια ρεαλιστική τιμή για ένα ΜΑΣΗΕ στην Ελλάδα. Επιπλέον, το μελετώμενο σύστημα θεωρείται ότι βρίσκεται σε υψόμετρο z = 500 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται πληροφορίες που σχετίζονται με το μέγεθος, τα οικονομικά στοιχεία και τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων του παραδείγματος εφαρμογής. Για κάθε εξάρτημα, η ελάχιστη τιμή του μεγέθους είναι ίση με μηδέν.

Συστατικό	size _{compmax}	Προσαύξηση	Κόστος κεφαλαίου	Κόστος αντικατ.	Κόστος Λ&Σ	Κόστος καυσίμου	Διάρκεια ζωής
АΓ	10 AΓ	1 AΓ	15000 €/АГ	12000 €/АГ	300 €/y	-	20 y
ΦB	60 kW_{p}	1 kW _p	5000 €/kW _p	4500 €/kW _p	0	-	25 у
Ντζ.	50 kW	βλ. Πίνακα 3.2	200 €/kW	200 €/kW	0.01 €/h ανά kW	1.0 €/L	20000 h λειτουργίας
Βιοντζ.	50 kW	βλ. Πίνακα 3.2	200 €/kW	200 €/kW	0.01 €/h ανά kW	1.4 €/L	20000 h λειτουργίας
K.K.	40 kW	4 kW	1800 €/kW	1800 €/kW	0.02 €/h ανά kW	0.8 €/L	40000 h λειτουργίας
Συσσ.	150 συσσ.	10 συσσ.	700 €/συσσ.	700 €/συσσ.	0	-	9000 kWh
Μετατρ.	60 kW	2 kW	1000 €/kW	1000 €/kW	0	-	10 y

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά εξαρτημάτων του παραδείγματος εφαρμογής.

<u>Επεξηγήσεις</u>: Κόστος αντικατ. = Κόστος αντικατάστασης, Κόστος Λ&Σ = Κόστος λειτουργίας και συντήρησης, Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας.

Η λειτουργία της ΑΓ περιγράφεται από την καμπύλη ισχύος του Σχήματος 2.3 (ονομαστική ισχύς $P_R = 10$ kW), ενώ το ύψος πλήμνης z_{hub} λαμβάνεται ίσο με 30 m. Τα ΦΒ πλαίσια θεωρούνται ότι είναι μονοκρυσταλλικού πυριτίου και δεν περιλαμβάνουν σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου. Η κλίση β της ΦΒ συστοιχίας λαμβάνεται ίση με το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας (38°), ενώ η γωνία αζιμουθίου γ διατηρείται ίση με 0°. Ο κάθε συσσωρευτής που χρησιμοποιείται

έχει χωρητικότητα $C_{bat} = 625$ Ah και τάση $V_{bat} = 12$ V. Τέλος, με εξαίρεση τις ντηζελογεννήτριες, όλα τα εξαρτήματα του ΜΑΣΗΕ παρουσιάζουν σταθερή προσαύξηση μεγέθους που δίνεται στην 3^η στήλη του Πίνακα 3.1. Τα μεγέθη των ντηζελογεννητριών λαμβάνουν τυποποιημένες τιμές, οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 3.2. Από τα στοιχεία των Πινάκων 3.1 και 3.2 προκύπτει ότι ο αριθμός των δυνατών διαμορφώσεων του ΜΑΣΗΕ στο παράδειγμα εφαρμογής είναι πολύ μεγάλος. Λαμβάνοντας υπόψη και τον αριθμό των εναλλακτικών στρατηγικών συνεργασίας μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών, ο συνολικός αριθμός των προς εξέταση διαμορφώσεων του συστήματος είναι ίσος με:

$$\underbrace{11}_{A\Gamma} \underbrace{61}_{\Phi B} \cdot \underbrace{12}_{N\tau\zeta} \cdot \underbrace{12}_{BUV\tau\zeta} \cdot \underbrace{11}_{K.K.} \underbrace{16}_{\Sigma U\sigma\sigma} \cdot \underbrace{31}_{\Phi \tau \alpha \tau \rho} \cdot \underbrace{4}_{\Sigma \tau \rho} = 2108722176 \approx 2.1 \cdot 10^9 . \tag{3.1}$$

Ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης με τη μέθοδο της πλήρους απαρίθμησης είναι περίπου 468 έτη, θεωρώντας ως χρόνο υπολογισμού του ΚΗΕ κάθε διαμόρφωσης τα 7 s. Ο υπολογιστικός αυτός χρόνος είναι απαγορευτικός, για αυτό έχει αξία να αναπτυχθούν άλλες μέθοδοι βελτιστοποίησης για την επίλυση του προβλήματος σε εύλογο υπολογιστικό χρόνο.

Α/Α μεγέθους	Ονομαστική ισχύς P_{dslmax} (kW)
1	0
2	3
3	5
4	7.5
5	10
6	15
7	20
8	25
9	30
10	35
11	40
12	50

Πίνακας 3.2: Μεγέθη ντηζελογεννητριών παραδείγματος εφαρμογής.

Οι οριακές τιμές των υπόλοιπων περιορισμών του παραδείγματος εφαρμογής δίνονται στον Πίνακα 3.3. Για τον υπολογισμό της λειτουργικής εφεδρείας του συστήματος, η οποία επηρεάζει τον περιορισμό της μέγιστης ετήσιας απώλειας ισχύος, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες τιμές (εξίσωση (2.67)): $r_{load} = 7\%$, $r_{WT} = 40\%$ και $r_{PV} = 20\%$.

Πίνακας 3.3: Οριακές τιμές περιορισμών παραδείγματος εφαρμογής.

Π /	н <i>(</i>	TT /
Περιορισμος	Παραμετρος	Ιιμη
Αρχικό κόστος	IC_{max}	300000€
Απώλεια φορτίου	$f_{A\Phi max}$	0.5%
Απώλεια ισχύος	f_{AImax}	1.0%
Κατανάλωση καυσίμου ντήζελ	$FC_{angenmax}$	Δεν υπάρχει περιορισμός
Κατανάλωση καυσίμου βιοντήζελ	$FC_{angenmax}$	10000 L/y
Κατανάλωση καυσίμου μεθανόλης	$FC_{angenmax}$	10000 L/y
Κλάσμα ενέργειας τεχνολογιών ΑΠΕ	f_{RESmin}	50%

3.3 ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΤΑΜΠΟΥ

3.3.1 Εισαγωγή

Η αναζήτηση ταμπού (AT) είναι μια αποτελεσματική επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης, η οποία έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, ενώ η χρήση της έχει επεκταθεί και σε προβλήματα με συνεχείς μεταβλητές. Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε για πρώτη φορά σε πλήρη μορφή από τον Fred Glover το 1986 [3.2], συνδυάζοντας ιδέες οι οποίες είχαν προταθεί παλαιότερα, και χρησιμοποιεί μια λειτουργία που ονομάζεται **κίνηση**, η οποία καθορίζει τις γειτονικές λύσεις μιας δεδομένης λύσης. Η ΑΤ ξεκινά από μία εφικτή αρχική λύση και στη συνέχεια εξερευνά ένα σύνολο των λύσεων του προβλήματος μέσω μιας επαναληπτικής δημιουργίας κινήσεων από κάποια λύση σε μία επόμενη, ακολουθώντας τη φιλοσοφία του αλγορίθμου της μέγιστης κατάβασης [3.3].



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου ΑΤ.
Ένα βασικό χαρακτηριστικό της AT είναι η ικανότητά της να διαφεύγει από τα τοπικά ελάχιστα και την ανακύκλωση των λύσεων, που συνήθως αναγκάζουν σε πρόωρο τερματισμό τους απλούς αλγορίθμους κατάβασης. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας λίστας πεπερασμένου μεγέθους που παράγεται από την πρόσφατη ιστορία της αναζήτησης και εμπεριέχει απαγορευμένες κινήσεις που καλούνται κινήσεις ταμπού. Η βασική θεώρηση στην AT είναι ότι τα υποβέλτιστα σημεία, στα οποία ένας απλός αλγόριθμος μέγιστης κατάβασης τερματίζει, μπορούν να είναι καλύτερα σημεία έναρξης σε σχέση με μια τυχαία επανεκκίνηση της αναζήτησης, υπό την προϋπόθεση ότι τα τοπικά ελάχιστα δεν θα προσελκύσουν τις επόμενες λύσεις που θα υπολογιστούν [3.4].

Τα δύο βασικότερα συστατικά της ΑΤ είναι οι περιορισμοί της λίστας ταμπού και τα κριτήρια αναφοράς. Οι περιορισμοί της λίστας ταμπού μπορούν να διατυπωθούν είτε άμεσα με τη μορφή συγκεκριμένων απαγορευμένων κινήσεων, είτε έμμεσα ως ένα σύνολο από λογικές σχέσεις ή γραμμικές ανισότητες. Η λίστα ταμπού αναφέρεται επίσης και ως προσαρμοστική μνήμη, λόγω του ότι ορισμένες ιδιότητες της αναζήτησης παραμένουν προσωρινά αμετάβλητες όσο εμπεριέχονται μέσα στη λίστα ταμπού. Η εγγραφή των κινήσεων στη λίστα ταμπού γίνεται με τη σειρά που αυτές εκτελούνται κατά τη διάρκεια της αναζήτησης. Αν μια νέα κίνηση εισαχθεί στη λίστα ταμπού, η παλαιότερη κίνηση διαγράφεται από τη λίστα. Η κατάλληλη εκλογή του μεγέθους της λίστας ταμπού είναι μείζονος σημασίας για την επιτυχή εκτέλεση του αλγορίθμου, και εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα.

Τα κριτήρια αναφοράς μπορούν να υπερβούν τους περιορισμούς της λίστας ταμπού. Αυτό σημαίνει ότι εάν μια κίνηση είναι απαγορευμένη αλλά τα κριτήρια αναφοράς ικανοποιούνται, τότε η συγκεκριμένη κίνηση επανενεργοποιείται. Η κατάλληλη χρήση αυτών των κριτηρίων μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη της μέγιστης αποδοτικότητας στην ΑΤ. Αν και έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός κριτηρίων αναφοράς [3.5], το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο κριτήριο αφαιρεί από τη λίστα ταμπού μια κίνηση, όταν αυτή η κίνηση οδηγήσει σε μια λύση καλύτερη από τη βέλτιστη λύση που έχει βρεθεί μέχρι τότε.

Δύο επιπρόσθετα βασικά συστατικά της AT είναι οι στρατηγικές επίτασης και οι στρατηγικές διαφοροποίησης. Οι στρατηγικές επίτασης βασίζονται στην τροποποίηση των κανόνων επιλογής, έτσι ώστε να ενισχυθούν συνδυασμοί κινήσεων που το ιστορικό της αναζήτησης έχει δείξει ότι δίνουν καλά αποτελέσματα. Από την άλλη πλευρά, οι στρατηγικές διαφοροποίησης ενθαρρύνουν τη διαδικασία της αναζήτησης σε περιοχές λύσεων του προβλήματος που δεν έχουν εξερευνηθεί ακόμα, και βοηθούν επίσης στη δημιουργία λύσεων που διαφέρουν με ποικίλους τρόπους σε σχέση με αυτές που έχουν βρεθεί μέχρι στιγμής [3.5]. Η απλούστερη στρατηγική επίτασης και διαφοροποίησης είναι ο καθορισμός του μεγέθους της λίστας ταμπού. Μια λίστα μικρού μεγέθους επιτρέπει την εξερεύνηση λύσεων που βρίσκονται κοντά στο τοπικό ελάχιστο (επίταση), ενώ μια λίστα μεγαλύτερου μεγέθους μπορεί να βοηθήσει στη διαφυγή από τη γειτονιά ενός τοπικού ελάχιστου. Το συνολικό διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της ΑΤ φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

3.3.2 Προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης με ΑΤ και ανάλυση αποτελεσμάτων

Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου της ΑΤ στο πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης ενός ΜΑΣΗΕ, η γειτονιά μιας τρέχουσας λύσης αποτελείται από τις διατάξεις του συστήματος με παραπλήσιο μέγεθος εξαρτημάτων, καθώς και με τις εναλλακτικές στρατηγικές συνεργασίας μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών. Συγκεκριμένα, για κάθε εξάρτημα του ΜΑΣΗΕ μια κίνηση ορίζεται ως η επιλογή του αμέσως επόμενου μεγέθους (εάν είναι επιτρεπτή) και του αμέσως προηγούμενου μεγέθους (εάν είναι επιτρεπτή) σε σχέση με την ποσότητα του εξαρτήματος της τρέχουσας λύσης, ενώ για τη στρατηγική συνεργασίας γεννητριών και συσσωρευτών μια κίνηση ορίζεται ως η επιλογή των 3 εναλλακτικών στρατηγικών σε σχέση με την τρέχουσα στρατηγική. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο μέγιστος αριθμός διατάξεων του συστήματος που ανήκουν στη γειτονιά μιας τρέχουσας λύσης είναι 17, δεδομένου ότι το σύστημα αποτελείται από 7 διαφορετικά εξαρτήματα (ΑΓ, ΦΒ, ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, κυψέλες καυσίμου, συσσωρευτές και μετατροπείς). Μετά τον ορισμό των εναλλακτικών διατάξεων που ανήκουν στη γειτονιά μιας τρέχουσας λύσης του ακολουθεί συμμετέχουν μόνο οι λύσεις που ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος.





Η δημιουργία της αρχικής εφικτής λύσης, η οποία είναι απαραίτητη για την επιτυχή εκτέλεση του αλγορίθμου, έγινε με τυχαία αναζήτηση στο χώρο των λύσεων του προβλήματος. Η αρχική αυτή λύση χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δοκιμές του αλγορίθμου και περιλαμβάνει 4 AΓ, 13 ΦB, 20 kW ντηζελογεννήτριας με καύσιμο ντήζελ, 35 kW ντηζελογεννήτριας με καύσιμο βιοντήζελ, 20 kW κυψελών καυσίμου, 100 συσσωρευτές, 12 kW μετατροπέων και στρατηγική παρακολούθησης φορτίου, ενώ παρουσιάζει KHE ίσο με 0.30332 €/kWh. Οι παράμετροι της AT που εξετάστηκαν είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου και το μέγεθος της λίστας ταμπού. Ο αριθμός επαναλήψεων διατηρήθηκε ίσος με 150, καθώς εντός αυτού παρουσιάστηκαν τα βέλτιστα αποτελέσματα για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν. Η εξέλιξη του αλγορίθμου της AT για διαφορετικά μεγέθη της λίστας ταμπού φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται η διαμόρφωση του ΜΑΣΗΕ και ο αριθμός των επαναλήψεων της AT για τις βέλτιστες λύσεις κάθε μεγέθους της λίστας ταμπού. Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων διαπιστώνεται ότι το βέλτιστο μέγεθος λίστας ταμπού είναι ίσο με 4, επειδή αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή του ΚΗΕ. Η επιλογή μικρότερου μεγέθους λίστας ταμπού έχει ως αποτέλεσμα την ανακύκλωση των λύσεων γύρω από ένα τοπικό ελάχιστο, ενώ η επιλογή μεγαλύτερου μεγέθους λίστας ταμπού έχει ως αποτέλεσμα τη μη ενδελεχή αναζήτηση στην περιοχή της βέλτιστης λύσης. Ο συνολικός αριθμός των προσομοιώσεων λειτουργίας του ΜΑΣΗΕ που εκτελέστηκαν στις 150 επαναλήψεις του αλγορίθμου για μέγεθος λίστας ταμπού ίσο με 4 ήταν 2419.

Πίνακας 3.4: Βέλτιστες λύσεις του αλγορίθμου της ΑΤ για διαφορετικά μεγέθη λίστας ταμπού.

Μέγεθος			Βέλ	τιστη διό	ίταξη σ	υστατικ	ών του Μ	ΑΣΗΕ		Απόκλιση	Αριθμός
λίστας	٨Г	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο	επανάληψης
ταμπού	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)	AT
2	8	7	20	7.5	0	110	36	ΠФ	0.22852	0.99	36
4	8	1	25	5	0	90	36	ΠФ	0.22629	0.00	126
7	9	4	20	7.5	0	100	42	ΠФ	0.22844	0.95	44
10	9	0	25	0	4	90	38	ΠФ	0.22713	0.37	128

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

3.4 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

3.4.1 Εισαγωγή

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) είναι τεχνικές αναζήτησης της βέλτιστης λύσης εμπνευσμένες από τις αρχές της φυσικής επιλογής και της γενετικής. Οι αλγόριθμοι αυτοί λειτουργούν πάνω σε ένα πληθυσμό υποψήφιων λύσεων, και κωδικοποιούν το σύνολο των παραμέτρων του προβλήματος υπό τη μορφή συμβολοσειράς, όπου σε αναλογία με τη βιολογία, οι μεταβλητές αναπαρίστανται ως γονίδια σε ένα χρωμόσωμα. Ο πληθυσμός εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου χρησιμοποιώντας τους νόμους της φυσικής επιλογής (επιβίωση του ισχυρότερου) και του ανασυνδυασμού του γενετικού υλικού μέσα στον πληθυσμό. Στόχος των γενετικών αλγορίθμων είναι, καθώς ο πληθυσμός εξελίσσεται από γενιά σε γενιά, να βελτιώνουν την ποιότητα των λύσεων και τελικά μετά από ένα αριθμό γενεών να καταλήξουν σε βέλτιστες λύσεις για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Οι ΓΑ αποτελούν την πιο διαδεδομένη κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων, οι οποίοι μιμούνται αρχές της βιολογικής εξέλιξης σε διαδικασίες αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Εκτός από τους ΓΑ, στην κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων περιλαμβάνεται ένας μεγάλος αριθμός προσεγγίσεων, όπως οι εξελικτικές στρατηγικές [3.6] και ο εξελικτικός προγραμματισμός [3.7]. Οι ΓΑ παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά το 1975 από τον John Holland [3.8], αλλά το σημαντικότερο γεγονός που συνέβαλε στη μεγάλη δημοτικότητά τους ήταν η έκδοση του βιβλίου του David Goldberg "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning" το 1989 [3.9]. Οι ΓΑ ταξινομούνται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. Στους ΓΑ δυαδικής κωδικοποίησης, οι οποίοι δανείζονται την αρχή λειτουργίας τους απευθείας από τους μηχανισμούς βιολογικής εξέλιξης, καθώς οι μεταβλητές του προβλήματος αναπαρίστανται από ένα συνδυασμό δυαδικών ψηφίων (0 και 1). Οι ΓΑ δυαδικής κωδικοποίησης χρησιμοποιούνται συνήθως στην επίλυση προβλημάτων που αποτελούνται από διακριτές μεταβλητές.

2. Στους ΓΑ πραγματικής κωδικοποίησης, που αν και παρουσιάζουν αντίστοιχη αρχή λειτουργίας με τους ΓΑ δυαδικής κωδικοποίησης, αναπαριστούν τις μεταβλητές του προβλήματος ως αριθμούς κινητής υποδιαστολής που βρίσκονται μέσα σε ένα οποιοδήποτε εύρος κρίνεται απαραίτητο. Οι ΓΑ πραγματικής κωδικοποίησης χρησιμοποιούνται συνήθως στην επίλυση προβλημάτων με συνεχείς μεταβλητές.

Η κατηγορία των ΓΑ που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης ενός ΜΑΣΗΕ είναι οι ΓΑ δυαδικής κωδικοποίησης, καθώς το συγκεκριμένο πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, και επομένως απαρτίζεται από διακριτές μεταβλητές. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται το διάγραμμα ροής ενός ΓΑ δυαδικής κωδικοποίησης.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής ΓΑ δυαδικής κωδικοποίησης.

Κατά την αρχική γενιά gn = 0 ενός ΓΑ, η διαδικασία αναζήτησης ξεκινά με τη δημιουργία ενός τυχαίου αρχικού πληθυσμού, που στην περίπτωση των ΓΑ δυαδικής κωδικοποίησης αποτελείται από ένα τυχαίο σύνολο δυαδικών μεταβλητών. Στη συνέχεια ακολουθεί η μετατροπή της δυαδικής τιμής των μεταβλητών του προβλήματος σε πραγματικούς αριθμούς, μέσω της διαδικασίας της αποκωδικοποίησης του χρωμοσώματος. Στους ΓΑ δυαδικής κωδικοποίησης, εκτός από τη συμβατική δυαδική κωδικοποίηση είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και η κωδικοποίηση Gray, η οποία επαναπροσδιορίζει τους δυαδικούς αριθμούς, έτσι ώστε δύο διαδοχικοί αριθμοί να διαφέρουν μεταξύ τους κατά ένα δυαδικό ψηφίο, ή ισοδύναμα να έχουν απόσταση Hamming ίση με ένα [3.10]. Στον Πίνακα 3.5 αναπαριστάνεται η συμβατική δυαδική κωδικοποίηση και η κωδικοποίηση Gray για τους ακέραιους αριθμούς 0 έως 7. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, όλοι οι διαδοχικοί αριθμοί στην κωδικοποίηση Gray έχουν απόσταση Hamming ίση με ένα, κάτι που δεν ισχύει στη συμβατική δυαδική κωδικοποίηση, όπου παρατηρείται απόσταση Hamming ίση με τρία ανάμεσα στους ακέραιους 3 και 4. Η παραπάνω ιδιότητα της κωδικοποίησης Gray έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτερη σύγκλισή της σε σχέση με τη συμβατική δυαδική κωδικοποίηση για ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων που επιλύονται με ΓΑ [3.11].

Ακέραιος αριθμός	Συμβατική δυαδική κωδικοποίηση	Κωδικοποίηση Gray
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

Πίνακας 3.5: Συμβατική δυαδική κωδικοποίηση και κωδικοποίηση Gray για τους ακέραιους αριθμούς 0 έως 7.

Στο επόμενο στάδιο εκτέλεσης του ΓΑ, για κάθε μέλος του πληθυσμού N_{pop} προσδιορίζεται μια συνάρτηση καταλληλότητας, η οποία λαμβάνει υπόψη την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς και τις παραβιάσεις των περιορισμών (εάν υπάρχουν). Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η συνάρτηση καταλληλότητας δεν πρέπει να συγχέεται με την αντικειμενική συνάρτηση, καθώς η αντικειμενική συνάρτηση δίνει ένα μέτρο της απόδοσης ως προς το συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων του προβλήματος, ενώ η συνάρτηση καταλληλότητας μετασχηματίζει το μέτρο της απόδοσης σε μία κατανομή ευκαιριών αναπαραγωγής του πληθυσμού N_{pop} .

Μετά τον προσδιορισμό της συνάρτησης καταλληλότητας γίνεται έλεγχος του κριτηρίου τερματισμού του ΓΑ, το οποίο είτε σχετίζεται με την εκτέλεση ενός προκαθορισμένου αριθμού γενεών, είτε με την ικανοποίηση της συνθήκης του να παραμένει σταθερός για ένα μεγάλο αριθμό γενεών ο βαθμός καταλληλότητας του καλύτερου χρωμοσώματος. Εάν το κριτήριο τερματισμού δεν ικανοποιείται, ο πληθυσμός των λύσεων τροποποιείται μέσω τριών μηχανισμών, και ένας καινούργιος και πιθανόν καλύτερος πληθυσμός δημιουργείται.

Ο πρώτος μηχανισμός τροποποίησης των λύσεων είναι αυτός της επιλογής, που έχει ως στόχο να δημιουργήσει αντίγραφα των καλών λύσεων και να απομακρύνει τις λιγότερο καλές λύσεις του πληθυσμού, διατηρώντας παράλληλα το μέγεθος του πληθυσμού N_{pop} σταθερό. Από την πληθώρα μηχανισμών επιλογής που απαντώνται στη βιβλιογραφία, στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιούνται η επιλογή τουρνουά και η καθολική στοχαστική δειγματοληψία. Τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο παραπάνω μεθόδων είναι η ευρεία χρήση τους και ο ελιτισμός, ο οποίος εξασφαλίζει τη διατήρηση στην επόμενη γενιά του αλγορίθμου τουλάχιστον εκείνης της λύσης που παρουσιάζει τη βέλτιστη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας. Η μέθοδος της επιλογής τουρνουά είναι ιδιαίτερα δημοφιλής λόγω της γρήγορης σύγκλισης του ΓΑ που επιτυγχάνει, καθώς και λόγω της μειωμένης υπολογιστικής πολυπλοκότητας που απαιτεί [3.12]. Κατά την εφαρμογή της, διοργανώνονται αγώνες ανάμεσα σε δύο συνήθως λύσεις, και η καλύτερη από αυτές επιλέγεται και τοποθετείται στο σύνολο γονέων N_{par}. Στην περίπτωση που το πρόβλημα δεν περιλαμβάνει περιορισμούς, επικρατεί η λύση με την καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Στην περίπτωση που το πρόβλημα εμπεριέχει περιορισμούς, κατά τη σύγκριση δύο λύσεων x_(i) και x_(j) μπορεί λάβει χώρα ένα από τα ακόλουθα ενδεχόμενα:

- 1. Η λύση $x_{(i)}$ ικανοποιεί τους περιορισμούς ενώ η λύση $x_{(j)}$ δεν τους ικανοποιεί, οπότε η $x_{(i)}$ επικρατεί της $x_{(j)}$.
- 2. Η λύση $x_{(i)}$ ικανοποιεί τους περιορισμούς ενώ η λύση $x_{(i)}$ δεν τους ικανοποιεί, οπότε η $x_{(j)}$ επικρατεί της $x_{(i)}$.
- Και οι δύο λύσεις παραβιάζουν τους περιορισμούς, οπότε επικρατεί η λύση με τη μικρότερη παραβίαση των περιορισμών.
- Και οι δύο λύσεις ικανοποιούν τους περιορισμούς, οπότε επικρατεί η λύση με τη καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης.

Εάν η επιλογή τουρνουά εφαρμοστεί με σωστό τρόπο, κάθε λύση του πληθυσμού θα λάβει μέρος σε δύο τουρνουά. Η καλύτερη λύση του πληθυσμού θα νικήσει και τις δύο φορές, ενώ η χειρότερη λύση του πληθυσμού θα ηττηθεί και τις δύο φορές, και επομένως θα αποκλειστεί από το σύνολο γονέων N_{par}.

Η μέθοδος της καθολικής στοχαστικής δειγματοληψίας ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των μεθόδων αναλογικής επιλογής, στις οποίες ο αριθμός των λύσεων που εισάγονται στο σύνολο γονέων N_{par} είναι ανάλογος με την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητάς τους. Συγκεκριμένα, εάν η μέση τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας του πληθυσμού είναι f_{avg} , μια λύση $x_{(i)}$ με συνάρτηση καταλληλότητας $f_{x(i)}$ θα περιλαμβάνει στο σύνολο γονέων N_{par} έναν αναμενόμενο αριθμό από $f_{x(i)}/f_{avg}$ αντίγραφα. Η γραφική επεξήγηση της μεθόδου καθολικής στοχαστικής δειγματοληψίας δίνεται στο Σχήμα 3.4 για ένα πληθυσμό που περιλαμβάνει $N_{pop} = 5$ λύσεις. Η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας κάθε λύσης είναι ανάλογη του εμβαδού που καταλαμβάνει. Υποθέτοντας ότι το μήκος της περιφέρειας του κύκλου είναι ίσο με τη μονάδα, η πρώτη λύση επιλέγεται ανάλογα με την θέση ενός ομοιόμορφα κατανεμημένου τυχαίου αριθμού rnd(0, 1) που παίρνει τιμές στο διάστημα (0, 1). Οι υπόλοιπες λύσεις επιλέγονται με τη διάσχιση ίσων αποστάσεων μήκους $1/N_{pop}$ κατά μήκος της περιφέρειας του κύκλου, σε σχέση με την πρώτη λύση.



Σχήμα 3.4: Διαδικασία επιλογής με τη μέθοδο της καθολικής στοχαστικής δειγματοληψίας.

57

Ο μηχανισμός επιλογής δεν δημιουργεί νέες λύσεις, οι οποίες είναι απαραίτητες για την εξέλιξη του ΓΑ, αλλά δημιουργεί αντίγραφα των καλών λύσεων του πληθυσμού N_{pop} σε βάρος των όχι τόσο καλών λύσεων. Η δημιουργία νέων λύσεων, οι οποίες ονομάζονται **απόγονοι** και συνιστούν το σύνολο N_{off} , επιτυγχάνεται με τους μηχανισμούς διασταύρωσης και μετάλλαξης. Στην πλειονότητα των μηχανισμών διασταύρωσης που προτείνονται στη βιβλιογραφία [3.13], επιλέγονται τυχαία δύο μέλη του πληθυσμού γονέων N_{par} , και στη συνέχεια εκτελείται ανταλλαγή ορισμένων τμημάτων των χρωμοσωμάτων τους, έτσι ώστε να δημιουργηθούν δύο νέα χρωμοσώματα. Στην παρούσα διατριβή εξετάζονται δύο μηχανισμοί διασταύρωσης: η διασταύρωση ενός σημείου και η ομοιόμορφη διασταύρωση.

Η διασταύρωση ενός σημείου γίνεται σε δύο φάσεις: πρώτα επιλέγεται τυχαία το σημείο διασταύρωσης (π.χ., το σημείο 3 για το παράδειγμα του Σχήματος 3.5) και μετά τα δύο χρωμοσώματα-γονείς ανταλλάσουν όλα τα γονίδια που έπονται του σημείου διασταύρωσης. Έτσι, στο παράδειγμα του Σχήματος 3.5, το κάθε ένα από τα δύο χρωμοσώματα των απογόνων κληρονομεί τα τρία πρώτα του γονίδια από τον πρώτο γονέα και τα υπόλοιπα πέντε γονίδια από το δεύτερο γονέα.

Στην ομοιόμορφη διασταύρωση, κάθε γονίδιο θεωρείται ως ένα πιθανό σημείο διασταύρωσης. Συγκεκριμένα, οι δύο γονείς ανταλλάσουν ένα γονίδιό τους αν ένας αριθμός, που επιλέγεται τυχαία στο διάστημα [0, 1], είναι μικρότερος από μία προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου, που συνήθως είναι ίση με 0.5. Στο παράδειγμα του Σχήματος 3.5, οι δύο γονείς ανταλλάσουν το δεύτερο, τέταρτο, πέμπτο και έβδομο γονίδιό τους, ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα γονίδιά τους παραμένουν αμετάβλητα.

			Γ	ovei	ίς			Απόγονοι									
Δι	αστ	αύρ	ωσι	l evç	ός σι	ημεί	ίου										
1 0	1 0	0 1	0 0	0 1	1 0	0 1	1 1	1 0	1 0	0 1	0 0	1 0	0 1	1 0	1 1		
OĻ	ιοιό	pop	φη	διασ	σταί	δρω	ση										
0 0	\downarrow 1 1	0 1	$\begin{array}{c} \downarrow \\ 0 \\ 1 \end{array}$	$\begin{array}{c} \downarrow \\ 0 \\ 0 \end{array}$	0 0	\downarrow 1 0	0 1	0 0	1 1	0 1	1 0	0 0	0 0	0 1	0 1		

Σχήμα 3.5: Παραδείγματα διασταύρωσης ενός σημείου και ομοιόμορφης διασταύρωσης.

Μετά το μηχανισμό διασταύρωσης εφαρμόζεται ο μηχανισμός μετάλλαξης. Η μετάλλαξη πραγματοποιεί, με μικρή πιθανότητα p_m , την αλλαγή από "0" σε "1" και αντιστρόφως τυχαία επιλεγμένων δυαδικών ψηφίων των γονέων. Τυπικά ο ρυθμός μετάλλαξης εφαρμόζεται με πιθανότητα μικρότερη από 10%. Η μετάλλαξη είναι απαραίτητη διότι, παρόλο που οι μηχανισμοί επιλογής και διασταύρωσης πραγματοποιούν αποδοτική αναζήτηση και ανασυνδυάζουν το υφιστάμενο γενετικό υλικό, περιστασιακά ίσως χάνουν πιθανόν χρήσιμο γενετικό υλικό ("0" ή "1" σε συγκεκριμένες θέσεις). Μετά το πέρας της διαδικασίας μετάλλαξης, η γενιά gn του ΓΑ αυξάνεται κατά ένα, και στη συνέχεια λαμβάνουν χώρα οι διαδικασίες αποκωδικοποίησης χρωμοσώματος και υπολογισμού της συνάρτησης καταλληλότητας του νέου πληθυσμού.

3.4.2 Προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης με ΓΑ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία εύρεσης της βέλτιστης λύσης με ΓΑ για το παράδειγμα εφαρμογής. Συγκεκριμένα, θα αναλυθούν οι διαδικασίες αναπαράστασης του χρωμοσώματος και κανονικοποίησης των περιορισμών, καθώς και ο τρόπος ορισμού της συνάρτησης καταλληλότητας κατά την εφαρμογή της μεθόδου καθολικής στοχαστικής δειγματοληψίας.

Όσον αφορά την αναπαράσταση του χρωμοσώματος, κάθε χρωμόσωμα απαρτίζεται από 8 γονίδια, εκ των οποίων τα 7 πρώτα αναφέρονται στο μέγεθος των εξαρτημάτων του ΜΑΣΗΕ (ΑΓ, ΦΒ, ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, κυψέλες καυσίμου, συσσωρευτές και μετατροπείς), ενώ το όγδοο γονίδιο αναφέρεται στη στρατηγική συνεργασίας μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών. Ο αριθμός των δυαδικών ψηφίων N_{geneparam} σε κάθε γονίδιο του χρωμοσώματος καθορίζεται από το συνολικό αριθμό επιλογών N_{maxparam} που υπάρχει για κάθε μία από τις 8 παραμέτρους του ΜΑΣΗΕ που αναφέρθηκαν παραπάνω, σύμφωνα με τη σχέση:

$$N_{geneparam} = \operatorname{ceil}(\log_2(N_{maxparam}))$$
(3.2)

όπου ceil(x) είναι η συνάρτηση υπολογισμού του αμέσως μεγαλύτερου ακέραιου ενός αριθμού x. Οι τιμές του $N_{geneparam}$ για κάθε συστατικό του συστήματος δίνονται στον Πίνακα 3.6, από όπου προκύπτει ότι το χρωμόσωμα αποτελείται από 33 συνολικά δυαδικά ψηφία. Κατά τη διαδικασία αποκωδικοποίησης του χρωμοσώματος ενός εξαρτήματος του ΜΑΣΗΕ, οι δυαδικοί αριθμοί μετατρέπονται αρχικά σε ακέραιους, ενώ στη συνέχεια ο ακέραιος αριθμός 0 αντιστοιχεί στην μικρότερη τιμή μεγέθους του εξαρτήματος, ο ακέραιος αριθμός 1 στην αμέσως μεγαλύτερη, κλπ. Όσον αφορά τη στρατηγική συνεργασίας γεννητριών και συσσωρευτών, η δυαδική τιμή 00 αντιστοιχεί στη στρατηγική παρακολούθησης φορτίου (ΠΦ), ενώ οι δυαδικές τιμές 01, 10 και 11 αντιστοιχούν στη στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή με σημείο κατάστασης φόρτισης SOC_{cc} ίσο με 80%, 90% και 100%, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 3.6 δείχνεται ένα παράδειγμα αναπαράστασης και αποκωδικοποίησης ενός χρωμοσώματος του ΓΑ, χρησιμοποιώντας συμβατική δυαδική αποκωδικοποίηση.

Παράμετρος ΜΑΣΗΕ	N _{maxparam}	$N_{geneparam}$
ΑΓ	11	4
ΦΒ	61	6
Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ	12	4
Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ	12	4
Κυψέλες καυσίμου	11	4
Συσσωρευτές	16	4
Μετατροπείς	31	5
Στρατηγική συνεργασίας γεννητριών-συσσωρευτών	4	2

Πίνακας 3.6: Αριθμός δυαδικών ψηφίων N_{geneparam} σε κάθε γονίδιο του χρωμοσώματος.

1	4ρι /	θμα \Γ	ός		N	Λέη Φ	γεθ PB	ος		Γε	ενν ντή	ήτρ ζεί	nα λ	Γa βı	evv lov	ήτρ τήζ	οια ελ	k к	ζυψ αυσ	ιέλ σίμο	.η ου	Σ	ίυσ ρει	σα πέ)-	М	ετα	ιτρ	οπι	είς	Στ γυ	:ρα κή	.τη-
0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	
C	(\checkmark		L		(\checkmark				(\sim		Ĺ	(\sim				\sim		Ĺ		γ	_		5	~)
	5	AΓ			4	42	kW	р			51	εW			25	kW	1		361	kW	1	1	30	συ	σ.		12	2 k	W		Π	Φ	

Σχήμα 3.6: Αναπαράσταση και αποκωδικοποίηση χρωμοσώματος του παραδείγματος εφαρμογής.

Η διαχείριση των περιορισμών σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με ΓΑ μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους [3.14], εκ των οποίων η πιο συνηθισμένη είναι ο υπολογισμός μιας συνάρτησης τιμωρίας, η οποία επιβάλλει ποινή στις μη εφικτές λύσεις του προβλήματος ανάλογη με τη συνολική παραβίαση των περιορισμών. Λόγω του ότι διαφορετικοί περιορισμοί μπορούν να λάβουν τιμές διαφορετικής τάξης μεγέθους, συνίσταται να γίνεται κανονικοποίηση των παραβιάσεων στους περιορισμούς μιας λύσης, πριν την άθροισή τους για τον υπολογισμό της συνολικής συνάρτησης τιμωρίας *pentot*. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την κανονικοποίηση των τιμών παραβιάσεων των περιορισμών μιας μη εφικτής λύσης είναι η ακόλουθη:

1. Στον περιορισμό του αρχικού κόστους *IC* του συστήματος, η κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης *pen_{IC}* υπολογίζεται ως εξής:

$$pen_{IC} = \begin{cases} \frac{IC - IC_{max}}{IC_{max}} & \epsilon \acute{\alpha} v \quad IC > IC_{max} \\ 0 & \epsilon \acute{\alpha} v \quad IC \le IC_{max} \end{cases}$$
(3.3)

όπου IC_{max} είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή αρχικού κόστους.

 Στον περιορισμό της μέγιστης ετήσιας απώλειας φορτίου, η κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης pen_{AΦ} υπολογίζεται ως εξής:

$$pen_{A\Phi} = \begin{cases} f_{A\Phi} - f_{A\Phi max} & \epsilon \dot{\alpha} v & f_{A\Phi} > f_{A\Phi max} \\ 0 & \epsilon \dot{\alpha} v & f_{A\Phi} \le f_{A\Phi max} \end{cases}$$
(3.4)

όπου $f_{A\Phi}$ είναι το κλάσμα της απώλειας φορτίου και $f_{A\Phi max}$ είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο κλάσμα της απώλειας φορτίου.

 Στον περιορισμό της μέγιστης ετήσιας απώλειας ισχύος, η κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης pen_{AI} υπολογίζεται ως εξής:

$$pen_{\rm AI} = \begin{cases} f_{\rm AI} - f_{\rm AImax} & \epsilon \acute{\alpha} v \quad f_{\rm AI} > f_{\rm AImax} \\ 0 & \epsilon \acute{\alpha} v \quad f_{\rm AI} \le f_{\rm AImax} \end{cases}$$
(3.5)

όπου f_{AI} είναι το κλάσμα της απώλειας ισχύος και f_{AImax} είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο κλάσμα της απώλειας ισχύος.

 Στον περιορισμό της μέγιστης ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου από μια γεννήτρια gen του ΜΑΣΗΕ, η κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης pen_{FCgen} υπολογίζεται ως εξής:

$$pen_{FCgen} = \begin{cases} \frac{\sum_{\Delta t}^{\text{year}} FC_{gen\Delta t} - FC_{angenmax}}{FC_{angenmax}} & \epsilon \acute{\alpha}v & \sum_{\Delta t}^{\text{year}} FC_{gen\Delta t} > FC_{angenmax} \\ 0 & \epsilon \acute{\alpha}v & \sum_{\Delta t}^{\text{year}} FC_{gen\Delta t} \le FC_{angenmax} \end{cases}$$
(3.6)

όπου $FC_{gen\Delta t}$ είναι η κατανάλωση καυσίμου της γεννήτριας gen κατά το χρονικό βήμα Δt της προσομοίωσης, και $FC_{angenmax}$ είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ετήσια κατανάλωση καυσίμου της γεννήτριας gen. Στο παράδειγμα εφαρμογής, ο περιορισμός αυτός ισχύει για τη ντηζελογεννήτρια με καύσιμο το βιοντήζελ και για την κυψέλη καυσίμου.

5. Στον περιορισμό της ελάχιστης ετήσιας ενέργειας που παράγεται από τεχνολογίες ΑΠΕ, η κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης *pen_{fRES}* υπολογίζεται ως εξής:

$$pen_{fRES} = \begin{cases} \frac{f_{RESmin} - f_{RES}}{f_{RESmin}} & \epsilon \acute{\alpha} v \quad f_{RES} < f_{RESmin} \\ 0 & \epsilon \acute{\alpha} v \quad f_{RES} \ge f_{RESmin} \end{cases}$$
(3.7)

όπου f_{RES} είναι το κλάσμα της παραγόμενης ενέργειας από τεχνολογίες ΑΠΕ, και f_{RESmin} είναι το ελάχιστο επιτρεπόμενο κλάσμα της παραγόμενης ενέργειας από τεχνολογίες ΑΠΕ.

6. Στους περιορισμούς του μεγέθους των συστατικών του ΜΑΣΗΕ, η κανονικοποιημένη τιμή παραβίασης pensizecomp ενός εξαρτήματος comp του συστήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$pen_{sizecomp} = \begin{cases} \frac{size_{comp} - size_{compmax}}{size_{compmax}} & \epsilon \alpha v \quad size_{comp} > size_{compmax} \\ 0 & \epsilon \alpha v \quad size_{comp} \leq size_{compmax} \end{cases}$$
(3.8)

όπου size_{comp} είναι το μέγεθος του κάθε εξαρτήματος comp του συστήματος, και size_{compmax} είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος. Η παραβίαση του περιορισμού αυτού μπορεί να συμβεί επειδή κατά τη διαδικασία αποκωδικοποίησης του χρωμοσώματος ενός εξαρτήματος του MAΣHE είναι δυνατό να προκύψει τιμή μεγαλύτερη από το size_{compmax}, εάν ο συνολικός αριθμός των μεγεθών ενός εξαρτήματος είναι μικρότερος του συνολικού αριθμού αντιμεταθέσεων των δυαδικών ψηφίων του αντίστοιχου χρωμοσώματος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των ντηζελογεννητριών ο συνολικός αριθμός των μεγεθών τους είναι 12 (Πίνακας 3.2), ενώ ο συνολικός αριθμός των αντιμεταθέσεων στο χρωμόσωμά τους είναι 2⁴ = 16, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 3.6. Εάν κατά την αποκωδικοποίηση του χρωμοσώματος ληφθεί ακέραιη τιμή ανάμεσα στο 13 και το 16, οι τιμές size_{comp} που αντιστοιχίζονται είναι μεγαλύτερες από τη τιμή του size_{compmax} (50 kW), και δίνονται στον Πίνακα 3.7. Αντίστοιχη φιλοσοφία μοντελοποίησης ακολουθείται και για τα υπόλοιπα εξαρτήματα του ΜΑΣΗΕ.

Πίνακας 3.7: Αντιστοιχία μεταξύ της ακέραιης τιμής που προκύπτει από την αποκωδικοποίηση του χρωμοσώματος και του μεγέθους της ντηζελογεννήτριας *size_{comp}*.

Ακέραιη τιμή	$size_{comp}$ (kW)
13	60
14	70
15	80
16	90

Σχετικά με τον ορισμό της συνάρτησης καταλληλότητας κατά την εφαρμογή της μεθόδου καθολικής στοχαστικής δειγματοληψίας, χρειάζεται να ικανοποιούνται τα ακόλουθα κριτήρια:

- Στις λύσεις που ικανοποιούν τους περιορισμούς, πρέπει να αντιστοιχούν μεγάλες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας για μικρές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης.
- Κάθε λύση που δεν ικανοποιεί τους περιορισμούς πρέπει να έχει μικρότερη τιμή συνάρτησης καταλληλότητας από οποιαδήποτε εφικτή λύση του πληθυσμού N_{pop}.

Για την ικανοποίηση των παραπάνω κριτηρίων, στις εφικτές λύσεις $x_{(i)}$ αντιστοιχεί η ακόλουθη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας $f_{x(i)}$:

$$f_{x(i)} = \frac{1}{\text{KHE}}$$
(3.9)

όπου KHE είναι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας σε \mathcal{E} /kWh, ενώ στις μη εφικτές λύσεις $x_{(j)}$ αντιστοιχεί η ακόλουθη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας $f_{x(j)}$:

$$f_{x(j)} = \frac{1}{\max(\text{KHE})_{feas} + pen_{totx(j)}}$$
(3.10)

όπου max(KHE)_{feas} είναι η μέγιστη τιμή του KHE για τις εφικτές λύσεις ενός δεδομένου πληθυσμού N_{pop} , και $pen_{totx(j)}$ είναι η τιμή της συνολικής συνάρτησης τιμωρίας για τη μη εφικτή λύση $x_{(j)}$. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι τιμές των max(KHE)_{feas} και $pen_{totx(j)}$ κυμαίνονται στην ίδια τάξη μεγέθους, και επομένως είναι λογική η απευθείας πρόσθεσή τους.



Σχήμα 3.7: Επίδραση του πληθυσμού N_{pop} στη σύγκλιση του ΓΑ (κώδικας Gray, επιλογή τουρνουά, ομοιόμορφη διασταύρωση, ρυθμός μετάλλαξης 0.01), (α) σύγκριση περιπτώσεων $N_{pop} = 50$, gn = 50 και $N_{pop} = 30$, gn = 90, (β) σύγκριση περιπτώσεων $N_{pop} = 50$, gn = 50 και $N_{pop} = 100$, gn = 25.

			Βέλ	.τιστη διό	ίταξη σ	υστατικ	ών του Μ	ΑΣΗΕ		Απόκλιση	Αριθμός
N_{pop}	٨F	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	S 2	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο	υπολογισμών
	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)	KHE
30	8	3	20	5	4	90	36	ΠФ	0.22748	0.50	2730
50	9	0	25	5	0	100	38	ΠФ	0.22635	0.00	2550
100	7	6	25	5	0	90	32	$\Pi \Phi$	0.22905	1.19	2600

Πίνακας 3.8: Βέλτιστες λύσεις του ΓΑ για διαφορετικούς πληθυσμούς N_{pop} (κώδικας Gray, επιλογή τουρνουά, ομοιόμορφη διασταύρωση, ρυθμός μετάλλαξης 0.01).

3.4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Για την αναζήτηση της βέλτιστης επίδοσης του ΓΑ, οι παράμετροι που ελέγχονται είναι ο πληθυσμός N_{pop} , ο αριθμός των γενεών gn, ο τύπος κωδικοποίησης, ο μηχανισμός επιλογής, ο τύπος της διασταύρωσης και ο ρυθμός μετάλλαξης. Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται η εξέλιξη του ΓΑ για πληθυσμούς N_{pop} ίσους με 30, 50 και 100, στους οποίους ο αριθμός γενεών gn έχει ληφθεί ίσος με 90, 50 και 25 αντίστοιχα, έτσι ώστε ο συνολικός αριθμός προσομοιώσεων που εκτελούνται να μη διαφοροποιείται σημαντικά. Επιπλέον, στον Πίνακα 3.8 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα για κάθε περίπτωση. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί, η χρησιμοποίηση πληθυσμού N_{pop} = 50 παρουσιάζει την ταχύτερη σύγκλιση και επιπλέον δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα (ελάχιστο KHE).

Στο Σχήμα 3.8 και στον Πίνακα 3.9 παρουσιάζεται η σύγκριση των εναλλακτικών τύπων κωδικοποίησης του ΓΑ, διατηρώντας όμοιες τιμές στις υπόλοιπες παραμέτρους. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το Σχήμα 3.8, το μεγάλο πλεονέκτημα της κωδικοποίησης Gray είναι η σημαντικά ταχύτερη σύγκλιση που επιτυγχάνει, ενώ οι τελικές λύσεις των ΓΑ είναι ουσιαστικά ισοδύναμες (Πίνακας 3.9).



Σχήμα 3.8: Επίδραση του τύπου κωδικοποίησης στη σύγκλιση του ΓΑ (N_{pop} = 50, gn = 50, επιλογή τουρνουά, ομοιόμορφη διασταύρωση, ρυθμός μετάλλαξης 0.01),
(α) συμβατική δυαδική κωδικοποίηση, (β) κωδικοποίηση Gray.

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

Vasuro			Βέλ	πιστη διό	ιταξη σ	υστατικ	ών του Μ	ΑΣΗΕ		Απόκλιση
κωσικο- ποίηση	٨Г	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο
nouloit	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)
Δυαδική	9	0	30	0	0	100	38	ΠФ	0.22765	0.57
Gray	9	0	25	5	0	100	38	ΠФ	0.22635	0.00

Πίνακας 3.9: Βέλτιστες λύσεις του ΓΑ για διαφορετικό τύπο κωδικοποίησης ($N_{pop} = 50, gn = 50, eπιλογή$ τουρνουά, ομοιόμορφη διασταύρωση, ρυθμός μετάλλαξης 0.01).

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

Η επίδραση του μηχανισμού επιλογής στη σύγκλιση του ΓΑ φαίνεται στο Σχήμα 3.9, ενώ στον Πίνακα 3.10 παρουσιάζονται οι βέλτιστες λύσεις στην 50^η γενιά του αλγορίθμου. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι αν και η μέθοδος της καθολικής στοχαστικής δειγματοληψίας προσφέρει οριακά καλύτερο τελικό αποτέλεσμα (Πίνακας 3.10), η μέθοδος της επιλογής τουρνουά προσφέρει σημαντικά ταχύτερη σύγκλιση του ΓΑ (Σχήμα 3.9).





Πίνακας 3.10: Βέλτιστες λύσεις του ΓΑ για διαφορετικό μηχανισμό επιλογής ($N_{pop} = 50, gn = 50$, κωδικοποίηση Gray, ομοιόμορφη διασταύρωση, ρυθμός μετάλλαξης 0.01).

Μηγορισμός			Βέλ	.τιστη διό	ιταξη σ	υστατικ	ών του Μ	ΑΣΗΕ		Απόκλιση
νηχανισμος	٨Г	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο
επικογης	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)
Επιλ. τουρνουά	9	0	25	5	0	100	38	ΠФ	0.22635	0.03
Καθ. στοχ. δειγμ.	8	1	25	5	0	90	36	ΠФ	0.22629	0.00

<u>Επεξηγήσεις</u>: Επιλ. τουρνουά = Επιλογή τουρνουά, Καθ. στοχ. δειγμ. = Καθολική στοχαστική δειγματοληψία, Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

Η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων διασταύρωσης γίνεται στο Σχήμα 3.10 και στον Πίνακα 3.11, από όπου προκύπτει η υπεροχή της ομοιόμορφης διασταύρωσης σε σχέση με τη διασταύρωση

ενός σημείου, λόγω της ελαφρά ταχύτερης σύγκλισης και της καλύτερης τελικής λύσης που επιτυγχάνει.



Σχήμα 3.10: Επίδραση του τύπου διασταύρωσης στη σύγκλιση του ΓΑ (N_{pop} = 50, gn = 50, κωδικοποίηση Gray, επιλογή τουρνουά, ρυθμός μετάλλαξης 0.01),
(α) διασταύρωση ενός σημείου, (β) ομοιόμορφη διασταύρωση.

Πίνακας 3.11: Βέλτιστες λύσεις του ΓΑ για διαφορετικό τύπο διασταύρωσης ($N_{pop} = 50, gn = 50, \kappa$ ωδικοποίηση Gray, επιλογή τουρνουά, ρυθμός μετάλλαξης 0.01).

Túmos			Βέλ	.τιστη διό	ιταξη σ	υστατικ	ών του Μ.	ΑΣΗΕ		Απόκλιση
Ιυπος	٨Γ	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο
σιασταυρωσης	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)
Ενός σημείου	9	0	20	10	0	100	38	ΠФ	0.22883	1.10
Ομοιόμορφη	9	0	25	5	0	100	38	ΠФ	0.22635	0.00

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

Στο Σχήμα 3.11 και στον Πίνακα 3.12 δείχνεται η επίδραση του ρυθμού μετάλλαξης στην επίδοση του ΓΑ. Η βέλτιστη τιμή ρυθμού μετάλλαξης προκύπτει ότι είναι η 0.01, καθώς προσφέρει τον καλύτερο συνδυασμό ταχείας σύγκλισης και ποιότητας τελικής λύσης.

Πίνακας 3.12: Βέλτιστες λύσεις του ΓΑ για διαφορετικό ρυθμό μετάλλαξης ($N_{pop} = 50, gn = 50, \kappa$ ώδικας Gray, επιλογή τουρνουά, ομοιόμορφη διασταύρωση).

Βυθυάς			Βέλ	.τιστη διό	ιταξη σ	υστατικ	ών του Μ	ΑΣΗΕ		Απόκλιση
Γυσμος	۸T	ΦВ	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	N	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο
μεταλλάζης	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)
0.1	9	1	25	5	0	90	36	ΠФ	0.22671	0.18
0.01	9	0	25	5	0	100	38	ΠФ	0.22635	0.02
0.001	9	3	25	3	0	90	38	ΠФ	0.22630	0.00

Η σύνοψη των παραπάνω αποτελεσμάτων γίνεται στον Πίνακα 3.13, όπου παρουσιάζονται οι βέλτιστες παράμετροι του ΓΑ. Λόγω της ταχείας σύγκλισης της συγκεκριμένης διαμόρφωσης του ΓΑ, ο βέλτιστος αριθμός των γενεών gn ορίζεται ίσος με 15, και ο συνεπαγόμενος αριθμός προσομοιώσεων που εκτελείται είναι ίσος με 800.



Σχήμα 3.11: Επίδραση του ρυθμού μετάλλαξης στη σύγκλιση του ΓΑ (N_{pop} = 50, gn = 50, κωδικοποίηση Gray, επιλογή τουρνουά, ομοιόμορφη διασταύρωση), (α) σύγκριση ρυθμών μετάλλαξης 0.01 και 0.1, (β) σύγκριση ρυθμών μετάλλαξης 0.01 και 0.001.

Παράμετρος	Τιμή
Πληθυσμός, Ν _{pop}	50
Αριθμός γενεών, gn	15
Κωδικοποίηση	Κώδικας Gray
Μηχανισμός επιλογής	Επιλογή τουρνουά
Τύπος διασταύρωσης	Ομοιόμορφη
Ρυθμός μετάλλαξης	0.01

Πίνακας 3.13: Βέλτιστες παράμετροι ΓΑ.

3.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΗ ΑΝΟΠΤΗΣΗ

3.5.1 Εισαγωγή

Η προσομοιωμένη ανόπτηση (ΠΑ) είναι μια μέθοδος που αναπτύχθηκε για την επίλυση δύσκολων προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, ενώ στη συνέχεια επεκτάθηκε και στην επίλυση προβλημάτων με συνεχείς μεταβλητές. Η ΠΑ προτάθηκε ανεξάρτητα από τους Kirkpatrick et al [3.15] το 1983 και από τον Cerny [3.16] το 1985, και μεταφέρει τη φυσική διαδικασία της ανόπτησης ενός υλικού στη διαδικασία εύρεσης λύσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης (Πίνακας 3.14). Η ανόπτηση αναφέρεται στη διαδικασία θέρμανσης ενός υλικού σε υψηλή θερμοκρασία στην οποία τήκεται, η οποία ακολουθείται από μια αργή διαδικασία ψύξης που επιτυγχάνεται μειώνοντας τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε βήματα. Η διαδικασία αυτή οδηγεί τελικά σε μια κρυσταλλική στερεή κατάσταση, στην οποία αντιστοιχεί το ολικό ελάχιστο της ενέργειας του υλικού. Εάν η ψύξη γίνει με ταχύτερο ρυθμό, οδηγεί σε μια άμορφη κατάσταση του υλικού που αντιστοιχεί σε ένα τοπικό ελάχιστο ενέργειας.

Πίνακας 3.14: Αναλογία μεταξύ ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και ενός φυσικού συστήματος.

Πρόβλημα βελτιστοποίησης	Φυσικό σύστημα
Αντικειμενική συνάρτηση	Ενέργεια του συστήματος
Λύσεις του προβλήματος	Καταστάσεις του φυσικού συστήματος
Εύρεση βέλτιστης λύσης	Εύρεση της κατάστασης ελάχιστης ενέργειας

Ο αλγόριθμος της ΠΑ βασίζεται σε δύο αποτελέσματα της στατιστικής φυσικής. Καταρχήν, όταν σε μια δεδομένη θερμοκρασία T έχει επιτευχθεί θερμοδυναμική ισορροπία, η πιθανότητα του υλικού p(E,T) να έχει μια δεδομένη ενέργεια E είναι ανάλογη με τον παράγοντα Boltzmann:

$$p(E,T) \approx \exp\left(-\frac{E}{k_B \cdot T}\right)$$
 (3.11)

όπου k_B είναι η σταθερά του Boltzmann. Σε αυτή την περίπτωση, η κατανομή των ενεργειακών καταστάσεων του υλικού δίνεται από την κατανομή Boltzmann για τη θερμοκρασία T.

Επιπλέον, για να προσομοιωθεί η εξέλιξη ενός φυσικού συστήματος προς τη θερμοδυναμική του ισορροπία σε μια δεδομένη θερμοκρασία *T*, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του Metropolis [3.17]: ξεκινώντας από μία αρχική διαμόρφωση, το σύστημα υπόκειται σε μια στοιχειώδη τροποποίηση (π.χ., ένα συστατικό του μεταβάλλεται). Εάν η παραπάνω τροποποίηση μειώσει την αντικειμενική συνάρτηση (ή "ενέργεια") του συστήματος τότε γίνεται αυτόματα αποδεκτή, διαφορετικά, εάν προκαλέσει μια αύξηση ΔΕ στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται αποδεκτή με πιθανότητα exp(-ΔΕ/T). Με την επαναλαμβανόμενη χρήση του αλγορίθμου του Metropolis δημιουργείται μια ακολουθία διαμορφώσεων του συστήματος που αποτελούν μια αλυσίδα Markov, καθώς κάθε διαμόρφωση εξαρτάται μόνο από την προηγούμενη αυτής. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, είναι δυνατό να αποδειχτεί ότι στην περίπτωση που η αλυσίδα Markov έχει επαρκές μήκος, το σύστημα μπορεί να προσεγγίσει την κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας σε μια δεδομένη θερμοκρασία [3.18].

Ο ρόλος της θερμοκρασίας T στον αλγόριθμο του Metropolis είναι καθοριστικής σημασίας. Σε υψηλές θερμοκρασίες, η πιθανότητα exp(- $\Delta E/T$) προσεγγίζει τη μονάδα, επομένως η πλειονότητα των τροποποιήσεων γίνονται αποδεκτές και ο αλγόριθμος πρακτικά ισοδυναμεί με μια διαδικασία τυχαίου περίπατου. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η πιθανότητα exp(- $\Delta E/T$) προσεγγίζει το μηδέν, οπότε η πλειονότητα των τροποποιήσεων που αυξάνουν την ενέργεια δεν γίνεται αποδεκτή. Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες ο αλγόριθμος επιτρέπει σε ορισμένες τροποποιήσεις που αυξάνουν την αντικειμενική συνάρτηση να γίνουν αποδεκτές, κάτι που βοηθά το σύστημα να διαφύγει από ένα τοπικό ελάχιστο.

Όταν έχει επιτευχθεί θερμοδυναμική ισορροπία σε μια δεδομένη θερμοκρασία, η θερμοκρασία μειώνεται ελαφρά και μια νέα αλυσίδα Markov υλοποιείται στη νέα θερμοκρασία. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία αποδεικνύεται [3.19] ότι όταν η θερμοκρασία τείνει στο μηδέν, ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό ελάχιστο της ενέργειας. Σε πραγματικές συνθήκες, η διαδικασία τερματίζεται είτε όταν το σύστημα φτάσει σε μια προεπιλεγμένη ελάχιστη θερμοκρασία, είτε όταν δεν υπάρξει αποδοχή κάποιας τροποποίησης του συστήματος σε ένα δεδομένο αριθμό θερμοκρασιακών βημάτων. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της ΠΑ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου ΠΑ.

3.5.2 Πρόγραμμα ψύξης αλγορίθμου ΠΑ

Μια υλοποίηση του αλγορίθμου της ΠΑ σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα μπορεί να πραγματοποιηθεί θεωρώντας πεπερασμένο μήκος αλυσίδων Markov για μια πεπερασμένη ακολουθία που περιλαμβάνει φθίνουσες τιμές της θερμοκρασίας *Τ*. Για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος, χρειάζεται να καθοριστεί ένα σύνολο από παραμέτρους που ρυθμίζουν τη σύγκλιση του αλγορίθμου. Οι παράμετροι αυτές συνδυάζονται σε ένα **πρόγραμμα ψύξης** και είναι οι ακόλουθες:

- Η αρχική θερμοκρασία T_{in}, η οποία πρέπει να είναι αρκούντως υψηλή έτσι ώστε να κάνει δυνατή την αποδοχή όλων των τροποποιημένων λύσεων που μπορούν να παραχθούν [3.20].
- Το μήκος των αλυσίδων Markov N_{Markov}, που αποτελεί και το κριτήριο για αλλαγή της θερμοκρασίας του συστήματος. Το μήκος των αλυσίδων Markov N_{Markov} σχετίζεται με τον αριθμό των μεταβλητών του προβλήματος, ενώ συνίσταται να μην είναι μικρότερο του 100 [3.20].
- 3. Η συνάρτηση μείωσης της θερμοκρασίας *Τ*, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.
- 4. Το κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου, που μπορεί να ενεργοποιηθεί είτε όταν η θερμοκρασία φτάσει μια πολύ χαμηλή τιμή (τυπικές τιμές: 10⁻⁵ έως 10⁻⁸), είτε όταν επιτευχθούν τρεις συνεχόμενες αλλαγές θερμοκρασίας χωρίς να έχει υπάρξει σε αυτές αποδοχή κάποιας τροποποιημένης λύσης [3.21].

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση μείωσης της θερμοκρασίας, λόγω της απλότητάς της, είναι ο γεωμετρικός νόμος μείωσης:

$$T_{k+1} = a \cdot T_k \tag{3.12}$$

όπου T_k και T_{k+1} είναι οι θερμοκρασίες στην k και k+1 επανάληψη του αλγορίθμου, αντίστοιχα, ενώ α είναι ένας σταθερός αριθμός μικρότερος του 1. Τυπικές τιμές του α που απαντώνται στη βιβλιογραφία κυμαίνονται ανάμεσα στο 0.5 και το 0.99 [3.18]. Μια εναλλακτική συνάρτηση μείωσης της θερμοκρασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκφράζεται στη γενική της μορφή από την αναδρομική σχέση $T_{k+1} = a(T_k) \cdot T_k$, όπου $a(T_k)$ είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας T_k . Από την πληθώρα συναρτήσεων αυτού του τύπου που έχουν προταθεί, στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται η ακόλουθη [3.20]:

$$T_{k+1} = \frac{T_k}{1 + \frac{T_k \cdot \ln(1 + \delta_d)}{3\sigma_{\tau_k}}}$$
(3.13)

όπου σ_{Tk} είναι η τυπική απόκλιση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί στην αλυσίδα Markov της επανάληψης k του αλγορίθμου. Η σταθερά δ_d καλείται παράμετρος απόστασης, κυμαίνεται συνήθως μεταξύ του 0.1 και του 1, ενώ ισχύει ότι μικρές τιμές της δ_d οδηγούν σε μικρές μειώσεις της θερμοκρασίας T.

3.5.3 Προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης με ΠΑ και ανάλυση αποτελεσμάτων

Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου της ΠΑ στο παράδειγμα εφαρμογής, η αρχική λύση δημιουργείται με τυχαία επιλογή των επιτρεπτών τιμών για τις παραμέτρους του ΜΑΣΗΕ (εξαρτήματα συστήματος και στρατηγική συνεργασίας). Η στοιχειώδης τροποποίηση μιας λύσης, που είναι απαραίτητη για την εξέλιξη του αλγορίθμου, γίνεται με την τυχαία επιλογή μιας εκ των 8

παραμέτρων του συστήματος, στην οποία η τιμή της αντικαθίσταται από μια τυχαία εναλλακτική επιτρεπτή τιμή. Εάν η λύση που προκύπτει ικανοποιεί τους περιορισμούς, η ενέργεια του συστήματος είναι ίση με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (KHE). Στην αντίθετη περίπτωση, η τιμή του KHE που θεωρείται λαμβάνεται ίση με μια οριακή τιμή KHE_{marg}, η οποία χρειάζεται να είναι μεγαλύτερη από το KHE οποιασδήποτε λύσης, ενώ ταυτόχρονα να παραμένει στην ίδια τάξη μεγέθους. Δεδομένου ότι οι τιμές του KHE κυμαίνονται συνήθως ανάμεσα στο εύρος 0.25-0.60 €/kWh, η τιμή της KHE_{marg} έχει ληφθεί ίση με 1 €/kWh. Η συνολική ενέργεια μιας μη εφικτής λύσης προκύπτει αν στη ποσότητα KHE_{marg} προστεθεί η συνολική κανονικοποιημένη συνάρτηση τιμωρίας *pentot* της συγκεκριμένης λύσης, που υπολογίζεται ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην ενέργεια από οποιαδήποτε εφικτή λύση που δεν ικανοποιεί τους περιορισμούς θα έχει μεγαλύτερη ενέργεια από οποιαδήποτε εφικτή λύση, ενώ ταυτόχρονα οι τιμές των ενεργειών όλων των λύσεων (εφικτών ή μη) θα ανήκουν στην ίδια τάξη μεγέθους. Η τιμή της αρχικής θερμοκρασίας T_i , έχει ληφθεί ίση με 10⁻⁵.



Σχήμα 3.13: Επίδραση του μήκους των αλυσίδων Markov N_{Markov} στην επίδοση του αλγορίθμου ΠΑ (γεωμετρική μείωση *T*, $\alpha = 0.5$), (α) $N_{Markov} = 100$, (β) $N_{Markov} = 50$, (γ) $N_{Markov} = 30$, (δ) $N_{Markov} = 10$.

				Απόκλιση	Αριθμός						
N _{Markov}	٨Г	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	N	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο	υπολογισμών
	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)	KHE
100	8	3	20	5	4	90	34	ΠФ	0.22749	0.03	1800
50	8	1	30	0	0	90	36	ΠФ	0.22804	0.27	900
30	8	3	25	5	0	90	32	ΠФ	0.22742	0.00	540
10	8	0	15	7.5	8	90	30	ΠФ	0.23449	3.11	180

Πίνακας 3.15: Βέλτιστες λύσεις του αλγορίθμου της ΠΑ για διαφορετικά μήκη αλυσίδων Markov N_{Markov} (γεωμετρική μείωση T, $\alpha = 0.5$).

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

Οι παράμετροι της ΠΑ για τις οποίες εξετάζεται η επίδοση του αλγορίθμου είναι το μήκος των αλυσίδων Markov N_{Markov} , καθώς και η συνάρτηση μείωσης της θερμοκρασίας. Στο Σχήμα 3.13 φαίνεται η εξέλιξη του αλγορίθμου για τιμές N_{Markov} ίσες με 100, 50, 30 και 10, θεωρώντας γεωμετρική μείωση της θερμοκρασίας T με a = 0.5, ενώ στον Πίνακα 3.15 παρουσιάζονται οι βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι επιλογή μήκους αλυσίδων Markov $N_{Markov} = 30$ μειώνει σημαντικά τον αριθμό προσομοιώσεων που εκτελούνται, ενώ παράλληλα δίνει και την καλύτερη λύση (ελάχιστο KHE, Πίνακας 3.15).



Σχήμα 3.14: Επίδραση του παράγοντα μείωσης α στην επίδοση του αλγορίθμου ΠΑ (γεωμετρική μείωση *T*, $N_{Markov} = 30$), (α) $\alpha = 0.5$, (β) $\alpha = 0.8$.

Πίνακας 3.16: Βέλτιστες λύσεις του αλγορίθμου της ΠΑ για διαφορετικές τιμές του παράγοντα μείωσης α (γεωμετρική μείωση *T*, N_{Markov} = 30).

			Βέλ	. τιστη διό		Απόκλιση	Αριθμός				
а	٨Г	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο	υπολογισμών
	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)	KHE
0.5	8	3	25	5	0	90	32	ΠФ	0.22742	0.00	540
0.8	9	3	25	0	8	120	38	ΠФ	0.23397	2.88	1470

Η επίδραση του παράγοντα α κατά τη γεωμετρική μείωση της θερμοκρασίας T εξετάζεται στο Σχήμα 3.14 και στον Πίνακα 3.16, από όπου προκύπτει ότι η μείωση του ρυθμού πτώσης της T δεν βελτιώνει τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, ενώ παράλληλα αυξάνει σημαντικά τον αριθμό προσομοιώσεων που εκτελούνται.

Η επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για διαφορετικές συναρτήσεις μείωσης της θερμοκρασίας εξετάζεται στο Σχήμα 3.15 και τον Πίνακα 3.17. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί, για αντίστοιχο αριθμό προσομοιώσεων η γεωμετρική μείωση της θερμοκρασίας προσφέρει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα συγκρινόμενη με τον αναδρομικό τύπο της εξίσωσης (3.13).



Σχήμα 3.15: Επίδραση της συνάρτησης μείωσης της θερμοκρασίας T στην επίδοση του αλγορίθμου ΠΑ ($N_{Markov} = 30$), (α) γεωμετρική μείωση T, $\alpha = 0.5$, (β) αναδρομική μείωση T, $\delta_d = 1$.

Πίνακας 3.17: Βέλτιστες λύσεις του αλγορίθμου της ΠΑ για διαφορετική συνάρτηση μείωσης της θερμοκρασίας $T(N_{Markov} = 30)$.

Παράμοτορο			Βέλ	ιτιστη διό	ίταξη σ	υστατικ	ών του Μ	ΑΣΗΕ		Απόκλιση	Αριθμός
παραμετρος	δαμετρος (ωσης Τ ΔΓ ΦΒ Ντζ. Βιοντζ. Κ.Κ. Συσσ Μετατρ. Στρατη- ΚΗΕ										υπολογισμών
μειωσης Ι	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2066.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)	KHE
$\alpha = 0.5$	8	3	25	5	0	90	32	ΠФ	0.22742	0.00	540
$\delta_d = 1$	8	3	20	7.5	4	90	34	ΠФ	0.22958	0.95	750

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

3.6 ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΘΕΥΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των τριών μεθευρετικών μεθόδων που εξετάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.18, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όλες οι μέθοδοι παρουσιάζουν αποτελέσματα αντίστοιχης ποιότητας (αντίστοιχα KHE).
- Ο αριθμός των προσομοιώσεων που εκτελούνται είναι πάρα πολύ μικρός σε σχέση με το συνολικό αριθμό των προσομοιώσεων της μεθόδου της πλήρους απαρίθμησης (εξίσωση 3.1).

Βέλτιστη διάταξη συστατικών του ΜΑΣΗΕ Απόκλιση Αριθμός Υπολογ												Υπολογιστικός
Μέθοδος	۸E	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	N	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο	υπολογισμών	χρόνος
	AI	(kW_p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)	KHE	(min)
AT	8	1	25	5	0	90	36	ΠФ	0.22629	0.00	2419	281
ΓА	9	0	25	5	0	100	38	ΠФ	0.22635	0.03	800	107
ПА	8	3	25	5	0	90	32	ΠФ	0.22742	0.50	540	63

Πίνακας 3.18: Αποτελέσματα των μεθευρετικών μεθόδων στο παράδειγμα εφαρμογής.

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

Από τον Πίνακα 3.18 διαπιστώνεται ότι η ΑΤ παρουσιάζει το μικρότερο ΚΗΕ, που οφείλεται στην ύπαρξη του μηχανισμού τοπικής αναζήτησης που εμπεριέχει, ο οποίος εξασφαλίζει την εύρεση της βέλτιστης λύσης σε μια γειτονιά λύσεων. Από την άλλη πλευρά, η ΑΤ παρουσιάζει τα μειονεκτήματα του συγκριτικά αυξημένου αριθμού προσομοιώσεων που εκτελούνται, καθώς και του γεγονότος ότι χρειάζεται να εκκινήσει από μια εφικτή λύση του προβλήματος. Οι ΓΑ και η ΠΑ καταλήγουν στα αποτελέσματά τους έπειτα από μικρότερο αριθμό προσομοιώσεων ξεκινώντας από τυχαίες λύσεις, αλλά δεν υπάρχει η διασφάλιση ότι η τελική λύση είναι η βέλτιστη σε σχέση με τις γειτονικές της λύσεις. Για τη εξάλειψη των παραπάνω μειονεκτημάτων, προτείνεται η γρήση δύο μεθοδολογιών συνεργασίας των παραπάνω μεθευρετικών μεθόδων. Συγκεκριμένα, προτείνεται η εφαρμογή της ΑΤ χρησιμοποιώντας ως αρχική (εφικτή) λύση το αποτέλεσμα που προκύπτει 1) από το ΓΑ, και 2) από την ΠΑ. Τα αποτελέσματα των δύο υβριδικών μεθόδων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.19, όπου διαπιστώνεται η βελτίωση της τελικής (κοινής) λύσης, χωρίς παράλληλα να αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός των προσομοιώσεων που απαιτούνται. Η τελική λύση εμπεριέχει μεγάλο αριθμό ΑΓ και συσσωρευτών, υιοθέτηση της στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου (που οφείλεται στον περιορισμό του ελάχιστου κλάσματος ενέργειας από τεχνολογίες ΑΠΕ), ενώ τα μικρά μεγέθη των ΦΒ συστοιχιών, της ντηζελογεννήτριας με καύσιμο το βιοντήζελ και των κυψελών καυσίμου οφείλονται στα υψηλά κόστη των τεχνολογιών αυτών.

Πίνακας 3.19: Αποτελέσματα των υβριδικών μεθευρετικών μεθόδων στο παράδειγμα εφαρμογής.

VBarSuch			Βέλ	τιστη διά	ταξη σι	στατικά	ών του ΜΑ	ΔΣΗΕ		Αριθμός
τρριοικη	۸Γ	ΦВ	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	προσομοιώσεων
μεθυσος	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	(επανάληψη ΑΤ)
ΓΑ+ΑΤ	8	1	25	5	0	90	36	ΠФ	0.22629	860 (4)
ПА+АТ	8	1	25	5	0	90	36	ΠФ	0.22629	604 (4)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Ιστορικά μετεωρολογικά δεδομένα Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Διαθέσιμα στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <u>http://www.meteo.ntua.gr/g/histdata</u>
- [3.2] F. Glover, "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence," *Computers and Operations Research*, vol. 13, pp. 533–549, 1986.
- [3.3] F. Glover, "Tabu search part I," ORSA Journal on Computing, vol. 1, pp. 190–206, 1989.
- [3.4] R. Battiti, "The reactive tabu search," *ORSA Journal of Computing*, vol. 6, no. 2, pp. 126-140, 1994.
- [3.5] F. Glover and M. Laguna, *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers: Boston, 1997.
- [3.6] I. Rechenberg, *Cybernetic solution path of an experimental problem*. Royal Aircraft Establishment Library Translation, 1965.
- [3.7] L.J. Fogel, A.J. Owens, and M.J. Walsh, *Artificial intelligence through simulated evolution*. John Wiley & Sons, 1966.
- [3.8] J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press: Ann Arbor, 1975.
- [3.9] D.E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley: Reading, 1989.
- [3.10] H. Taub and D.L. Schilling, *Principles of communication systems*. McGraw-Hill: New York, 1986.
- [3.11] R.L. Haupt and S.E. Haupt, *Practical genetic algorithms*. John Wiley & Sons: New Jersey, 2004.
- [3.12] D.E. Goldberg and K. Deb, "A comparison of selection schemes used in genetic algorithms," in *Foundations of Genetic Algorithms 1 (FOGA-1)*, pp. 69-93, 1991.
- [3.13] W.M. Spears, "The role of mutation and recombination in evolutionary algorithms," Ph.D. Dissertation, George Mason University, Fairfax, 1998.
- [3.14] Z. Michalewicz, Genetic algorithms + data structures = evolution programs 3rd edition. Springer-Verlag: Berlin, 1996.
- [3.15] S. Kirkpatrick, C. Gelatt, and M. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, pp. 671-680, 1983.
- [3.16] V. Cerny, "Thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 45, no. 1, pp. 41-51, 1985.
- [3.17] N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, and E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines," *Journal of Chemical Physics*, vol. 21, pp. 1087-1092, 1953.
- [3.18] P.J.M. van Laarhoven and E.H.L. Aarts, *Simulated annealing: theory and applications*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 1987.
- [3.19] E.H.L. Aarts and P.J.M. van Laarhoven, "Statistical cooling: a general approach to combinatorial optimization problems," *Philips Journal of Research*, vol. 40, pp. 193-226, 1985.

- [3.20] E. Aarts and J. Korst, *Simulated annealing and Boltzmann machines*. John Wiley & Sons: Chichester, 1989.
- [3.21] J. Dreo, A. Petrowski, P. Siarry, and E. Taillard, *Metaheuristics for hard optimization*. Springer-Verlag: Berlin, 2006.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στο τέταρτο κεφάλαιο της διατριβής αξιολογείται ένας αριθμός από εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σενάρια αυτά περιλαμβάνουν μεταβολές σε μεταβλητές εισόδου του προβλήματος που εμπεριέχουν αβεβαιότητα, καθώς και αλλαγές του τύπου ορισμένων εξαρτημάτων του συστήματος. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση της μεταβολής του αιολικού και ηλιακού δυναμικού, της προσθήκης συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου στα φωτοβολταϊκά συστήματα, της αύξησης του ηλεκτρικού φορτίου του συστήματος, της αύξησης της τιμής του καυσίμου ντήζελ, της επιδότησης της τιμής αγοράς των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ επιπλέον μελετάται η επίδραση της αλλαγής του συστήματος αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας από συσσωρευτές σε δεξαμενή υδρογόνου. Σε κάθε περίπτωση, η επίλυση του προβλήματος υλοποιείται με γενετικούς αλγορίθμους, με την υβριδική μέθοδο γενετικών αλγορίθμων και αναζήτησης ταμπού, με προσομοιωμένη ανόπτηση, και με την υβριδική μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης και αναζήτησης ταμπού.

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης της δομής ενός ΜΑΣΗΕ, που υλοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 3, έγινε αναζήτηση εκείνης της λύσης που ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος στο ελάχιστο κόστος για μια συγκεκριμένη διαμόρφωση του συστήματος. Η αβεβαιότητα όμως στις τιμές πολλών παραμέτρων εισόδου του προβλήματος καθιστά αναγκαία τη διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας, κατά την οποία αποτιμώνται οι επιπτώσεις των αλλαγών των παραμέτρων εισόδου στις οποίες δεν υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου (όπως το αιολικό δυναμικό και η μελλοντική τιμή ενός καυσίμου). Επιπλέον, σε πολλά εξαρτήματα του συστήματος υπάρχει η δυνατότητα επιλογής εναλλακτικών τεχνολογιών, που συνδυάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά κόστους και απόδοσης. Για το λόγο αυτό, στο παρόν κεφάλαιο αξιολογείται ένας μεγάλος αριθμός από εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας ενός ΜΑΣΗΕ. Όλα τα εναλλακτικά σενάρια έχουν ως βάση το παράδειγμα εφαρμογής της ενότητας 3.2, και περιλαμβάνουν τις ακόλουθες τροποποιήσεις:

- 1. Αύξηση του αιολικού δυναμικού κατά 10%.
- 2. Μείωση του αιολικού δυναμικού κατά 10%.
- 3. Αύξηση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%.

- 4. Μείωση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%.
- Τοποθέτηση στις ΦΒ συστοιχίες συστήματος παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου οριζόντιου άξονα.
- Τοποθέτηση στις ΦΒ συστοιχίες συστήματος παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου κατακόρυφου άξονα.
- Τοποθέτηση στις ΦΒ συστοιχίες συστήματος παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου δύο αξόνων.
- 8. Αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου κατά 20%.
- Αύξηση της τιμής του καυσίμου ντήζελ κατά 50%.
- 10. Μείωση της τιμής αγοράς των τεχνολογιών ΑΠΕ (ΑΓ και ΦΒ) κατά 50%.
- Αλλαγή του συστήματος αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας από συσσωρευτές σε δεξαμενή υδρογόνου.

Κατά τη διαδικασία επίλυσης του κάθε προβλήματος συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους γενετικούς αλγορίθμους, την υβριδική μέθοδο γενετικών αλγορίθμων και αναζήτησης ταμπού, την προσομοιωμένη ανόπτηση, και την υβριδική μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης και αναζήτησης ταμπού. Οι τιμές των παραμέτρων για καθεμιά από τις παραπάνω μεθευρετικές μεθόδους τίθενται ίσες με τις βέλτιστες που υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 3, ενώ ο αριθμός των επαναλήψεων της ΑΤ έχει οριστεί ίσος με 20.

4.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

4.2.1 Αύξηση του αιολικού δυναμικού κατά 10%

Η αύξηση του αιολικού δυναμικού κατά 10% μειώνει το ΚΗΕ (Πίνακας 4.1) λόγω της βελτίωσης του συντελεστή φορτίου (ΣΦ) των ΑΓ, καθώς η ποσότητά των ΑΓ της βέλτιστης λύσης δεν μεταβάλλεται σε σχέση με αυτή της βέλτιστης λύσης του παραδείγματος εφαρμογής (Πίνακας 3.19). Στα Σχήματα 4.1 και 4.2 φαίνεται η σύγκλιση των ΓΑ και της ΠΑ, αντίστοιχα, ενώ στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι βέλτιστες λύσεις για καθεμιά από τις τέσσερις εξεταζόμενες μεθόδους, από όπου διαπιστώνεται η υπεροχή της ΠΑ σε σχέση με τους ΓΑ, καθώς και η ισοδυναμία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις υβριδικές μεθόδους.

Βέλτιστη διάταξη συστατικών του ΜΑΣΗΕ										
Μέθοδος		ΦВ	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	N	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο
	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)
ΓА	7	4	20	0	12	90	34	ΠФ	0.21393	2.72
ΓΑ+ΑΤ	8	2	20	0	8	100	36	ΠФ	0.20826	0.00
ПА	8	2	20	0	8	100	36	ΠФ	0.20826	0.00
ПА+АТ	8	2	20	0	8	100	36	ΠФ	0.20826	0.00

Πίνακας 4.1: Βέλτιστες λύσεις μεθευρετικών μεθόδων για αύξηση του αιολικού δυναμικού κατά 10%.



Σχήμα 4.1: Σύγκλιση του ΓΑ για αύξηση του αιολικού δυναμικού κατά 10%.



Σχήμα 4.2: Επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για αύξηση του αιολικού δυναμικού κατά 10%.

4.2.2 Μείωση του αιολικού δυναμικού κατά 10%

Η μείωση του αιολικού δυναμικού κατά 10% έχει πολύ σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά του ΜΑΣΗΕ, καθώς αυξάνει σημαντικά (πάνω από 10%) το ΚΗΕ του συστήματος. Ο αριθμός των ΑΓ της βέλτιστης λύσης (Πίνακας 4.2) δεν μεταβάλλεται σε σχέση με το παράδειγμα εφαρμογής (Πίνακας 3.19), και η επιδείνωση των αποτελεσμάτων που παρατηρείται οφείλεται στη μείωση του ΣΦ των ΑΓ. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.2 διαπιστώνεται ότι οι ΓΑ δίνουν σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις μεθόδους που χρησιμοποιούν ΠΑ. Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 φαίνεται η εξέλιξη της επίδοσης των ΓΑ και της ΠΑ.



Σχήμα 4.3: Σύγκλιση του ΓΑ για μείωση του αιολικού δυναμικού κατά 10%.



Σχήμα 4.4: Επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για μείωση του αιολικού δυναμικού κατά 10%.

	Βέλτιστη διάταξη συστατικών του ΜΑΣΗΕ											
Μέθοδος	٨Г	ΦВ	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο		
	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)		
ГА	8	4	25	5	0	110	32	ΠФ	0.25602	0.46		
ΓΑ+ΑΤ	8	4	25	5	0	80	34	ΠФ	0.25485	0.00		
ПА	7	5	20	0	12	70	26	ΠФ	0.26257	3.03		
ПА+АТ	8	1	20	0	12	70	32	ΠФ	0.26115	2.47		

Πίνακας 4.2: Βέλτιστες λύσεις μεθευρετικών μεθόδων για μείωση του αιολικού δυναμικού κατά 10%.

4.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

4.3.1 Αύξηση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%

Η αύξηση του ηλιακού δυναμικού κατά 5% δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα σε σχέση με το βασικό σενάριο, καθώς η εγκατεστημένη ισχύς των ΦΒ δε διαφοροποιείται σημαντικά. Τόσο οι μέθοδοι που βασίζονται σε ΓΑ, όσο και αυτές που βασίζονται σε ΠΑ δίνουν αποτελέσματα αντίστοιχης ποιότητας (Πίνακας 4.3). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος της ΠΑ τερματίζει σε μικρότερο αριθμό προσομοιώσεων (480 αντί του αναμενόμενου 540, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.6), καθώς σε αυτές ικανοποιείται το κριτήριο των τριών συνεχόμενων αλλαγών θερμοκρασίας χωρίς να έχει υπάρξει σε αυτές αποδοχή κάποιας τροποποιημένης λύσης. Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η σύγκλιση του ΓΑ.



Σχήμα 4.5: Σύγκλιση του ΓΑ για αύξηση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%.



Σχήμα 4.6: Επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για αύξηση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%.

	Βέλτιστη διάταξη συστατικών του ΜΑΣΗΕ										
Μέθοδος	۸E	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	N	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο	
	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)	
ГА	9	3	25	5	0	100	34	ΠФ	0.22798	1.01	
ΓΑ+ΑΤ	9	3	25	3	0	100	38	ΠФ	0.22571	0.00	
ПА	7	6	20	5	4	90	32	ΠФ	0.22868	1.32	
ПА+АТ	8	3	20	5	4	90	36	ΠФ	0.22718	0.65	

Πίνακας 4.3: Βέλτιστες λύσεις μεθευρετικών μεθόδων για αύξηση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%.

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

4.3.2 Μείωση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%

Η μείωση του ηλιακού δυναμικού κατά 5% δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα σε σχέση με το βασικό σενάριο, καθώς η ελαφρά μείωση της εγκατεστημένης ισχύος των ΦB (0 kW από 1 kW) έχει αμελητέα επίδραση. Όσον αφορά την ποιότητα των αποτελεσμάτων, η ΠΑ έχει σημαντικά καλύτερη επίδοση από τον ΓΑ. Το καλύτερο αποτέλεσμα παρέχεται από την υβριδική μέθοδο ΠΑ και ΑΤ, ενώ αξιοσημείωτη είναι η βελτίωση του αποτελέσματος του ΓΑ μετά τη εφαρμογή της ΑΤ (Πίνακας 4.4). Στα Σχήματα 4.7 και 4.8 φαίνεται η εξέλιξη της επίδοσης των ΓΑ και της ΠΑ.

Πίνακας 4.4: Βέλτιστες λύσεις μεθευρετικών μεθόδων για μείωση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%.

Βέλτιστη διάταξη συστατικών του ΜΑΣΗΕ											
Μέθοδος	٨Г	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο	
	AI	(kW_p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)	
ГА	9	0	15	10	4	110	48	ΠФ	0.23503	3.24	
ΓΑ+ΑΤ	9	0	20	10	0	100	38	ΠФ	0.22883	0.52	
ПА	8	4	30	0	0	90	36	ΠФ	0.22915	0.66	
ПА+АТ	9	0	30	0	0	100	38	ΠФ	0.22765	0.00	



Σχήμα 4.7: Σύγκλιση του ΓΑ για μείωση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%.



Σχήμα 4.8: Επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για μείωση του ηλιακού δυναμικού κατά 5%.

4.4 ΑΛΛΑΓΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ ΣΤΗ ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ

4.4.1 Σύστημα παρακολούθησης οριζόντιου άξονα

Η προσθήκη συστήματος παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου σε μια ΦΒ συστοιχία αυξάνει την αποδοτικότητά της, αλλά παράλληλα αυξάνει σημαντικά και το κόστος της. Η τοποθέτηση συστήματος παρακολούθησης οριζόντιου άξονα στη ΦΒ συστοιχία θεωρείται ότι αυξάνει το κόστος κεφαλαίου στα 6500 €/kW (από 5000 €/kW), ενώ παράλληλα αυξάνει και το κόστος αντικατάστασης της ΦΒ συστοιχίας στα 6000 €/kW (από 4500 €/kW). Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.5 διαπιστώνεται ότι η αύξηση της αποδοτικότητας των ΦΒ δεν μπορεί να εξισορροπήσει τη μεγάλη αύξηση του κόστους τους, καθώς η βέλτιστη λύση που λαμβάνεται δεν περιέχει ΦΒ. Όσον αφορά τα αποτελέσματα, οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν ΓΑ δίνουν σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα (Πίνακας 4.5). Στα Σχήματα 4.9 και 4.10 φαίνεται η εξέλιξη της επίδοσης των ΓΑ και της ΠΑ.

Πίνακας 4.5: Βέλτιστες λύσεις μεθευρετικών μεθόδων για ΦΒ συστοιχία με σύστημα παρακολούθησης οριζόντιου άξονα.

			Βέλ	πιστη διό	ιταξη σ	υστατικ	ών του Μ	ΑΣΗΕ		Απόκλιση
Μέθοδος	۸F	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο
	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)
ГА	8	0	25	5	0	70	32	ΠФ	0.22754	0.54
ΓΑ+ΑΤ	8	0	25	5	0	90	36	ΠФ	0.22631	0.00
ПА	8	4	20	3	8	90	34	ΠФ	0.23350	3.18
ПА+АТ	8	0	20	3	8	90	36	ΠФ	0.23035	1.79



Σχήμα 4.9: Σύγκλιση του ΓΑ για ΦΒ συστοιχία με σύστημα παρακολούθησης οριζόντιου άξονα.



Σχήμα 4.10: Επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για ΦΒ συστοιχία με σύστημα παρακολούθησης οριζόντιου άξονα.

4.4.2 Σύστημα παρακολούθησης κατακόρυφου άξονα

Η προσθήκη συστήματος παρακολούθησης κατακόρυφου άξονα θεωρείται ότι έχει ίδιο κόστος κεφαλαίου και αντικατάστασης με αυτό του συστήματος παρακολούθησης οριζοντίου άξονα. Το KHE της καλύτερης λύσης (Πίνακας 4.6) είναι αντίστοιχο με αυτό της ενότητας 4.4.1 (Πίνακας 4.5). Όσον αφορά τη σύγκριση των μεθευρετικών μεθόδων, τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους (Πίνακας 4.6). Στα Σχήματα 4.11 και 4.12 φαίνεται η εξέλιξη της επίδοσης των ΓΑ και της ΠΑ.



Σχήμα 4.11: Σύγκλιση του ΓΑ για ΦΒ συστοιχία με σύστημα παρακολούθησης κατακόρυφου άξονα.



Σχήμα 4.12: Επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για ΦΒ συστοιχία με σύστημα παρακολούθησης κατακόρυφου άξονα.

Πίνακας 4.6: Βέλτιστες λύσεις μεθευρετικών μεθόδων για ΦΒ συστοιχία με σύστημα παρακολούθησης κατακόρυφου άξονα.

	Απόκλιση									
Μέθοδος	٨Г	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο
	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)
ГА	8	3	25	5	0	100	32	ΠФ	0.22834	0.90
ΓΑ+ΑΤ	8	0	25	5	0	90	36	ΠФ	0.22631	0.00
ПА	9	1	20	5	4	100	36	ΠФ	0.22805	0.77
ПА+АТ	9	0	20	5	4	100	36	ΠФ	0.22738	0.47

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

4.4.3 Σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων

Η τοποθέτηση συστήματος παρακολούθησης δύο αξόνων θεωρείται ότι αυξάνει το κόστος κεφαλαίου της ΦΒ συστοιχίας στα 7500 €/kW (από 5000 €/kW), ενώ παράλληλα αυξάνει και το κόστος αντικατάστασης της ΦΒ συστοιχίας στα 7000 €/kW (από 4500 €/kW). Μελετώντας τα αποτελέσματα (Πίνακας 4.7) διαπιστώνεται ότι η εγκατεστημένη ισχύς των ΦΒ ουσιαστικά παραμένει μηδενική, και επομένως δεν επηρεάζεται το κόστος του συστήματος σε σχέση με το βασικό σενάριο. Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.7 διαπιστώνεται η σημαντική βελτίωση που επιφέρει στα αποτελέσματα του ΓΑ η εφαρμογή της ΑΤ. Στα Σχήματα 4.13 και 4.14 φαίνεται η εξέλιξη της επίδοσης των ΓΑ και της ΠΑ.



Σχήμα 4.13: Σύγκλιση του ΓΑ για ΦΒ συστοιχία με σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων.



Σχήμα 4.14: Επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για ΦΒ συστοιχία με σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων.

		Απόκλιση								
Μέθοδος	АΓ	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ.	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο
		(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)		(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)
ΓА	7	4	25	3	4	80	36	ΠФ	0.23397	3.01
ΓΑ+ΑΤ	9	0	25	0	4	90	38	ΠФ	0.22713	0.00
ПА	8	4	25	3	0	80	30	ΠФ	0.22980	1.18
ПА+АТ	8	4	25	3	0	100	36	ΠФ	0.22800	0.38

Πίνακας 4.7: Βέλτιστες λύσεις μεθευρετικών μεθόδων για ΦΒ συστοιχία με σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων.

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

4.5 ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΤΑ 20%

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.8 με αυτά του παραδείγματος εφαρμογής (Πίνακες 3.18 και 3.19) διαπιστώνεται ότι η αύξηση του φορτίου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού ΑΓ και συσσωρευτών, και επομένως αυξάνει την ποσότητα παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ και βελτιώνει τη διαχείρισή της στο σύστημα μέσω των συσσωρευτών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η αύξηση της τιμής του ΚΗΕ είναι αμελητέα σε σχέση με αυτή του παραδείγματος εφαρμογής. Στα Σχήματα 4.15 και 4.16 φαίνεται η εξέλιξη της επίδοσης των ΓΑ και της ΠΑ.

Πίνακας 4.8: Βέλτιστες λύσεις μεθευρετικών μεθόδων για αύξηση του φορτίου κατά 20%.

		Απόκλιση								
Μέθοδος	٨Г	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Συσσ	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο
	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2000.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)
ГА	9	2	25	10	0	100	34	ΠФ	0.22922	0.99
ГА+АТ	10	0	25	10	0	110	44	ΠФ	0.22697	0.00
ПА	10	1	30	0	8	110	40	ΠФ	0.23060	1.60
ПА+АТ	10	0	30	3	4	120	44	ΠФ	0.22775	0.34



Σχήμα 4.15: Σύγκλιση του ΓΑ για αύξηση του φορτίου κατά 20%.



Σχήμα 4.16: Επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για αύξηση του φορτίου κατά 20%.

4.6 ΕΠΙΔΟΤΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΕ ΚΑΤΑ 50%

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται το σενάριο της επιδότησης των τεχνολογιών ΑΠΕ με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους κεφαλαίου και του κόστους αντικατάστασης των ΑΓ και των ΦΒ κατά 50%. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.9 είναι το ιδιαίτερα χαμηλό ΚΗΕ που παρουσιάζουν, η αναγκαιότητα εγκατάστασης για πρώτη φορά μιας ΦΒ συστοιχίας ικανοποιητικού μεγέθους, και αντίστοιχη ποιότητα των λύσεων που προκύπτει ανεξάρτητα από τη μεθοδολογία που ακολουθείται. Στα Σχήματα 4.17 και 4.18 φαίνεται η εξέλιξη της επίδοσης των ΓΑ και της ΠΑ.



Σχήμα 4.17: Σύγκλιση του ΓΑ για επιδότηση των τεχνολογιών ΑΠΕ κατά 50%.


Σχήμα 4.18: Επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για επιδότηση των τεχνολογιών ΑΠΕ κατά 50%.

		Βέλτιστη διάταξη συστατικών του ΜΑΣΗΕ								
Μέθοδος	۸T	ΦВ	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	V	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο
	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2066.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)
ΓА	9	10	20	7.5	0	100	38	ΠФ	0.18662	0.40
ΓΑ+ΑΤ	9	9	20	7.5	0	100	36	ΠФ	0.18633	0.24
ПА	9	9	25	3	0	100	38	ΠФ	0.18602	0.08
ПА+АТ	9	8	25	3	0	100	36	ΠФ	0.18588	0.00

Πίνακας 4.9: Βέλτιστες λύσεις μεθευρετικών μεθόδων για επιδότηση των τεχνολογιών ΑΠΕ κατά 50%.

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

4.7 ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΝΤΗΖΕΛ ΚΑΤΑ 50%

Η αύξηση της τιμής του καυσίμου ντήζελ κατά 50% έχει ως σημαντικότερα επακόλουθα τη σημαντική αύξηση του ΚΗΕ του συστήματος και την εγκατάσταση ΦΒ συστοιχιών μεγαλύτερου μεγέθους. Μελετώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.10 διαπιστώνεται η ισορροπία στα τελικά αποτελέσματα όλων των εξεταζόμενων μεθόδων. Στα Σχήματα 4.19 και 4.20 φαίνεται η εξέλιξη της επίδοσης των ΓΑ και της ΠΑ..

Πίνακας 4.10: Βέλτιστες λύσεις μεθευρετικών μεθόδων για αύξηση της τιμής του καυσίμου ντήζελ κατά 50%.

		Βέλτιστη διάταξη συστατικών του ΜΑΣΗΕ								
Μέθοδος	۸E	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	N	Μετατρ.	Στρατη-	KHE	από βέλτιστο
-	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	2066.	(kW)	γική	(€/kWh)	KHE (%)
ГА	8	10	20	7.5	0	110	40	ΠФ	0.25253	1.36
ГА+АТ	9	7	20	7.5	0	120	38	ΠФ	0.24913	0.00
ПА	8	7	25	3	0	130	36	ΠФ	0.25376	1.86
ПА+АТ	9	3	25	3	0	140	42	ΠФ	0.24934	0.08

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.



Σχήμα 4.19: Σύγκλιση του ΓΑ για αύξηση της τιμής του καυσίμου ντήζελ κατά 50%.



Σχήμα 4.20: Επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για αύξηση της τιμής του καυσίμου ντήζελ κατά 50%.

4.8 ΧΡΗΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στο σενάριο αυτό εξετάζεται η αντικατάσταση των συσσωρευτών με σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει μονάδα ηλεκτρόλυσης και δεξαμενή υδρογόνου, ενώ το αποθηκευμένο υδρογόνο αξιοποιείται απευθείας από μια κυψέλη καυσίμου χωρίς αναμορφωτή. Τα κόστη της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της δεξαμενής υδρογόνου λαμβάνονται ίσα με 1200 €/kW και 800 €/kg, αντίστοιχα. Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.11 διαπιστώνεται ότι η εγκατάσταση ενός συστήματος αυτού του τύπου είναι οικονομικά ασύμφορη (υψηλό KHE), ενώ οι λύσεις στις οποίες καταλήγουν οι δύο υβριδικές μέθοδοι είναι ταυτόσημες. Στα Σχήματα 4.21 και 4.22 φαίνεται η εξέλιξη της επίδοσης των ΓΑ και της ΠΑ..



Σχήμα 4.21: Σύγκλιση του ΓΑ για ΜΑΣΗΕ με δεξαμενή υδρογόνου.



Σχήμα 4.22: Επίδοση του αλγορίθμου της ΠΑ για ΜΑΣΗΕ με δεξαμενή υδρογόνου.

Βέλτιστη διάταξη συστατικών του ΜΑΣΗΕ										Απόκλιση από
Μέθοδος	۸E	ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	Ηλεκτρ.	Δεξ. H_2	Μετατρ.	KHE	βέλτιστο ΚΗΕ
-	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kg)	(kW)	(€/kWh)	(%)
ΓА	7	0	25	10	16	12	8	14	0.29563	2.84
ΓΑ+ΑΤ	7	0	25	7.5	8	8	4	8	0.28747	0.00
ПА	7	0	25	7.5	12	12	4	14	0.29090	1.19
ПА+АТ	7	0	25	7.5	8	8	4	8	0.28747	0.00

Πίνακας 4.11: Βέλτιστες λύσεις μεθευρετικών μεθόδων για ΜΑΣΗΕ με δεξαμενή υδρογόνου.

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Ηλεκτρ. = Μονάδα ηλεκτρόλυσης, Δεξ. Η₂ = Δεξαμενή υδρογόνου, Μετατρ. = Μετατροπέας.

4.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων όλων των σεναρίων που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο αυτό διαπιστώθηκε η αναγκαιότητα εγκατάστασης μεγάλου αριθμού ΑΓ και συσσωρευτών, η υιοθέτηση της στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών και η παντελής έλλειψη σε κάθε περίπτωση των κυψελών καυσίμου. Η εγκατάσταση ΦΒ δεν αποτελεί μια πρόσφορη λύση όσο η τιμή τους παραμένει στα σημερινά επίπεδα, μπορεί όμως στο μέλλον να αποτελέσει μια ιδιαίτερα ελκυστική λύση εάν μειωθεί το κόστος τους. Επιπλέον, η χρήση δεξαμενών υδρογόνου ως σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι οικονομικά ασύμφορη σε σχέση με τους συσσωρευτές, καθώς οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα στους ΓΑ και την ΠΑ δεν εξάγει ξεκάθαρα αποτελέσματα σχετικά με την υπεροχή κάποιας από αυτές τις μεθόδους, ενώ σε κάθε περίπτωση οι υβριδικές μέθοδοι που περιλαμβάνουν την ΑΤ βελτιώνουν, ενίοτε σημαντικά, τη ποιότητα των αποτελεσμάτων.

ΔΙΚΤΥΑ ΡΕΤRΙ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό της διατριβής παρουσιάζεται μια νέα προσέγγιση στην προσομοίωση και ανάλυση αζιοπιστίας μικρών απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν ανεμογεννήτριες και ντηζελογεννήτριες. Η προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιεί δίκτυα Petri, που είναι ένα γραφικό και μαθηματικό εργαλείο μοντελοποίησης δυναμικών συστημάτων, και βασίζεται κατά κύριο λόγο σε μια υποκατηγορία τους, τα ρευστά στοχαστικά δίκτυα Petri, που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση στοχαστικών συστημάτων που περιλαμβάνουν ροές. Μια πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής είναι ότι η χρήση των ρευστών στοχαστικών δικτύων Petri συνδυάζεται με επιλογή σταθερών χρονικών διαστημάτων, αντί της υπόθεσης συνεχώς μεταβαλλόμενων ροών. Μια δεύτερη πρωτοτυπία της διατριβής είναι η εισαγωγή ενός νέου συστατικού στα δίκτυα Petri που ονομάζεται τόζο βάσης δεδομένων και επιτρέπει την εύκολη εισαγωγή μεγάλου πλήθος δεδομένων στη διαδικασία προσομοίωσης. Η αποτίμηση της λειτουργίας του μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στον υπολογισμό εννέα δεικτών αζιοπιστίας και τεσσάρων δεικτών επίδοσης του συστήματος. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν επιβεβαιώνουν την ευελιζία και τις δυνατότητες της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία για την αποτίμηση της λειτουργίας των ΜΑΣΗΕ που περιγράφηκε στα Κεφάλαια 2 έως 4 λάμβανε υπόψη το συνολικό ισοζύγιο ισχύος και ορισμένους βασικούς λειτουργικούς περιορισμούς. Παρόλα αυτά, η λειτουργία των συστημάτων αυτών στην πράξη μπορεί να εμφανίσει προβλήματα που σχετίζονται με την αξιοπιστία των ενεργειακών τεχνολογιών που αποτελούν το σύστημα. Συνήθως οι πιθανότητες μη λειτουργίας διαφορετικών ενεργειακών τεχνολογιών που αποτελούν ένα ΜΑΣΗΕ δεν είναι ίδιες μεταξύ τους, και επομένως η αποτίμηση της λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να εμπεριέχει αρκετές δυσκολίες. Η μέθοδος αποτίμησης που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα είναι η προσομοίωση. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται χρήση των δικτύων Petri για την προσομοίωση και ανάλυση αξιοπιστίας ενός ΜΑΣΗΕ που περιέχει ανεμογεννήτριες (ΑΓ) και ντηζελογεννήτρια (ΝΤΓ). Τα δίκτυα Petri είναι ένα εργαλείο που συνδυάζει τις δυνατότητες ενός μαθηματικού μοντέλου, με τις επιπλέον δυνατότητες της απεικόνισης της στατικής και δυναμικής κατάστασης του υπό μελέτη συστήματος.

5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.2.1 Τεχνικές ανάλυσης αξιοπιστίας

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται στην αποτίμηση της αξιοπιστίας των ΣΗΕ:

- 1. Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι.
- 2. Οι πιθανοτικές μέθοδοι.
- 3. Οι μέθοδοι προσομοίωσης.

Οι **αιτιοκρατικές μέθοδοι** βασίζονται σε σχετικά απλά και υποκειμενικά κριτήρια για τον καθορισμό της απαραίτητης εφεδρείας στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ενός ΣΗΕ [5.1] και έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια από τις εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πλέον συχνά χρησιμοποιούμενα αιτιοκρατικά κριτήρια είναι ο ορισμός ενός προκαθορισμένου ποσοστού εφεδρείας ηλεκτρικής ισχύος, η ύπαρξη εφεδρείας ίση με την ισχύ της μεγαλύτερης μονάδας, καθώς και συνδυασμοί των δύο παραπάνω κριτηρίων. Τα αιτιοκρατικά κριτήρια παρουσιάζουν πολύ ελκυστικά χαρακτηριστικά, όπως η απλή εφαρμογή τους, η ξεκάθαρη κατανόησή τους και η ευκολία λήψης απόφασης που προσφέρουν στους διαχειριστές ενός ΣΗΕ στην περίπτωση αντιμετώπισης σοβαρών καταστάσεων (απώλεια ισχύος, φορτίο αιχμής). Το βασικό μειονέκτημά τους είναι ότι δεν αναγνωρίζουν εγγενείς αβεβαιότητες, όπως ο τυχαίος χρόνος βλαβών των συστατικών ενός ΣΗΕ και η ζήτηση φορτίου από τους καταναλωτές, οι οποίες έχουν θεμελιώδη επίδραση στην αξιοπιστία του συστήματος. Επιπλέον, τα αιτιοκρατικά κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε ΣΗΕ που περιέχουν τεχνολογίες ΑΠΕ, όπως ΑΓ και ΦΒ, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια που οι τεχνολογίες αυτές παρέχουν δεν έχει μια προκαθορισμένη τιμή, αλλά είναι μια τυχαία συνάρτηση που μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με τις τοπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Οι πιθανοτικές μέθοδοι ξεπερνούν τα περισσότερα προβλήματα που παρουσιάζουν οι αιτιοκρατικές μέθοδοι, καθώς αναγνωρίζουν την πιθανοτική φύση των παραμέτρων ενός ΣΗΕ, επιτυγχάνοντας έτσι την κατάλληλη αποτίμηση του κινδύνου μη σωστής λειτουργίας του. Παρόλα αυτά, οι πιθανοτικές μέθοδοι δεν μπορούν να αναγνωρίσουν πλήρως τη χρονική μεταβολή κυμαινομένων πηγών, όπως η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον, δεν μπορούν να δώσουν κατανομές πυκνότητας πιθανότητας που σχετίζονται με τους διάφορους δείκτες αξιοπιστίας. Τέλος, το μοντέλο του ΣΗΕ που χρησιμοποιείται στις πιθανοτικές μεθόδους είναι συνήθως μια απλοποίηση του πραγματικού ΣΗΕ. Σε ορισμένες περιπτώσεις πολύπλοκων ΣΗΕ η απλοποίηση μπορεί να φτάσει σε τέτοιο βαθμό, ώστε το μοντέλο που προκύπτει να είναι μη ρεαλιστικό.

Οι μέθοδοι προσομοίωσης εκτιμούν τους δείκτες αξιοπιστίας προσομοιώνοντας την πραγματική χρονική εξέλιξη και την τυχαία συμπεριφορά του ΣΗΕ. Οι μέθοδοι αυτές αναφέρονται συχνά ως προσομοίωση Monte Carlo. Με αυστηρά μαθηματικούς όρους, ο όρος Monte Carlo είναι λανθασμένος, καθώς η προσομοίωση Monte Carlo αναφέρεται σε διαδικασίες που είναι πλήρως τυχαίες σε όλες τις παραμέτρους τους. Παρόλα αυτά, πολλές διαδικασίες σχετίζονται με το χρόνο, και για αυτό δεν εμπεριέχουν όλα τα τυχαία χαρακτηριστικά που χρειάζονται για να οριστεί μια πραγματική μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo. Η διαδικασία που προκύπτει όμως είναι μια στοχαστική διαδικασία, και μπορεί να αναλυθεί χρησιμοποιώντας στοχαστική προσομοίωση [5.2].

Οι μέθοδοι προσομοίωσης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: 1) μη διαδοχικές μέθοδοι, και 2) διαδοχικές μέθοδοι. Οι μη διαδοχικές μέθοδοι θεωρούν ως ανεξάρτητο το κάθε χρονικό διάστημα της προσομοίωσης, επομένως δεν μπορούν να μοντελοποιήσουν χρονικές συσχετίσεις ή διαδοχικά γεγονότα. Αντίθετα, οι διαδοχικές μέθοδοι χρησιμοποιούν κάθε χρονικό διάστημα της προσομοίωσης (ωριαίας συνήθως διάρκειας) με χρονολογική σειρά.

Η χρησιμοποίηση των μεθόδων προσομοίωσης καθιστά δυνατό τον ταυτόχρονο υπολογισμό ενός μεγάλου αριθμού δεικτών αξιοπιστίας και επίδοσης ενός ΣΗΕ. Η μεγάλη ποσότητα απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου αποτελούσε ένα σημαντικό μειονέκτημα των μεθόδων αυτών στο παρελθόν. Η κατασκευή ολοένα και ταχύτερων ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει εξαλείψει το παραπάνω πρόβλημα σε μεγάλο βαθμό.

5.2.2 Δείκτες αξιοπιστίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Η ανάλυση αξιοπιστίας της λειτουργίας ενός ΣΗΕ διαιρείται σε τρεις κύριες ιεραρχικές στάθμες. Η ιεραρχική στάθμη Ι περιλαμβάνει μόνο τις εγκαταστάσεις της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η ιεραρχική στάθμη ΙΙ περιλαμβάνει επιπρόσθετα και το δίκτυο μεταφοράς. Η ιεραρχική στάθμη ΙΙΙ περιλαμβάνει όλες τις εγκαταστάσεις του συστήματος (παραγωγή, μεταφορά, διανομή) και υπολογίζει τους δείκτες αξιοπιστίας των καταναλωτών που είναι συνδεδεμένοι στους ζυγούς φορτίου του συστήματος [5.3]. Σε καθεμία από τις παραπάνω ιεραρχικές στάθμες αντιστοιχούν διαφορετικοί δείκτες αξιοπιστίας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα ΜΑΣΗΕ συνδυάζει το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ένα ελάχιστου μεγέθους ή μη υπάρχον δίκτυο μεταφοράς, και με ένα εξαιρετικά μικρό και αρκετά συνεπτυγμένο δίκτυο διανομής [5.4]. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση αξιοπιστίας ενός ΜΑΣΗΕ υπολογίζει τους δείκτες αξιοπιστίας της ιεραρχικής στάθμης Ι.

Οι κυριότεροι δείκτες αξιοπιστίας της ιεραρχικής στάθμης Ι είναι οι ακόλουθοι [5.1], [5.3], [5.5]:

- Η πιθανότητα απώλειας φορτίου (ΠΑΦ). Είναι ο παλαιότερος και ο πιο βασικός δείκτης. Ορίζεται ως η πιθανότητα το ηλεκτρικό φορτίο να υπερβεί τη διαθέσιμη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Μειονέκτημα αυτού του δείκτη είναι ότι ορίζει την πιθανότητα αντιμετώπισης του προβλήματος αλλά όχι τη σοβαρότητά του, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο όμως, δεν μπορεί να αναγνωρίσει τη διαφορά μεταξύ μιας μικρού και μιας μεγάλου μεγέθους απώλειας φορτίου, καθώς όλες οι απώλειες φορτίου θεωρούνται ισοδύναμες.
- 2. Η αναμενόμενη απώλεια φορτίου (ΑΑΦ). Είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος δείκτης και ορίζεται ως ο μέσος αριθμός των ωρών του έτους κατά τις οποίες το ηλεκτρικό φορτίο αναμένεται να υπερβεί τη διαθέσιμη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Ο δείκτης αυτός παρουσιάζει το ίδιο μειονέκτημα με την ΠΑΦ.
- 3. Η αναμενόμενη μη τροφοδοτούμενη ενέργεια (AMTE). Ορίζεται ως η αναμενόμενη ενέργεια που δεν θα προσφερθεί στους καταναλωτές λόγω εκείνων των περιστάσεων κατά τις οποίες το ηλεκτρικό φορτίο υπερβαίνει τη διαθέσιμη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Ο δείκτης αυτός είναι πιο πλήρης σε σχέση με την ΠΑΦ και την ΑΑΦ, καθώς συμπεριλαμβάνει τη σοβαρότητα και την πιθανότητα της ανεπάρκειας εξυπηρέτησης του ηλεκτρικού φορτίου. Για το λόγο αυτό, αντιπροσωπεύει πιο ρεαλιστικά τον κίνδυνο μη εξυπηρέτησης του ηλεκτρικού φορτίου σε ένα ΣΗΕ.
- 4. Ο δείκτης αναξιοπιστίας ενέργειας (ΔΑΕ). Ο δείκτης αυτός εξομαλύνει την ΑΜΤΕ, διαιρώντας την με την ολική ετήσια ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό διασφαλίζει ότι όλα τα ΣΗΕ μπορούν να συγκριθούν επί ίσοις όροις, ανεξάρτητα από την τάξη μεγέθους της εγκατεστημένης ισχύος.

- 5. Τα λεπτά συστήματος (ΛΣ). Ο δείκτης αυτός εξομαλύνει επίσης την ΑΜΤΕ, διαιρώντας την με την ετήσια αιχμή ηλεκτρικού φορτίου. Δεν έχει την έννοια πραγματικού χρόνου, αλλά θα ήταν ίσος με την ετήσια αναξιοπιστία του ΣΗΕ εάν όλες οι διακοπές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας συνέβαιναν αποκλειστικά στην ετήσια αιχμή ηλεκτρικού φορτίου. Στην πραγματικότητα, η ετήσια διάρκεια αναξιοπιστίας ενός ΣΗΕ είναι μεγαλύτερη από την τιμή των ΛΣ.
- 6. Η συχνότητα διακοπών (ΣΔ). Ορίζεται ως ο αριθμός των χρονικών περιόδων κατά τις οποίες το ηλεκτρικό φορτίο υπερβαίνει τη διαθέσιμη ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος. Η διαφοροποίηση αυτού του δείκτη σε σχέση με την ΑΑΦ έγκειται στο γεγονός ότι η ΣΔ καταμετρά ως μία χρονική περίοδο διαδοχικές ώρες κατά τις οποίες το ηλεκτρικό φορτίο υπερβαίνει τη διαθέσιμη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.
- 7. Η διάρκεια διακοπών (ΔΔ). Ο δείκτης αυτός εκφράζει τη μέση ωριαία διάρκεια των διακοπών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, και υπολογίζεται από το πηλίκο της ΑΑΦ με τη ΣΔ.
- 8. Ο δείκτης μη παρεχόμενης ενέργειας (ΔΜΠΕ). Εκφράζει τη μέση ενέργεια που δεν προσφέρεται στους καταναλωτές ανά διακοπή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Υπολογίζεται από το πηλίκο της ΑΜΤΕ με τη ΣΔ.
- 9. Ο δείκτης απορριπτόμενου φορτίου (ΔΑΦ). Εκφράζει το ηλεκτρικό φορτίο που απορρίπτεται ανά διακοπή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, και υπολογίζεται από το πηλίκο της ΑΜΤΕ με την ΑΑΦ.

5.3 ΔΙΚΤΥΑ ΡΕΤRΙ

5.3.1 Εισαγωγή

Τα δίκτυα Petri (ΔP) παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά το 1962, στη διδακτορική διατριβή του Carl Adam Petri με τίτλο "Επικοινωνία με αυτόματα" [5.6]. Στην εργασία αυτή, τα ΔP χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή διασυνδεδεμένων συστημάτων. Η εργασία του C.A. Petri προκάλεσε το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών κατά τη δεκαετία του 1970, με αποτέλεσμα η αρχική θεωρία να συμπληρωθεί και να εξελιχθεί σημαντικά. Το 1981 παρουσιάστηκε το πρώτο βιβλίο για τα ΔP [5.7], ενώ έως σήμερα έχει παρουσιαστεί ένας μεγάλος αριθμός βιβλίων και άρθρων που επεκτείνουν τους ορισμούς και τις εφαρμογές των ΔP.

Τα ΔΡ είναι ένα χρήσιμο γραφικό και μαθηματικό εργαλείο μοντελοποίησης, που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος συστημάτων που χαρακτηρίζονται ως σύγχρονα, ασύγχρονα, κατανεμημένα, παράλληλα, μη αιτιοκρατικά ή στοχαστικά. Ως γραφικό εργαλείο, τα ΔΡ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο απεικόνισης και επικοινωνίας παρόμοιο με τα διαγράμματα ροής, τα λογικά δένδρα και τα δομικά διαγράμματα, παρέχοντας την επιπλέον δυνατότητα της προσομοίωσης των δυναμικών και παράλληλων ενεργειών του συστήματος. Ως μαθηματικό εργαλείο, τα ΔΡ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατάστρωση εξισώσεων κατάστασης, αλγεβρικών εξισώσεων και άλλων μαθηματικών μοντέλων που καθορίζουν τη συμπεριφορά των συστημάτων. Τα ΔΡ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα από άτομα που ασχολούνται είτε με τη θεωρία, είτε με τις εφαρμογές ενός επιστημονικού τομέα, παρέχοντας έτσι ένα ισχυρό μέσο συνεννόησης και επικοινωνίας μεταξύ μελών των δύο αυτών ομάδων [5.8].

Τα ΔΡ μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε περιοχή ή σύστημα που μπορεί να περιγραφεί γραφικά και να χρειάζεται μέσο απεικόνισης των ταυτόχρονων ή παράλληλων ενεργειών. Κατά την εφαρμογή των ΔΡ, είναι συχνά απαραίτητο να προστεθούν ειδικές τροποποιήσεις ή περιορισμοί που να ανταποκρίνονται στις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής. Ένας από τους τομείς στον οποίο παρατηρείται μεγάλος αριθμός και ποικιλία εφαρμογών των ΔΡ είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και τα συστήματα επεξεργασίας της πληροφορίας. Τα ΔΡ έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλούς ακόμα τομείς, όπως αξιολόγηση αποδοτικότητας, μοντελοποίηση και μελέτη ενεργειακών συστημάτων, συστημάτων παραγωγής και συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας, εφαρμογές ρομποτικού ελέγχου, ανάλυση αξιοπιστίας και ανάλυση σφάλματος, νευρωνικά δίκτυα, μοντέλα απόφασης, ιατρική και βιοτεχνολογία, ταχεία πρωτοτυποποίηση, μοντελοποίηση βιολογικών και οικολογικών διαδικασιών.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των ΔΡ είναι το πρόβλημα της πολυπλοκότητας, καθώς μοντέλα που βασίζονται σε ΔΡ τείνουν να είναι πολύ μεγάλα για να αναλυθούν, ακόμα και όταν περιγράφουν ένα μετρίου μεγέθους σύστημα. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των ΔΡ είναι η αναγκαιότητα χρήσης υπολογιστικών εργαλείων για τη μοντελοποίηση και ανάλυση πρακτικών εφαρμογών.

Τα ΔΡ διαιρούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες [5.9]:

- 1. Τα συνήθη ΔΡ.
- 2. Τις συντμήσεις των συνήθων ΔΡ.
- 3. Τις επεκτάσεις των συνήθων ΔΡ.

5.3.2 Συνήθη δίκτυα Petri

Τα συνήθη ΔΡ αποτέλεσαν το βασικό μοντέλο για όλες τις παραλλαγές και επεκτάσεις που προέκυψαν μεταγενέστερα. Το μοντέλο του συνήθους ΔΡ δεν λαμβάνει υπόψη την έννοια του χρόνου, αλλά αναπαριστά ακολουθίες εκτέλεσης διακριτών γεγονότων, καθώς και τις λογικές συνδέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών μερών του υπό μελέτη συστήματος [5.10].

Ένα ΔΡ συνίσταται από τις θέσεις, τις μεταβάσεις και τα τόξα, που καθορίζουν τα συστατικά του χαρακτηριστικά. Οι θέσεις χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν πιθανές συνθήκες, δεδομένα ή πόρους του συστήματος. Οι μεταβάσεις χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν γεγονότα τα οποία μπορούν να τροποποιήσουν την κατάσταση του συστήματος. Τα τόξα προσδιορίζουν τη συσχέτιση μεταξύ των καταστάσεων και των γεγονότων με δύο τρόπους: υποδεικνύουν την κατάσταση κατά την οποία ένα γεγονός μπορεί να συμβεί, καθώς και τους μετασχηματισμούς της κατάστασης που προκαλούνται από αυτό το γεγονός.

Τα δείγματα είναι αφηρημένες οντότητες που ενυπάρχουν στις θέσεις και χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την κατάσταση του ΔΡ (η οποία καλείται και σήμανση του ΔΡ). Τα δείγματα μπορούν να μετακινούνται, να δημιουργούνται ή να εξαφανίζονται. Εάν μια θέση περιγράφει μια συνθήκη, και κατά συνέπεια μπορεί να περιέχει ένα ή κανένα δείγμα, η συνθήκη είναι αληθής εάν ένα δείγμα εμπεριέχεται στη θέση, διαφορετικά είναι ψευδής. Εάν μια θέση καθορίζει δεδομένα ή πόρους, ο αριθμός των δειγμάτων που υπάρχουν σε μία θέση χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τη διαθέσιμη ποσότητα των δεδομένων ή των πόρων.

Ένα σύνηθες ΔΡ αναπαρίσταται γραφικά από ένα διμερές προσανατολισμένο γράφημα, στο οποίο οι θέσεις απεικονίζονται ως κύκλοι (\bigcirc), ενώ οι μεταβάσεις απεικονίζονται είτε ως μπάρες (\blacksquare), είτε ως τετράγωνα (\square). Τα δείγματα απεικονίζονται ως μαύρες τελείες (•) μέσα στις θέσεις. Όταν μια θέση περιέχει μεγάλο αριθμό δειγμάτων, αναγράφεται μέσα σε αυτή ο αντίστοιχος αριθμός τους. Τα τόξα ($_$) είναι προσανατολισμένα και μπορούν να συνδέουν θέσεις με μεταβάσεις ή το αντίστροφο, αλλά ένα τόξο δεν επιτρέπεται να συνδέσει στοιχεία του ίδιου συνόλου. Ένα πολύ απλό σύνηθες ΔΡ απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1, στο οποίο οι δύο θέσεις p_1 και p_2 , και οι δύο μεταβάσεις t_1 και t_2 συνδέονται με τέσσερα τόξα. Οι δύο θέσεις p_1 και p_2 καθορίζουν συνθήκες, που μπορούν να αποκαλεστούν ως "συνθήκη 1" και "συνθήκη 2", αντίστοιχα. Στην κατάσταση του συστήματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1(α), η θέση p_1 περιέχει ένα δείγμα, επομένως η "συνθήκη 1" είναι αληθής. Αντίθετα, η θέση p_2 είναι άδεια, επομένως η "συνθήκη 2" είναι ψευδής.



Σχήμα 5.1: Σύνηθες δίκτυο Petri, (α) αρχική κατάσταση, (β) τελική κατάσταση (μετά την ενεργοποίηση της t_2).

Στο ΔΡ του Σχήματος 5.1, η θέση p_1 ονομάζεται θέση εισόδου της μετάβασης t_2 , λόγω της ύπαρξης του προσανατολισμένου τόξου από την p_1 στην t_2 . Στο ίδιο Σχήμα, η θέση p_2 ονομάζεται θέση εξόδου της μετάβασης t_2 , λόγω της ύπαρξης του προσανατολισμένου τόξου από την p_2 . Με αντίστοιχο τρόπο, μια μετάβαση μπορεί να χαρακτηριστεί ως μετάβαση εισόδου ή μετάβαση εξόδου μιας θέσης. Μια μετάβαση χωρίς καμία θέση εισόδου ονομάζεται μετάβαση χωρίς καμία θέση εξόδου ονομάζεται μετάβαση χωρίς καμία θέση εξόδου ονομάζεται μετάβασης.

Η δυναμική συμπεριφορά του ΔΡ καθορίζεται από τον κανόνα ενεργοποίησης. Μια μετάβαση μπορεί να ενεργοποιηθεί εάν όλες οι θέσεις εισόδου, οι θέσεις δηλαδή εκείνες που είναι συνδεδεμένες με τη μετάβαση μέσω ενός τόξου το οποίο έχει κατεύθυνση από τη θέση προς τη μετάβαση, περιέχουν τουλάχιστον ένα δείγμα. Σε αυτή την περίπτωση, η μετάβαση λέγεται ότι βρίσκεται σε ετοιμότητα. Η ενεργοποίηση μιας μετάβασης που βρίσκεται σε ετοιμότητα μετακινεί ένα δείγμα από όλες τις θέσεις εισόδου, και δημιουργεί ένα δείγμα σε καθεμία από τις θέσεις εξόδου, τις θέσεις δηλαδή εκείνες που είναι συνδεδεμένες με τη μετάβαση προς τη θέσεις δηλαδή εκείνες που είναι σι βρίσκεται σε ετοιμότητα μετακινεί ένα δείγμα από όλες τις θέσεις εισόδου, και δημιουργεί ένα δείγμα σε καθεμία από τις θέσεις εξόδου, τις θέσεις δηλαδή εκείνες που είναι συνδεδεμένες με τη μετάβαση μέσω ενός τόξου το οποίο έχει κατεύθυνση από τη μετάβαση προς τη θέση.

Στο παράδειγμα του ΔΡ του Σχήματος 5.1(α), η μετάβαση t_2 είναι σε ετοιμότητα και μπορεί να ενεργοποιηθεί, αφαιρώντας ένα δείγμα από τη θέση p_1 και προσθέτοντας ένα δείγμα στη θέση p_2 . Στη νέα κατάσταση του συστήματος που προκύπτει (Σχήμα 5.1(β)), η "συνθήκη 2" είναι αληθής και η "συνθήκη 1" είναι ψευδής.

Ένα σύνηθες ΔΡ ορίζεται από το τετραμελές σύνολο PN = { P_{PN} , T_{PN} , A_{PN} , M_0 }, όπου P_{PN} είναι ένα πεπερασμένο και μη κενό σύνολο από θέσεις, T_{PN} είναι ένα πεπερασμένο και μη κενό σύνολο από μεταβάσεις, A_{PN} είναι ένα σύνολο από προσανατολισμένα τόξα που συνδέουν θέσεις με μεταβάσεις ή μεταβάσεις με θέσεις, ενώ M_0 είναι η αρχική σήμανση του ΔΡ.

5.3.3 Βασικές καταστάσεις που μοντελοποιούνται με δίκτυα Petri

Οι βασικές καταστάσεις που εμφανίζονται κατά τη μελέτη διακριτών συστημάτων και μπορούν να μοντελοποιηθούν με ΔP είναι η ακολουθία γεγονότων, η παραλληλία, ο συγχρονισμός και η απομνημόνευση. Η αναπαράσταση των παραπάνω καταστάσεων μέσω ΔP δείχνεται στο Σχήμα 5.2. Η απλούστερη μορφή **ακολουθίας γεγονότων** αναπαρίσταται στο Σχήμα 5.2(α), και αναφέρεται σε ένα ΔP που αποτελείται από δύο μεταβάσεις, στο οποίο η θέση εξόδου της πρώτης μετάβασης είναι θέση εισόδου για τη δεύτερη μετάβαση. Σε αυτό το ΔΡ, δεν είναι δυνατό να ενεργοποιηθεί η δεύτερη μετάβαση (t_2) αν δεν έχει ήδη ενεργοποιηθεί η πρώτη μετάβαση (t_1). Η παραλληλία αναπαρίσταται στο Σχήμα 5.2(β) και συμβαίνει όταν δύο μεταβάσεις (t_4 και t_5) είναι σε ετοιμότητα και δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, οπότε μπορούν να ενεργοποιηθούν ταυτόχρονα. Ο συγχρονισμός αναπαρίσταται στο Σχήμα 5.2(γ) και παρατηρείται όταν μια μετάβαση (t_6) έχει περισσότερες από μια θέσεις εισόδου. Στην περίπτωση αυτή, η μετάβαση αυτή δεν μπορεί να τεθεί σε ετοιμότητα εάν δεν υπάρχουν δείγματα σε όλες τις θέσεις εισόδου της. Η απομνημόνευση αναπαρίσταται στο Σχήμα 5.2(δ), όπου παρατηρείται ότι η θέση p_{12} απομνημονεύει το γεγονός ότι η μετάβαση t_7 έχει ενεργοποιηθεί, επιτρέποντας έτσι τη μελλοντική ενεργοποίηση της μετάβασης t_9 , όταν και οι υπόλοιπες συνθήκες ενεργοποίησής της ικανοποιηθούν.



Σχήμα 5.2: Βασικές καταστάσεις δικτύων Petri. (α) ακολουθία γεγονότων, (β) παραλληλία, (γ) συγχρονισμός, (δ) απομνημόνευση.

5.3.4 Συντμήσεις και επεκτάσεις συνήθων δικτύων Petri

Οι συντμήσεις των συνήθων ΔΡ αναφέρονται σε απλοποιημένες γραφικές αναπαραστάσεις τους, στις οποίες όμως υπάρχει πάντα ένα σύνηθες ΔΡ το οποίο μπορεί να αντιστοιχιστεί. Οι επεκτάσεις αναφέρονται σε μοντέλα ΔΡ, στα οποία έχουν προστεθεί κανόνες σε σχέση με τα συνήθη ΔΡ, επιτρέποντας έτσι τη μοντελοποίηση ενός μεγαλύτερου εύρους εφαρμογών [5.9]. Τα κυριότερα μοντέλα συντμήσεων και επεκτάσεων συνήθων ΔΡ είναι τα ακόλουθα:

- 1. Γενικευμένα ΔΡ.
- 2. ΔΡ πεπερασμένης χωρητικότητας.
- 3. Έγχρωμα ΔΡ.
- 4. ΔΡ προτεραιότητας.
- 5. Εκτεταμένα ΔΡ.
- 6. Χρονικά, αιτιοκρατικά και στοχαστικά ΔΡ.
- 7. Συνεχή και υβριδικά ΔΡ.
- 8. Ρευστά στοχαστικά ΔΡ.

Από τα παραπάνω μοντέλα, τα τρία πρώτα (γενικευμένα, πεπερασμένης χωρητικότητας και έγχρωμα ΔΡ) είναι συντμήσεις των συνήθων ΔΡ. Τα υπόλοιπα πέντε μοντέλα είναι επεκτάσεις των συνήθων ΔΡ, κάτι που συνεπάγεται ότι ορισμένες από τις ιδιότητες των συνήθων ΔΡ (αλλά όχι όλες) είναι εφαρμόσιμες σε αυτά. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένα από τα μοντέλα που αναφέρονται παραπάνω μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους, όπως π.χ. στην περίπτωση των γενικευμένων στοχαστικών ΔΡ [5.11], των εκτεταμένων έγχρωμων ΔΡ [5.12], κλπ.

5.3.4.1 Γενικευμένα δίκτυα Petri

Σε ένα γενικευμένο ΔΡ, κάθε τόξο συνοδεύεται από ένα θετικό ακέραιο αριθμό που αντιπροσωπεύει το βάρος πολλαπλότητάς του. Σε περίπτωση που σε κάποιο τόξο δεν εμφανίζεται ο αριθμός αυτός, το βάρος του θεωρείται μοναδιαίο. Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζεται ένα γενικευμένο ΔΡ, όπου το τόξο από την p_1 στην t_1 έχει βάρος 2, το τόξο από την t_1 στην p_4 έχει βάρος 4, ενώ τα υπόλοιπα δύο τόξα έχουν μοναδιαίο βάρος. Όταν ένα τόξο από την p_i στην t_j έχει βάρος w, η t_j θα βρίσκεται σε ετοιμότητα εάν η p_i περιέχει τουλάχιστον w δείγματα. Όταν η μετάβαση t_j ενεργοποιηθεί, θα αφαιρεθούν w δείγματα από τη θέση p_i . Όταν ένα τόξο από την t_j στην t_j στην p_i έχει βάρος w, όταν η μετάβαση t_j ενεργοποιηθεί, θα προστεθούν w δείγματα στη θέση p_i .

Το Σχήμα 5.3(α) απεικονίζει την αρχική κατάσταση του ΔΡ, κατά την οποία η μετάβαση t_1 είναι σε ετοιμότητα. Η ενεργοποίηση της t_1 οδηγεί το ΔΡ στην κατάσταση που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3(β), στην οποία έχουν αφαιρεθεί δύο δείγματα από την p_1 και ένα δείγμα από την p_2 , ενώ έχει προστεθεί ένα δείγμα στην p_3 και τέσσερα δείγματα στην p_4 .



Σχήμα 5.3: Γενικευμένο Δίκτυο Petri, (α) αρχική κατάσταση, (β) τελική κατάσταση (μετά την ενεργοποίηση της *t*₁).

Ένα γενικευμένο ΔP ορίζεται από το πενταμελές σύνολο GPN = { P_{PN} , T_{PN} , A_{PN} , W_{PN} , M_0 }, όπου τα P_{PN} , T_{PN} , A_{PN} και M_0 ορίζονται όπως στα συνήθη ΔP, ενώ ως W_{PN} ορίζεται η συνάρτηση των βαρών των τόξων.

5.3.4.2 Δίκτυα Petri πεπερασμένης χωρητικότητας

Σε ένα ΔΡ πεπερασμένης χωρητικότητας, ο μέγιστος αριθμός δειγμάτων που μπορούν να εμπεριέχονται σε μία θέση έχει ως άνω όριο ένα θετικό ακέραιο αριθμό. Η χωρητικότητα μιας θέσης p_i δηλώνεται ως $B_{PN}(p_i)$. Για να βρεθεί σε ετοιμότητα μια μετάβαση t_j ενός ΔΡ πεπερασμένης χωρητικότητας, χρειάζεται να ισχύει μία επιπλέον συνθήκη σε σχέση με τα συνήθη ΔΡ: ο αριθμός των δειγμάτων σε κάθε θέση εξόδου της t_j δεν πρέπει να υπερβαίνει την $B_{PN}(p_i)$, μετά την ενεργοποίηση της t_j . Ένα ΔΡ πεπερασμένης χωρητικότητας ορίζεται από το εξαμελές σύνολο BPN = $\{P_{PN}, T_{PN}, A_{PN}, B_{PN}, W_{PN}, M_0\}$, όπου τα $P_{PN}, T_{PN}, A_{PN}, W_{PN}$ και M_0 ορίζονται όπως στα γενικευμένα ΔP, ενώ ως B_{PN} ορίζεται η συνάρτηση που περιγράφει τη χωρητικότητα κάθε θέσης.

5.3.4.3 Έγχρωμα δίκτυα Petri

Τα έγχρωμα ΔΡ χρησιμοποιούνται για την απλοποίηση ΔΡ στις περιπτώσεις που διαφορετικοί τύποι πόρων ή δεδομένων χρησιμοποιούν το ίδιο σύστημα διάθεσης των πόρων ή επεξεργασίας των δεδομένων. Τα έγχρωμα ΔΡ αποτελούν μια πιο συμπαγή αναπαράσταση, που επιτυγχάνεται με την επισύναψη σε κάθε δείγμα μιας τιμής, που καλείται **χρώμα**. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι οποιουδήποτε τύπου (π.χ., μία εγγραφή, στην οποία το πρώτο πεδίο να είναι ένας πραγματικός αριθμός, το δεύτερο πεδίο μια ακολουθία αλφαριθμητικών χαρακτήρων, το τρίτο πεδίο ένας δυαδικός αριθμός, κλπ). Για μια δεδομένη θέση του ΔΡ, όλα τα δείγματα πρέπει να έχουν χρώματα που να ανήκουν σε έναν προκαθορισμένο τύπο, ο οποίος καλείται σύνολο χρωμάτων της θέσης [5.13].

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η διαδικασία της απλοποίησης της γραφικής αναπαράστασης που επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης των έγχρωμων ΔΡ. Στο Σχήμα 5.4(α) παρουσιάζονται τα δύο αρχικά τμήματα ενός συνήθους ΔΡ, τα οποία έχουν την ίδια δομή και περιγράφουν τη συμπεριφορά του δικτύου για δύο διαφορετικούς τύπους δεδομένων c και d. Το ισοδύναμο έγχρωμο ΔΡ που προκύπτει παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4(β). Η θέση p_1 , που αναπαριστά το σύνολο των θέσεων { p_{1c} , p_{1d} }, περιέχει δύο δείγματα: η μία έχει το χρώμα $\langle c \rangle$ και η άλλη το χρώμα $\langle d \rangle$. Η μετάβαση t_1 αναπαριστά το σύνολο των μεταβάσεων { t_{1c} , t_{1d} }, και μπορεί να ενεργοποιηθεί για κάθε χρώμα του συνόλου { $\langle c \rangle, \langle d \rangle$ }.



Σχήμα 5.4: Μοντελοποίηση μέσω έγχρωμων ΔΡ, (α) αρχικά τμήματα συνήθους ΔΡ ίδιας δομής, (β) ισοδύναμο έγχρωμο ΔΡ.

Οι συνθήκες ενεργοποίησης μιας μετάβασης καθορίζονται από τις συναρτήσεις που σχετίζονται με κάθε τόξο. Επιπλέον, είναι δυνατό να επισυναφθεί σε κάθε μετάβαση μια έκφραση της άλγεβρας Boole, η οποία καλείται προφύλαξη. Στην περίπτωση συνύπαρξης συναρτήσεων τόξων και

προφύλαξης μετάβασης, η ενεργοποίηση της μετάβασης γίνεται όταν: 1) ικανοποιούνται όλες οι συναρτήσεις τόξων της μετάβασης από τις σημάνσεις των θέσεων εισόδου, και 2) ικανοποιείται η συνθήκη προφύλαξης της μετάβασης.

Τα έγχρωμα ΔΡ συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα αναπαράστασης των ΔΡ με τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι γλώσσες προγραμματισμού. Ένα έγχρωμο ΔΡ ορίζεται από το επταμελές σύνολο CPN = { P_{PN} , T_{PN} , A_{PN} , W_{PN} , Σ_{PN} , G_{PN} , M_0 }, όπου τα P_{PN} , T_{PN} , A_{PN} , W_{PN} και M_0 ορίζονται όπως στα γενικευμένα ΔΡ, Σ_{PN} είναι ένα πεπερασμένο σύνολο χρωμάτων των θέσεων, και G_{PN} είναι οι συναρτήσεις προφύλαξης των μεταβάσεων.

5.3.4.4 Δίκτυα Petri προτεραιότητας

Τα ΔΡ προτεραιότητας χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπιστεί το δομικό πρόβλημα της σύγκρουσης σε ένα ΔΡ. Μια σύγκρουση υφίσταται όταν η ίδια θέση ενός ΔΡ είναι θέση εισόδου για δύο ή περισσότερες μεταβάσεις. Ένα παράδειγμα σύγκρουσης δίνεται στο Σχήμα 5.5(α), όπου η p_1 είναι θέση εισόδου για τις μεταβάσεις t_1 και t_2 , οι οποίες βρίσκονται σε ετοιμότητα. Επειδή υπάρχει μόνο ένα δείγμα στην p_1 , μόνο μία από τις t_1 και t_2 μπορεί να ενεργοποιηθεί, και η ενεργοποίηση της μίας από αυτές αναιρεί την ετοιμότητα της άλλης. Σε αυτή την περίπτωση, οι μεταβάσεις ονομάζονται συγκρουόμενες. Η έννοια της σύγκρουσης αναφέρεται σε μία απόφαση που πρέπει να παρθεί ανάμεσα σε δύο ή περισσότερες εναλλακτικές, όπως π.χ. στην περίπτωση διαμέρισης ενός κοινού πόρου.



Σχήμα 5.5: Επίδραση της προτεραιότητας σε ένα δίκτυο Petri, (α) συγκρουόμενες μεταβάσεις, (β) ορισμός προτεραιότητας στις μεταβάσεις, (γ) τελική κατάσταση (μετά την ενεργοποίηση της t_2).

Για να μην προκύψει το πρόβλημα της σύγκρουσης σε ένα ΔP, μπορούν να οριστούν προτεραιότητες στην ενεργοποίηση των μεταβάσεων. Η προεπιλεγμένη τιμή για την προτεραιότητα μιας μετάβασης είναι 1, ενώ μεταβάσεις με υψηλότερες προτεραιότητες απεικονίζονται εμπεριέχοντας το δείκτη προτεραιότητάς τους (π.χ., 2000). Το Σχήμα 5.5(β) απεικονίζει την μοντελοποίηση του ΔP του Σχήματος 5.5(α), όταν η t_2 έχει υψηλότερη προτεραιότητα από την t_1 . Σε αυτήν την περίπτωση, η τελική κατάσταση του ΔP απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5(γ).

Η παρουσία της προτεραιότητας σε ένα ΔΡ περιορίζει μόνο το σύνολο των ενεργοποιημένων μεταβάσεων, και επομένως των ενδεχομένων ενεργοποίησής τους, σε σύγκριση με το αντίστοιχο σύνηθες ΔΡ χωρίς προτεραιότητα στις μεταβάσεις του.

5.3.4.5 Εκτεταμένα δίκτυα Petri

Σε ένα εκτεταμένο ΔΡ, το σύνολο τόξων A_{PN} χωρίζεται σε δύο υποσύνολα: 1) στο υποσύνολο των συνήθων τόξων, που περιγράφηκαν στην ενότητα των συνήθων ΔΡ, και 2) στο υποσύνολο των επεκτάσεων των τόξων. Οι δύο δημοφιλέστεροι τύποι επεκτάσεων τόξων είναι τα **τόξα** παρεμπόδισης και τα **τόξα ελέγχου** [5.11]. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των δύο αυτών τύπων επεκτάσεων τόξων είναι ότι έχουν κατεύθυνση μόνο από θέσεις προς μεταβάσεις και όχι αντίστροφα. Τα τόξα παρεμπόδισης αναπαρίστανται από προσανατολισμένα τόξα που στο τέλος τους τοποθετείται ένας μικρός κύκλος (----), ενώ τα τόξα ελέγχου αναπαρίστανται από προσανατολισμένα τόξα με διακεκομμένη γραμμή (----). Εάν μια θέση p_i και μια μετάβαση t_j συνδέονται με ένα τόξο παρεμπόδισης βάρους w, η t_j μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο όταν η σήμανση της p_i είναι μικρότερη από w. Αντίθετα, εάν μια θέση p_i και μια μετάβαση t_j συνδέονται με ένα τόξο ελέγχου βάρους w, η t_j μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο όταν η σήμανση της p_i είναι μεγαλύτερη ή ίση από w. Η χρήση τόξων παρεμπόδισης και ελέγχου αυζάνει σημαντικά τις ικανότητες μοντελοποίησης ενός ΔΡ. Η σημαντικότερη διαφορά των τόξων αυτών από τα συνήθη τόξα είναι ότι διαμέσου των συνήθων τόξων συμβαίνει ροή δειγμάτων, ενώ διαμέσου των τόξων παρεμπόδισης και ελέγχου δεν συμβαίνει.

5.3.4.6 Χρονικά, αιτιοκρατικά και στοχαστικά δίκτυα Petri

Στα χρονικά ΔΡ εισάγεται στη λειτουργία του δικτύου η έννοια του χρόνου, την οποία είχε παραλείψει εσκεμμένα ο C.A. Petri στην αρχική του εργασία για τα ΔΡ [5.6], επειδή θεωρούσε ανεπιθύμητες κάποιες συνέπειές της. Συγκεκριμένα, η συσχέτιση με χρονικούς περιορισμούς των ενεργειών που αναπαρίστανται στα ΔΡ θα μπορούσε να παρεμποδίσει την ενεργοποίηση ορισμένων μεταβάσεων, καταρρίπτοντας έτσι τη σημαντική υπόθεση ότι όλες οι δυνατές συμπεριφορές ενός πραγματικού συστήματος αναπαρίστανται από τη δομή του ΔΡ. Επιπλέον, η έννοια του χρόνου δεν είναι σημαντική όταν λαμβάνονται υπόψη μόνο οι λογικές συσχετίσεις μεταξύ των τμημάτων ενός συστήματος. Στην περίπτωση όμως πραγματικών συστημάτων, στα οποία η αποδοτικότητα είναι ένας σημαντικός στόχος, η έννοια του χρόνου αποκτά θεμελιώδη σημασία [5.11].

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ενσωμάτωσης της έννοιας του χρόνου στα ΔΡ [5.14]. Το βασικό ζητούμενο είναι η εισαγωγή των χρονικών καθυστερήσεων να μην τροποποιεί τη συμπεριφορά του βασικού μη-χρονικού ΔΡ. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής χρησιμοποιούνται ΔΡ όπου οι χρόνοι έχουν συνδεθεί με τις μεταβάσεις, τα οποία ονομάζονται **t-χρονικά ΔP** [5.15]. Σε αυτά, οι μεταβάσεις χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: 1) τις **άμεσες μεταβάσεις**, και 2) τις **χρονικές** μεταβάσεις. Οι άμεσες μεταβάσεις, που αναπαρίστανται ως μαύρες μπάρες (**m**), αναφέρονται είτε σε γεγονότα που δεν καταναλώνουν χρόνο (π.χ., η λογική ακολουθία ενός αλγορίθμου), είτε σε γεγονότα που είναι τμήματα μιας χρονοβόρας διαδικασίας και οι διάρκειές τους είναι τόσο μικρές, ώστε να μπορούν να αγνοηθούν (π.χ., αλλαγή εργασιών σε έναν επεξεργαστή Η/Υ, της οποίας η διάρκεια θεωρείται αμελητέα σε σχέση με τη διάρκεια εκτέλεσης των εργασιών). Οι χρονικές μεταβάσεις, που αναπαρίστανται ως λευκές μπάρες (**m**), αναφέρονται σε γεγονότα των οποίων χρειάζεται να μοντελοποιηθεί η διάρκεια ολοκλήρωσής τους. Στην περίπτωση που οι χρονικές καθυστερήσεις των μεταβάσεων δίνονται από ένα σταθερό αριθμό, το χρονικό ΔΡ χαρακτηρίζεται ως **αιτιοκρατικό ΔΡ**, ενώ όταν οι χρονικές καθυστερήσεις των μεταβάσεων ορίζονται μέσω τυχαίων μεταβλητών το χρονικό ΔΡ χαρακτηρίζεται ως **στοχαστικό ΔΡ**.

Η ενεργοποίηση των μεταβάσεων στα χρονικά ΔΡ, εφόσον αυτές βρίσκονται σε ετοιμότητα, γίνεται ανάλογα με τη χρονική τους καθυστέρηση. Οι άμεσες μεταβάσεις ενεργοποιούνται αμέσως, ενώ οι χρονικές μεταβάσεις ενεργοποιούνται με καθυστέρηση ανάλογη της διάρκειας που αντιστοιχεί σε αυτές. Όταν αρκετές μεταβάσεις είναι σε ετοιμότητα για μία δεδομένη σήμανση του ΔP, η μετάβαση με τη μικρότερη σχετιζόμενη καθυστέρηση θα ενεργοποιηθεί πρώτη, απενεργοποιώντας έτσι πιθανές άλλες συγκρουόμενες μεταβάσεις. Ένα απλό παράδειγμα της λειτουργίας ενός χρονικού ΔP απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6. Σε αυτό, η μετάβαση t_1 είναι χρονική, ενώ η μετάβαση t_2 είναι άμεση. Η σήμανση του ΔP του Σχήματος 5.6(α) οδηγεί σε ενεργοποίηση της (χρονικής μετάβασης) t_1 , καθώς μόνο αυτή βρίσκεται σε ετοιμότητα. Στο ΔP του Σχήματος 5.6(β), βρίσκονται σε ετοιμότητα και οι δύο μεταβάσεις t_1 και t_2 , ενεργοποιείται όμως η άμεση μετάβαση t_2 , απενεργοποιώντας παράλληλα τη χρονική μετάβαση t_1 (Σχήμα 5.6(γ)).



Σχήμα 5.6: Χρονικά δίκτυα Petri, (α) ενεργοποίηση μετάβασης t_1 – αρχική κατάσταση, (β) ενεργοποίηση μετάβασης t_2 – αρχική κατάσταση, (γ) ενεργοποίηση μετάβασης t_2 – τελική κατάσταση.

Ένα χρονικό ΔΡ ορίζεται από το πενταμελές σύνολο TPN = { P_{PN} , T_{PN} , A_{PN} , D_{PN} , M_0 }, όπου τα P_{PN} , T_{PN} , A_{PN} και M_0 ορίζονται όπως στα συνήθη ΔΡ, ενώ το διάνυσμα D_{PN} αναπαριστά τις χρονικές καθυστερήσεις των μεταβάσεων, και είναι συνάρτηση του συνόλου των μη αρνητικών πραγματικών αριθμών.

5.3.4.7 Συνεχή και υβριδικά δίκτυα Petri

Όσοι τύποι ΔΡ έχουν αναλυθεί στις προηγούμενες ενότητες, αναφέρονται στη μοντελοποίηση διακριτών συστημάτων. Τα συνεχή ΔΡ, που προτάθηκαν στην εργασία [5.16], χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση συνεχών συστημάτων ή την προσέγγιση διακριτών συστημάτων [5.17]. Οι θέσεις σε ένα συνεχές ΔΡ ονομάζονται **συνεχείς θέσεις** και αναπαρίστανται γραφικά από διπλούς κύκλους (\bigcirc), ενώ οι μεταβάσεις ονομάζονται **συνεχείς θέσεις** και αναπαρίστανται γραφικά από διπλούς κύκλους (\bigcirc). Οι σημάνσεις στις συνεχείς θέσεις είναι πραγματικοί αριθμοί, ενώ η ενεργοποίηση των συνεχών μεταβάσεων είναι μια συνεχής διαδικασία. Ένα συνεχές ΔΡ μπορεί να μην εμπεριέχει την έννοια του χρόνου, οπότε και ονομάζεται **αυτόνομο συνεχές ΔΡ**, ή να θεωρεί ταχύτητες ενεργοποίησης συνεχές ΔΡ ορίζεται από το εξαμελές σύνολο CtPN = {*P_{PN}*, *T_{PN}*, *A_{PN}*, *W_{PN}*, *M_{PN}*, *M_{PN}*,

Τα συνεχή ΔΡ χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιούν ροές (π.χ., ροή υγρού, συνεχής παραγωγή μιας μηχανής, κλπ). Παρόλα αυτά, μία ροή μπορεί να διακοπεί απότομα, π.χ. κατά τη διακοπή λειτουργίας μιας μηχανής. Τέτοιου είδους καταστάσεις, που περιέχουν ένα διακριτό μέρος και ένα συνεχές μέρος, μπορούν να μοντελοποιηθούν μέσω των υβριδικών ΔΡ. Τα υβριδικά ΔΡ παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά στην εργασία [5.19], και περιλαμβάνουν συνεχείς και διακριτές θέσεις, καθώς και συνεχείς και διακριτές μεταβάσεις.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των υβριδικών ΔΡ είναι ότι μια σήμανση διακριτής θέσης μπορεί να μετατραπεί σε σήμανση συνεχούς θέσης και αντιστρόφως. Τα Σχήματα 5.7(α) και 5.7(β) απεικονίζουν τη μετατροπή μιας διακριτής σήμανσης σε συνεχή. Η μετάβαση t_1 είναι σε ετοιμότητα (Σχήμα 5.7(α)), οπότε η ενεργοποίησή της αφαιρεί ένα δείγμα (ακέραιος αριθμός) από τη διακριτή θέση p_1 και προσθέτει 0.75 δείγματα στη συνεχή θέση p_2 (Σχήμα 5.7(β)). Στο Σχήμα 5.7(γ) απεικονίζεται η αντίστροφη διαδικασία. Σε αυτή την περίπτωση όμως, η μετάβαση t_2 δεν είναι ενεργοποιημένη, καθώς η σήμανση της συνεχούς θέσης p_3 είναι μικρότερη από το βάρος του τόξου που συνδέει την p_3 με την t_2 .



Σχήμα 5.7: Μετατροπή σήμανσης διακριτής θέσης σε σήμανση συνεχούς θέσης και αντιστρόφως, (α) ενεργοποίηση μετάβασης t_1 – αρχική κατάσταση, (β) ενεργοποίηση μετάβασης t_1 – τελική κατάσταση, (γ) μη ενεργοποιημένη μετάβαση t_2 .

Ένα υβριδικό ΔΡ ορίζεται από το επταμελές σύνολο HPN = { P_{PN} , T_{PN} , A_{PN} , W_{PN} , h_{PN} , τ_{PN} , M_{0} }. Το σύνολο των θέσεων P_{PN} χωρίζεται στα υποσύνολα των διακριτών θέσεων P_{PNd} και των συνεχών θέσεων P_{PNc} , ενώ το σύνολο των μεταβάσεων T_{PN} χωρίζεται στα υποσύνολα των διακριτών μεταβάσεων T_{PNd} και των συνεχών μεταβάσεων T_{PNc} . Το σύνολο A_{PN} αντιπροσωπεύει το σύνολο των προσανατολισμένων τόξων, ενώ ως W_{PN} ορίζεται η συνάρτηση των βαρών των τόξων. Η συνάρτηση h_{PN} δηλώνει το είδος των κόμβων, δηλαδή αν ένας κόμβος του δικτύου είναι συνεχής ή διακριτός. Η μεταβλητή τ_{PN} αποδίδει σε κάθε μετάβαση ένα θετικό πραγματικό αριθμό. Στις διακριτές μεταβάσεις ο αριθμός αυτός αντιστοιχεί στη χρονική καθυστέρηση D_{PN} , ενώ στις συνεχείς μεταβάσεις ο αριθμός αυτός εκφράζει τη μέγιστη ταχύτητα ενεργοποίησης της μετάβασης V_{PN} . Τέλος, το M_0 αναφέρεται στην αρχική σήμανση του υβριδικού ΔΡ.

5.3.4.8 Ρευστά στοχαστικά δίκτυα Petri

Τα ρευστά στοχαστικά ΔΡ αποτελούν επέκταση των στοχαστικών ΔΡ, μέσω της εισαγωγής συνεχών θέσεων και τόξων με ρευστή ροή, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μοντελοποίηση στοχαστικών συστημάτων με ρευστή ροή. Ένα ρευστό στοχαστικό ΔΡ περιέχει δύο τύπους θέσεων: διακριτές θέσεις που περιέχουν μη αρνητικό ακέραιο αριθμό δειγμάτων, και συνεχείς θέσεις που περιέχουν ποσότητες ρευστού. Η ενεργοποίηση των μεταβάσεων καθορίζεται από τη σήμανση των διακριτών και συνεχών θέσεων, και η ροή ρευστού εκτελείται μέσω των ενεργοποιημένων χρονικών μεταβάσεων του ΔΡ. Στην αρχική τους μορφή, τα ρευστά στοχαστικά ΔΡ χρησιμοποιούσαν προσέγγιση πρώτης τάξης, σύμφωνα με την οποία ο ρυθμός ροής ρευστού κατά τον οποίο οι συνεχείς θέσεις αδειάζουν και γεμίζουν είναι αιτιοκρατικός [5.20]. Στη συνέχεια, προτάθηκαν και μοντέλα δεύτερης τάξης, στα οποία ο ρυθμός ροής ρευστού είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή [5.21]. Με αυτήν την προσέγγιση μπορούν να μοντελοποιηθούν με περισσότερη ακρίβεια σύνθετα συστήματα. Σε οποιαδήποτε από τις δύο προαναφερθείσες προσεγγίσεις, το περιεχόμενο μιας ρευστής θέσης αυξάνει και μειώνεται συνεχώς σε απειροστά μικρές ποσότητες μέσα σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα.

Η μοντελοποίηση ρευστών συστημάτων δεν περιέχει όμως πάντα ροές που ο ρυθμός τους είναι πεπερασμένος, αλλά και περιπτώσεις στιγμιαίας αύξησης ή μείωσης του ρυθμού ροής. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οι μεταβάσεις άλματος, που προκαλούν στιγμιαία αλλαγή στη σήμανση της συνεχούς θέσης. Επιπλέον, έχει οριστεί και μια ειδική κατηγορία τόξων, τα τόξα εκροής, τα οποία αδειάζουν πλήρως τη συνεχή θέση.

Η ανάλυση συστημάτων μέσω ρευστών στοχαστικών ΔΡ μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους: 1) με την αριθμητική μέθοδο, και 2) με την προσομοίωση. Η πρώτη μέθοδος στοχεύει στην αριθμητική επίλυση των μοντέλων των συστημάτων, ενώ η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί προσομοίωση οδηγούμενη από τις πιθανοτικές κατανομές που έχουν οριστεί από το χρήστη.

5.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΜΑΣΗΕ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΓΧΡΩΜΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΡΕΤRΙ

5.4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διατριβή προτείνεται η χρήση έγχρωμων ρευστών στοχαστικών ΔΡ για την προσομοίωση και ανάλυση αξιοπιστίας ενός ΜΑΣΗΕ που περιέχει ΑΓ και ΝΤΓ. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία επιλέχθηκε εξαιτίας των χαρακτηριστικών που παρουσιάζει το συγκεκριμένο πρόβλημα. Η ανάγκη για έγχρωμα ΔΡ δικαιολογείται από την ύπαρξη επαναλαμβανόμενων δομών στο μοντέλο, στην περίπτωση που το σύστημα περιλαμβάνει περισσότερες από μία ΑΓ. Η χρήση έγχρωμων ΔΡ μπορεί να μειώσει σημαντικά την πολυπλοκότητα του συνολικού μοντέλου και να απλοποιήσει την ανάλυσή του. Από την άλλη πλευρά, τα ρευστά στοχαστικά ΔΡ έχουν επιλεγεί λόγω της ιδιότητας που παρουσιάζουν να επικεντρώνονται στην εξέλιξη της στοχαστικής διαδικασίας του προς μελέτη συστήματος. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός συνεχών μεταβλητών (π.χ., παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας), καθώς και μεταβλητών που μπορούν να πάρουν μόνο ακέραιες τιμές (π.χ., δείκτης ΑΑΦ), μερικές από τις οποίες είναι στοχαστικές. Τα έγχρωμα ΔΡ και τα ρευστά στοχαστικά ΔΡ αποτελούν τις δύο βασικές συνιστώσες του υπό μελέτη συστήματος. Παρόλα αυτά, στο συνολικό μοντέλο ΔΡ που αναπτύχθηκε εμπεριέχονται στοιχεία από ΔΡ πεπερασμένης χωρητικότητας, ΔΡ προτεραιότητας, εκτεταμένα ΔΡ και υβριδικά ΔΡ.

Η διαδικασία της προσομοίωσης και ανάλυσης αξιοπιστίας ενός ΜΑΣΗΕ επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια καινοτόμο θεώρηση όσον αφορά τη χρήση των ρευστών στοχαστικών ΔΡ: αντί του καθορισμού ρυθμών ροής που περιγράφουν τη συνεχή μεταβολή του επιπέδου του ρευστού κατά την πάροδο του χρόνου, υιοθετείται η επιλογή σταθερών χρονικών διαστημάτων ωριαίας διάρκειας, έτσι ώστε να μπορέσουν να μελετηθούν τα βασικότερα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας ενός ΜΑΣΗΕ. Οι ωριαίες τιμές της κατανάλωσης ηλεκτρικού φορτίου εισάγονται στο ΔΡ χρησιμοποιώντας τα τόξα βάσης δεδομένων, τα οποία προτείνονται για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία στα πλαίσια της παρούσας διατριβής [5.22]. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η ευελιξία που παρουσιάζει, καθώς πολλές μεταβλητές εισόδου μπορούν να παραμετροποιηθούν. Επιπλέον, λόγω της φιλοσοφίας των ΔΡ, η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια κλασική διαδικασία προσομοίωσης, καθώς και ως συνδυασμός γραφικής και μαθηματικής αναπαράστασης της λειτουργίας του ΜΑΣΗΕ.

Η αποτίμηση του προς εξέταση ΜΑΣΗΕ βασίζεται στον υπολογισμό εννέα δεικτών αξιοπιστίας και τεσσάρων δεικτών επίδοσης του συστήματος. Οι εννέα δείκτες αξιοπιστίας είναι η ΠΑΦ, ΑΑΦ, ΑΜΤΕ, ΔΑΕ, ΛΣ, ΣΔ, ΔΔ, ΔΜΠΕ και ΔΠΦ που περιγράφονται αναλυτικά στην ενότητα 5.2.2. Οι τέσσερεις δείκτες επίδοσης είναι:

- 1. Η παραγόμενη ενέργεια από την/τις ΑΓ (ΠΕΑΓ), η οποία εκφράζεται σε kWh.
- 2. Η παραγόμενη ενέργεια από τη ΝΤΓ (ΠΕΝΤΓ), η οποία εκφράζεται σε kWh.
- 3. O ethous suntelestic fortion (SP) the/twn AG.
- 4. Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας (ΠΗΕ), η οποία εκφράζεται σε kWh και παράγεται από τις ΑΓ και/ή τη ΝΤΓ, αλλά δεν χρησιμοποιείται για κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

5.4.2 Χρήση ρευστών στοχαστικών δικτύων Petri

Το ρευστό στοχαστικό ΔP που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση ενός ΜΑΣΗΕ μπορεί να οριστεί ως το εξαμελές σύνολο { P_{PN} , T_{PN} , A_{PN} , B_{PN} , W_{PN} , M_0 }. Το σύνολο των θέσεων P_{PN} χωρίζεται στα υποσύνολα των διακριτών θέσεων P_{PNd} και των συνεχών θέσεων P_{PNc} , ενώ το σύνολο των μεταβάσεων T_{PN} χωρίζεται στα υποσύνολα των χρονικών μεταβάσεων T_{PNt} και των άμεσων μεταβάσεων T_{PNi} . Το σύνολο των τόξων A_{PN} χωρίζεται σε τέσσερα υποσύνολα: το υποσύνολο των συνήθων τόξων A_{PNn} , το υποσύνολο των τόξων παρεμπόδισης A_{PNi} , το υποσύνολο των τόξων ελέγχου A_{PNt} , και το υποσύνολο των τόξων βάσης δεδομένων A_{PNdb} . Η συνάρτηση B_{PN} περιγράφει τη χωρητικότητα της κάθε θέσης, ενώ η συνάρτηση W_{PN} περιγράφει τα βάρη των τόξων. Τέλος, το M_0 αναφέρεται στην αρχική σήμανση του ρευστού στοχαστικού ΔΡ.

Στα ρευστά στοχαστικά ΔΡ, η μελέτη του συνεχούς τους μέρους πραγματοποιείται υποθέτοντας ρυθμούς ροής ίσους με τα βάρη των τόξων που συνδέουν συνεχείς θέσεις και χρονικές μεταβάσεις. Η αλλαγή που προκύπτει στο επίπεδο του ρευστού είναι ίση με το γινόμενο του βάρους του τόξου και της διάρκειας της συνδεόμενης χρονικής μετάβασης. Στα μοντέλα προσομοίωσης των ΜΑΣΗΕ (π.γ., HOMER [5.23], HYBRID2 [5.24]) χρησιμοποιούνται ωστόσο σταθερά χρονικά διαστήματα, ωριαίας συνήθως διάρκειας, κατά τη διάρκεια των οποίων οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου του συστήματος θεωρούνται ότι έχουν σταθερή τιμή. Η λειτουργία του προτεινόμενου ρευστού στοχαστικού ΔΡ ακολουθεί επίσης την προσέγγιση αυτή. Οι θέσεις χρησιμοποιούνται για να υπολογίζουν τα βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του ΜΑΣΗΕ. Συγκεκριμένα, οι συνεχείς θέσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μεταβλητών που έχουν ως τιμές πραγματικούς αριθμούς. Από την άλλη πλευρά, οι διακριτές θέσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μεταβλητών που έχουν ως τιμές θετικούς ακέραιους αριθμούς, καθώς και για τον έλεγχο ενεργοποίησης των μεταβάσεων. Στο συνολικό ΔΡ που έχει αναπτυχθεί, περιέχεται μόνο μία αιτιοκρατική χρονική μετάβαση με διάρκεια ίση με το επιλεγμένο χρονικό διάστημα (μία ώρα). Οι υπόλοιπες μεταβάσεις είναι άμεσες, και η προσομοίωση εξελίσσεται χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά της ακολουθίας γεγονότων, παραλληλίας, συγχρονισμού και απομνημόνευσης που παρουσιάζουν τα ΔΡ. Τα βάρη των τόξων χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς χαρακτηριστικών του ΜΑΣΗΕ, και συχνά η τιμή τους είναι συνάρτηση της σήμανσης μιας θέσης.

Ο συνδυασμός συνεχών θέσεων με άμεσες μεταβάσεις δεν χρησιμοποιείται στα κλασσικά ρευστά στοχαστικά ΔP, καθώς έχει ως αποτέλεσμα τη διαρκή επανάληψη ενός γεγονότος με πιθανότητα ίση με τη μονάδα. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8(α), όπου η t_1 ενεργοποιείται άπειρες φορές. Συγκεκριμένα, κατά την πρώτη της ενεργοποίηση η t_1 αφαιρεί το ρευστό από την p_1 , και ύστερα συνεχίζει να ενεργοποιεί μηδενική ποσότητα ρευστού. Το σύμβολο M_{Pi} που σχετίζεται με ορισμένα τόξα δηλώνει ότι το βάρος τους είναι ίσο με την τρέχουσα σήμανση της θέσης p_i . Η μοντελοποίηση της ίδιας διαδικασίας σύμφωνα με το Σχήμα 5.8(β) επιλύει το παραπάνω πρόβλημα. Ο αριθμός ενεργοποιήσεων της μετάβασης t_1 είναι ίσος με τον αριθμό των δειγμάτων στη θέση p_2 . Ακόμη, η παρουσία της p_2 δίνει στο χρήστη την επιπλέον πληροφορία που σχετίζεται με τη συχνότητα της εμφάνισης ενός γεγονότος.



Σχήμα 5.8: Έλεγχος ενεργοποίησης μιας άμεσης μετάβασης όταν συνδέεται με μια συνεχή θέση εισόδου, (α) συνεχής ενεργοποίηση μετάβασης t_I – απουσία διακριτής θέσης, (β) ενεργοποίηση μετάβασης t_I μια φορά– παρουσία διακριτής θέσης p_2 .

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα που είναι ισοδύναμο με τη συνθήκη ελέγχου EAN. Η παρουσία ενός δείγματος στη διακριτή θέση p_2 είναι απαραίτητη για να ενεργοποιηθεί μια φορά η μετάβαση που ικανοποιεί την αληθή συνθήκη. Η μετάβαση t_1 ενεργοποιείται όταν η σήμανση της p_1 είναι μεγαλύτερη ή ίση από 5 (που είναι το βάρος του τόξου ελέγχου), ενώ η μετάβαση t_2 ενεργοποιείται όταν η σήμανση της p_1 είναι μικρότερη από 5 (που είναι το βάρος του τόξου παρεμπόδισης). Για τα αριθμητικά δεδομένα του Σχήματος 5.9(α), η ενεργοποιούμενη μετάβαση είναι η t_1 , ενώ στο Σχήμα 5.9(β) δείχνεται ότι η τελική σήμανση της θέσης p_3 είναι ίση με 5 (που είναι η σήμανση της θέσης p_1).



Σχήμα 5.9: Υλοποίηση συνθήκης ελέγχου χρησιμοποιώντας τόξα ελέγχου και τόξα παρεμπόδισης, (α) αρχική κατάσταση, (β) τελική κατάσταση.

5.4.3 Τόξα βάσης δεδομένων

Σε μια προσομοίωση που εκτελείται μέσω ενός ΔΡ, είναι πιθανό ορισμένες μεταβλητές, που η τιμή τους αντιπροσωπεύεται από τις σημάνσεις των θέσεων, να χρειάζεται να λάβουν συγκεκριμένες τιμές που είτε δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν σε περιβάλλον ΔΡ, είτε η μοντελοποίησή τους αυξάνει σημαντικά τη γραφική πολυπλοκότητα του συστήματος. Για παράδειγμα, η εξέταση της επίδοσης ενός ΜΑΣΗΕ για μια συγκεκριμένη χρονοσειρά, η οποία περιέχει ωριαίες τιμές του ηλεκτρικού φορτίου συνολικής διάρκειας ενός έτους (8760 τιμές), απαιτεί την προσθήκη ενός μεγάλου αριθμού θέσεων, μεταβάσεων και τόξων, έτσι ώστε να ανακτηθεί η επιθυμητή τιμή του φορτίου για κάθε ώρα. Για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων, εισάγεται στην παρούσα διατριβή η έννοια των τόξων βάσης δεδομένων.

Λόγω του διακριτού τύπου της, η θέση εισόδου ενός τόξου βάσης δεδομένων έχει κάτω όριο σήμανσης ίσο με το μηδέν, και μπορεί να θέσει σε ετοιμότητα τη μετάβαση εξόδου της εάν η σήμανσή της είναι μεγαλύτερη από το μηδέν. Μετά τη διαδικασία της ενεργοποίησης, η σήμανση της θέσης εισόδου μηδενίζεται και η μετάβαση μπορεί να ενεργοποιηθεί ξανά μόνο εφόσον η θέση εισόδου της αποκτήσει σήμανση διαφορετική του μηδενός. Επιπλέον, στη σήμανση κάθε θέσης εισόδου ενός τόξου βάσης δεδομένων ορίζεται ένα άνω όριο, το οποίο είναι ίσο με τον αριθμό των στοιχείων του πίνακα εισόδου για τη δεδομένη διάσταση του πίνακα. Σε περίπτωση που η σήμανση της θέσης εισόδου υπερβεί το άνω όριό της, η μετάβαση δεν ενεργοποιείται.

Στο Σχήμα 5.10 αναπαρίσταται και εξηγείται η λειτουργία ενός τόξου βάσης δεδομένων. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, θεωρείται ότι το τόξο βάσης δεδομένων μπορεί να ανακτήσει τιμές που εμπεριέχονται στον κάτωθι πίνακα **A**:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & -12.4 & \cos(\pi/4) \\ 6.98 & \ln(5) & 9 & 37 \\ -\sqrt{3} & 74 & -42 & \exp(3) \end{bmatrix}.$$
 (5.1)



Σχήμα 5.10: Λειτουργία του τόξου βάσης δεδομένων, (α) ενεργοποίηση μετάβασης t_I – αρχική κατάσταση, (β) ενεργοποίηση μετάβασης t_I – τελική κατάσταση.

Το τόξο βάσης δεδομένων που αναπαρίσταται στο Σχήμα 5.10 έχει αριθμό διάστασης ίσο με το δύο, καθώς ο πίνακας **A** είναι δυσδιάστατος, και επομένως η θέση εισόδου p_1 περιέχει δείγματα δύο χρωμάτων. Για λόγους ευκρίνειας, η σήμανση της p_1 που αντιστοιχεί στη γραμμή του επιθυμητού στοιχείου του **A** αναπαρίσταται με μαύρο χρωματισμό, ενώ η σήμανση της p_1 που αντιστοιχεί στη στήλη του επιθυμητού στοιχείου του **A** αναπαρίσταται με γκρίζο χρωματισμό. Άρα, το επιθυμητό στοιχείο βρίσκεται στη δεύτερη γραμμή και στην τρίτη στήλη του **A**. Το Σχήμα 5.10(β) δείχνει την κατάσταση του ΔP μετά την ενεργοποίηση της t_1 , κατά την οποία η θέση p_2 έχει σήμανση ίση με το 9, καθώς **A**(2, 3) = 9. Μετά την ενεργοποίηση της t_1 , η θέση εισόδου p_1 δεν περιέχει δείγματα σε κανένα από τα δύο χρώματά της.

Υιοθετώντας την παραπάνω μεθοδολογία, είναι δυνατόν να ανακτήσουμε την επιθυμητή τιμή από έναν πίνακα με τον κατάλληλο ορισμό της σήμανσης της θέσης εισόδου του τόξου βάσης δεδομένων. Για παράδειγμα, η λειτουργία ενός ΔΡ μπορεί να ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να ανακτώνται διαδοχικά τα στοιχεία μιας γραμμής, μιας στήλης ή μιας διαγωνίου ενός πίνακα, ενώ είναι επίσης δυνατή μια τυχαία επιλογή τους. Η χρήση των τόξων βάσης δεδομένων μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη στις ακόλουθες περιπτώσεις, ειδικότερα εάν ο αριθμός των δεδομένων είναι μεγάλος:

- Όταν είναι επιθυμητό να εισαχθούν δεδομένα που πρέπει να έχουν συγκεκριμένες τιμές με μια δεδομένη σειρά (π.χ., μετεωρολογικά δεδομένα).
- Όταν τα δεδομένα δεν ακολουθούν κάποια τυπική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.

5.4.4 Μοντελοποίηση μικρών απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με έγχρωμα ρευστά στοχαστικά δίκτυα Petri

Οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για τη μοντελοποίηση σε ωριαία βάση ενός ΜΑΣΗΕ που περιλαμβάνει ΑΓ και ΝΤΓ είναι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, η ταχύτητα του ανέμου, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ΑΓ, και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΝΤΓ. Όλες οι απαιτούμενες προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν με το λογισμικό Visual Object Net ++ [5.25]. Η δομή του προτεινόμενου ΔΡ περιλαμβάνει πέντε υποδίκτυα Petri (υΔΡ):

- Το υΔΡ εισόδου, που περιέχει χρονική πληροφορία και τιμές των παραμέτρων.
- Το υΔΡ φορτίου, το οποίο εισάγει τα δεδομένα ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

- Το υΔΡ ανεμογεννητριών, που προσομοιώνει τη λειτουργία των ΑΓ και υπολογίζει ορισμένους δείκτες επίδοσης του ΜΑΣΗΕ (ΠΕΑΓ, ΣΦ).
- 4. Το υΔΡ ντηζελογεννήτριας, που προσομοιώνει τη λειτουργία της ΝΤΓ και υπολογίζει ορισμένους από τους δείκτες αξιοπιστίας (ΑΑΦ, ΑΜΤΕ) και τους εναπομείναντες δείκτες επίδοσης του ΜΑΣΗΕ (ΠΕΝΤΓ, ΠΗΕ).
- 5. Το υΔΡ εξόδου, που υπολογίζει τους εναπομείναντες δείκτες αξιοπιστίας του ΜΑΣΗΕ.

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πέντε παραπάνω υΔΡ αναπαρίστανται στο Σχήμα 5.11. Τα τρία ενδιάμεσα υΔΡ (υΔΡ φορτίου, υΔΡ ΑΓ και υΔΡ ΝΤΓ) υπολογίζουν τη ζήτηση και παραγωγή της ενέργειας του συστήματος. Στο υΔΡ φορτίου τα δεδομένα εισάγονται μέσω τόξων βάσης δεδομένων. Το υΔΡ ΑΓ περιέχει τη διαδικασία προσομοίωσης μίας ή περισσότερων ΑΓ. Σε περίπτωση ύπαρξης περισσότερων της μίας ΑΓ, η μοντελοποίηση γίνεται μέσω ενός έγχρωμου ΔΡ, στο οποίο χρησιμοποιείται διαφορετικό χρώμα για κάθε ΑΓ. Η διαδικασία αυτή είναι ισοδύναμη με ένα επαναληπτικό βρόχο. Το υΔΡ ΝΤΓ προσομοιώνει τη λειτουργία και τη συντήρηση της ΝΤΓ. Τα υΔΡ φορτίου και ΑΓ χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στο υΔΡ ΝΤΓ, καθώς η λειτουργία της ΝΤΓ σε μια δεδομένη ώρα εξαρτάται από τις τιμές φορτίου και αιολικής ενέργειας της ώρας αυτής. Αν και το προτεινόμενο ΔΡ προσομοιώνει τη λειτουργία του ΜΑΣΗΕ για ολόκληρο το έτος, με λίγες τροποποιήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξετάσει τα αποτελέσματα μιας δεδομένης περίοδου του έτους (π.χ., καλοκαιρινή περίοδος, συγκεκριμένοι μήνες ή εβδομάδες, κλπ).



Σχήμα 5.11: Δομή του προτεινόμενου ΔΡ για τη μοντελοποίηση ενός ΜΑΣΗΕ.

5.4.4.1 Υποδίκτυο Petri εισόδου

Το υΔΡ εισόδου περιέχει όλες τις τιμές που μπορούν να τροποποιηθούν από το χρήστη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ευέλικτη παραμετροποίηση του υπό μελέτη συστήματος. Επιπλέον, εμπεριέχει όλες τις μεταβλητές που περιγράφουν το χρόνο προσομοίωσης, έτσι ώστε να μπορεί να αποτιμηθεί η επίδοση ενός ΜΑΣΗΕ υπό διαφορετικές συνθήκες. Οι θέσεις του υΔΡ εισόδου, η περιγραφή τους, ο τύπος τους (συνεχείς (Σ) ή διακριτές (Δ)) και οι αρχικές τους τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Θέση	Περιγραφή	Τύπος	Αρχική τιμή (Βασικό σενάριο)
p _{i1}	Αριθμός ετών προσομοίωσης	Δ	100
p_{i2}	Υπολειπόμενες ώρες του έτους	Δ	8760
p _{i3}	Τρέχουσα ώρα του έτους	Δ	0
p _{i4}	Ετήσια αιχμή φορτίου	Σ	20.00 kW
p _{i5}	Παράμετρος μορφής κατανομής Weibull, k_w	Σ	2.00
p <i>i6</i>	Μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, \overline{V}_{annual}	Σ	6.00 m/s
p _{i7}	Αριθμός ΑΓ	Δ	1
p _{i8}	Ονομαστική ισχύς ΑΓ, P _R	Σ	20.00 kW
p_{i9}	Ύψος πλήμνης ΑΓ, <i>z_{hub}</i>	Σ	30.00 m
p _{i10}	Παράμετρος εκθετικού νόμου, <i>a</i>	Σ	0.20
p _{i11}	Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας ΑΓ, V _{in}	Σ	3.00 m/s
p _{i12}	Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας ΑΓ, V _{out}	Σ	24.00 m/s
p _{i13}	Μέσος χρόνος βλάβης ΑΓ, ΜΧΒ	Δ	1920 h
p _{i14}	Μέσος χρόνος επισκευής ΑΓ, ΜΧΕ	Δ	80 h
p _{i15}	Μέγιστη ισχύς ΝΤΓ	Σ	15.00 kW
p _{i16}	Ελάχιστο επιτρεπτό ποσοστό λειτουργίας ΝΤΓ	Σ	0.30
	συναρτήσει της μέγιστης ισχύος της	F	0.40
p _{i17}	Απαιτούμενη λειτουργική εφεδρεία σε σχέση με την	Σ	0.10
	τρέχουσα τιμή του ηλεκτρικού φορτίου, r _{load}	F	0.50
p_{i18}	Απαιτούμενη λειτουργική εφεδρεία σε σχέση με την	Σ	0.50
	τρεχουσα παραγομενή ισχυ της AI, r_{WT}		arth 150 h) areas ather
p _{i19}	Προγραμματισμένη συντηρηση ΝΠ	Δ	ανα 150 η λειτουργιας
p_{i20}	κατωτερο οριο διαρκειας συντηρησης ΝΠ	Δ	I h
p_{i21}	Ανωτερο οριο διάρκειας συντήρησης ΝΠ	Δ	/ h
p_{i22}	Πιθανότητα βλάβης ΝΤΓ λόγω επανεκκίνησης	Σ	0.04

Πίνακας 5.1: Αρχικές τιμές των θέσεων στο υΔΡ εισόδου.



Σχήμα 5.12: Υποδίκτυο Petri φορτίου που υλοποιείται με χρήση τόξων βάσης δεδομένων.

5.4.4.2 Υποδίκτυο Petri φορτίου

Το υΔΡ φορτίου υλοποιείται με τη βοήθεια των τόξων βάσης δεδομένων και παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.12. Ο πίνακας εισόδου **Load** περιέχει 8760 ωριαίες τιμές ηλεκτρικού φορτίου που εκφράζονται ως ποσοστό του ετήσιου φορτίου αιχμής και προέρχονται από το IEEE-RTS [5.26]. Το φορτίο υπολογίζεται στην p_{l3} με πολλαπλασιασμό του ποσοστού κάθε ώρας, p_{l1} , με το ετήσιο φορτίο αιχμής, p_{i4} . Η θέση p_{l5} αθροίζει τις ωριαίες τιμές του φορτίου και επομένως υπολογίζει την ολική ετήσια ζήτηση φορτίου.

5.4.4.3 Υποδίκτυο Petri ανεμογεννήτριας

Η μοντελοποίηση των ΑΓ υλοποιείται μέσω μιας καμπύλης ισχύος που βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα. Η επιλεγμένη ΑΓ έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: ονομαστική ισχύς P_R ίση με 20 kW, ταχύτητα έναρξης λειτουργίας V_{in} ίση με 3 m/s και ταχύτητα διακοπής λειτουργίας V_{out} ίση με 24 m/sec. Η εξίσωση που περιγράφει την ισχύ της ΑΓ P_{WT} στο διάστημα [V_{in} V_{out}] είναι η ακόλουθη:

$$P_{WT} = 1.07 \cdot 10^{-6} \cdot V_{air}^{7} - 1.20 \cdot 10^{-4} \cdot V_{air}^{6} + 5.36 \cdot 10^{-3} \cdot V_{air}^{5} -0.12 \cdot V_{air}^{4} + 1.42 \cdot V_{air}^{3} - 8.46 \cdot V_{air}^{2} + 24.24 \cdot V_{air} - 26.36$$
(5.2)
$$\gamma \iota \alpha \quad V_{in} \leq V_{air} \leq V_{out}$$

όπου V_{air} είναι η ταχύτητα του ανέμου. Στην ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων, δύο κατανομές πυκνότητας πιθανότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν την ταχύτητα του ανέμου: η κατανομή Rayleigh και η κατανομή Weibull. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η κατανομή Weibull, καθώς μπορεί να αναπαραστήσει με καλύτερο τρόπο μεγαλύτερη ποικιλία ανεμολογικών συνθηκών [5.27]. Η κατανομή Weibull απαιτεί τη γνώση δύο παραμέτρων: της παραμέτρου μορφής k_w και της παραμέτρου κλίμακας c_w . Για ανεμολογικά δεδομένα, οι τιμές της k_w κυμαίνονται πλησίον του 2, ενώ μια ακριβής προσέγγιση της c_w για περιοχή τιμών της k_w ανάμεσα στο 1.5 και το 4 δίνεται από την ακόλουθη σχέση [5.28]:

$$c_w = 1.128 \cdot V_{annual} \tag{5.3}$$

όπου \overline{V}_{annual} είναι η μετρούμενη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου. Για κάθε ώρα του έτους, η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του ανεμόμετρου $V_{air}(z_{anem})$ μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή της μεθόδου του αντίστροφου μετασχηματισμού στην κατανομή Weibull [5.29]:

$$V_{air}(z_{anem}) = c_w \cdot \left(-\ln(rnd(0, 1))\right)^{1/k_w}$$
(5.4)

όπου rnd(0, 1) είναι ένας ομοιόμορφα κατανεμημένος τυχαίος αριθμός στο διάστημα (0, 1). Γνωρίζοντας την V_{air}(z_{anem}), είναι δυνατό να υπολογιστεί η ταχύτητα του νέμου στο ύψος πλήμνης της ΑΓ V_{air}(z_{hub}) χρησιμοποιώντας τον εκθετικό νόμο:

$$V_{air}(z_{hub}) = V_{air}(z_{anem}) \cdot \left(\frac{z_{hub}}{z_{anem}}\right)^a.$$
(5.5)

Για τη μοντελοποίηση των ΑΓ χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες τιμές: $k_w = 2$, $V_{annual} = 6$ m/s, $z_{anem} = 10$ m, $z_{hub} = 30$ m, a = 0.20. Επιπλέον, για τις ΑΓ θεωρήθηκε πιθανότητα βλάβης ίση με 0.04, με μέσο χρόνο βλάβης (MXB) ίσο με 1920 h και μέσο χρόνο επισκευής (MXE) ίσο με 80 h [5.30]. Για τις δύο περιπτώσεις βλάβης και επισκευής, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου βλάβης (XB) και του χρόνου επισκευής (XE) θεωρείται ότι ακολουθεί την εκθετική κατανομή. Ο XB και ο XE μπορούν επομένως να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του αντίστροφου μετασχηματισμού στην εκθετική κατανομή [5.29]:

$$XB = -MXB \cdot \ln(rnd(0, 1))$$
(5.6)

$$XE = -MXE \cdot \ln(rnd(0, 1)).$$
(5.7)

To υΔP της AΓ απεικονίζεται στο Σχήμα 5.13. Στα τόξα του υΔP τα οποία έχουν έντονο χρώμα αντιστοιχούν βάρη διάφορα της μονάδας, οι τιμές των οποίων δίνονται στον Πίνακα 5.2. Για κάθε ώρα, η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του ανεμόμετρου υπολογίζεται στην p_{w1} χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.4) και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ταχύτητα ανέμου στο ύψος πλήμνης στην p_{w3} μέσω του εκθετικού νόμου (εξίσωση 5.5). Η τιμή της ταχύτητας ανέμου μεταφέρεται στις p_{w6} και p_{w7} , έτσι ώστε να βρεθεί το τμήμα της καμπύλης ισχύος της ΑΓ που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, όταν η ΑΓ δεν βρίσκεται υπό επισκευή. Πιο συγκεκριμένα, η p_{w6} και τα τόξα ελέγχου στην έξοδό της χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του κάτω ορίου του τμήματος της καμπύλης ισχύος. Η ενεργοποίηση των t_{w4} , t_{w5} ή t_{w6} υποδηλώνει παραγωγή ισχύος της ΑΓ όταν αντίστοιχα ισχύει $V_{air}(z_{anem}) < V_{in}$, $V_{in} \leq V_{air}(z_{anem}) < V_{out}$, ή $V_{air}(z_{anem}) \ge V_{out}$. Η παραγόμενη ενέργεια από την ΑΓ σε ωριαία βάση δείχνεται στην p_{w10} , ενώ σε ετήσια βάση δείχνεται στην p_{w21} .

Ο έλεγχος για την κατάσταση λειτουργίας και επισκευής της ΑΓ γίνεται στο δεξί τμήμα του υΔΡ του Σχήματος 5.13. Οι θέσεις p_{w13} και p_{w18} δείχνουν τον XB και XE, που έχει υπολογιστεί αντίστοιχα με τη βοήθεια των εξισώσεων (5.6) και (5.7). Η πληροφορία που περιέχεται στις θέσεις αυτές συγκρίνεται με το συνολικό χρόνο της λειτουργίας ή επισκευής της ΑΓ (ανάλογα με την κατάσταση που αυτή βρίσκεται), ο οποίος υπολογίζεται αντίστοιχα στις θέσεις p_{w14} ή p_{w19} . Εάν υπάρχει ισότητα στις σημάνσεις των p_{w13} και p_{w14} , ή των p_{w18} και p_{w19} , η μετάβαση t_{w9} ή t_{w14} ενεργοποιείται και αλλάζει την κατάσταση της ΑΓ (λειτουργία ή επισκευή), τροφοδοτώντας αντίστοιχα τη θέση p_{w17} ή p_{w12} . Σε περίπτωση που η ΑΓ βρίσκεται σε κατάσταση επισκευής, η p_{w8} δεν τροφοδοτείται με δείγμα, επομένως δεν υπάρχει παραγωγή ενέργειας από την ΑΓ κατά τη συγκεκριμένη ώρα.

Στην περίπτωση που ο αριθμός των ΑΓ είναι μεγαλύτερος του ένα, πρέπει να εκτελεστούν διαφορετικές προσομοιώσεις της λειτουργίας κάθε ΑΓ, ακόμα και όταν όλες οι ΑΓ είναι του ίδιου τύπου. Αυτό οφείλεται στη διαφοροποίηση των χρόνων λειτουργίας και επισκευής κάθε ΑΓ, καθώς αυτοί εξαρτώνται από την εκάστοτε τιμή του τυχαίου αριθμού στις εξισώσεις (5.6) και (5.7). Οι διαφορετικές ΑΓ αντιπροσωπεύονται με διαφορετικά χρώματα στο υΔΡ του Σχήματος 5.13. Συγκεκριμένα, διαφορετικά χρώματα χρησιμοποιούνται σε εκείνο το τμήμα του υΔΡ που περιέχεται μεταξύ των μεταβάσεων t_{w3} και t_{w17} . Σε αυτή την περίπτωση, το βέλος που κατευθύνεται από την t_{w17} στην p_{w21} θα αθροίσει τις σημάνσεις της θέσης p_{w10} για όλα τα χρώματα.

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω αναφέρεται σε ΑΓ όπου εφαρμόζεται αεροδυναμικός έλεγχος. Παρόλα αυτά, ακολουθώντας αντίστοιχη μεθοδολογία είναι δυνατή η μοντελοποίηση ΑΓ όπου εφαρμόζεται έλεγχος βήματος της έλικας.



Σχήμα 5.13: Υποδίκτυο Petri ανεμογεννήτριας.

Είσοδος	Έξοδος	Βάρος τόξου	Είσοδος	Έξοδος	Βάρος τόξου
<i>t</i> _{<i>i</i>1}	p _{i2}	8760	p_{w7}	t_{w4}	M_{Pill}
t_{i2}	p _{i3}	$8761 - M_{Pi2}$	p_{w7}	t_{w5}	M_{Pi12}
p _{i3}	t_{w1}	M_{Pi3}	p_{w7}	t_{w7}	M_{Pw7}
t_{w1}	p_{w1}	$1.128*M_{Pi6}*$	<i>t</i> _{w4}	p _{w10}	0
<i>p</i> _{w1}	t_{w2}	$(IIII_{PwI}) (IIII_{Pi5})$ M_{PwI}	<i>t</i> _{w5}	p _{w10}	$0.00000107*M_{Pw6}^{7} - 0.00012*M_{Pw6}^{6} + 0.00536*M_{Pw6}^{5} - 0.12*M_{Pw6}^{6} + 1.42*M_{Pw6}^{6} - 8.46*M_{Pw6}^{6} - 2$
p _{i10}	t_{w2}	M_{Pil0}	t_{w6}	p_{w10}	$+ 24.24^{*} M_{Pw6} - 20.30$
t_{w2}	p_{w3}	$M_{Pwl}^{*}(M_{Pi9}/10)^{\Lambda}M_{Pi10}$	p_{w10}	t_{w17}	M_{Pw10}
p_{w3}	t_{w3}	M_{Pw3}	t_{w17}	p_{w21}	M_{Pw10}
t_{w3}	p_{w6}	M_{Pw3}	t_{w8}	p _{w13}	$-M_{Pi13}*\ln(rnd(0, 1))$
t_{w3}	p_{w7}	M_{Pw3}	p _{w13}	t_{w9}	M_{Pw13}
p_{w6}	t_{w4}	0	p_{w14}	t_{w9}	M_{Pw13}
p_{w6}	t_{w5}	M_{Pi11}	<i>t</i> _{w13}	p_{w18}	$-M_{Pil4}*\ln(rnd(0, 1))$
p_{w6}	t_{w6}	M_{Pi12}	p _{w18}	t_{w14}	M_{Pw18}
p_{w6}	t_{w7}	M_{Pw6}	p _{w19}	<i>t</i> _{w14}	M_{Pw18}

5.4.4.4 Υποδίκτυο Petri ντηζελογεννήτριας

Η ΝΤΓ που χρησιμοποιείται έχει ονομαστική ισχύ 15 kW και απαιτεί προγραμματισμένη συντήρηση κάθε 150 ώρες λειτουργίας [5.31]. Το κατώτερο και ανώτερο όριο της διάρκειας

συντήρησης έχουν τεθεί ίσα με 1 h και 7 h [5.31], αντίστοιχα, ενώ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας έχει υποτεθεί ότι είναι ομοιόμορφη. Για κάθε ώρα προσομοίωσης, η ΝΤΓ δεν λειτουργεί μόνο στην περίπτωση που η ισχύς της ΑΓ είναι μεγαλύτερη του φορτίου κατά μία ποσότητα (λειτουργική εφεδρεία), η οποία έχει θεωρηθεί ίση με το άθροισμα του 10% του φορτίου και του 50% της ισχύος της ΑΓ. Επιπλέον, στην περίπτωση που η ΝΤΓ λειτουργεί, η ισχύς εξόδου του δεν μπορεί να είναι μικρότερη από μια προκαθορισμένη τιμή, που έχει τεθεί ίση με το 30% της μέγιστης ισχύος της ΝΤΓ. Λόγω του αναμενόμενου μεγάλου αριθμού των κύκλων έναρξης και παύσης λειτουργίας της ΝΤΓ, μια πιθανότητα βλάβης κατά την επανεκκίνηση ίση με 4% περιλαμβάνεται επιπλέον στην αποτίμηση της ΝΤΓ [5.32], ενώ η διαδικασία επισκευής αυτής της βλάβης ακολουθεί την ίδια κατανομή με αυτήν της διαδικασίας συντήρησης. Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζεται η δομή του υΔΡ ΝΤΓ. Τα βέλη με έντονο χρώμα έχουν βάρος διάφορο της μονάδας και η τιμή των βαρών αυτών παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.3.



Σχήμα 5.14: Υποδίκτυο Petri ντηζελογεννήτριας.

Στο Σχήμα 5.14, όταν η ενέργεια που παράγεται από την ΑΓ (θέση p_{w10}) είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα του φορτίου (θέση p_{l3}) και της λειτουργικής εφεδρείας (θέσεις p_{i17} και p_{i18}), η t_{c2} είναι ενεργοποιημένη και δύο γεγονότα συμβαίνουν στο υΔΡ: η πληροφορία ότι η ΝΤΓ δεν λειτουργεί τη συγκεκριμένη ώρα αυξάνει κατά ένα τη σήμανση της p_{c27} μέσω της διαδοχικής ενεργοποίησης των t_{c26} και t_{c27} , ενώ η ενέργεια της ΝΤΓ για τη συγκεκριμένη ώρα τίθεται ίση με το μηδέν (θέση p_{c33}) και η ΠΗΕ υπολογίζεται στην p_{c37} . Στην αντίθετη περίπτωση όπου η ΝΤΓ χρειάζεται να λειτουργήσει, η απαιτούμενη ισχύς του υπολογίζεται στην p_{c2} . Εάν η προκύπτουσα τιμή είναι μικρότερη από την ελάχιστη επιτρεπόμενη ισχύ λειτουργίας της ΝΤΓ, τότε ενεργοποιείται η t_{c4} και η ισχύς της ΝΤΓ τίθεται ίση με αυτό το κάτω όριο. Η θέση p_{c4} δείχνει την τελική ισχύ η οποία πρέπει να παραχθεί από τη ΝΤΓ κατά τη συγκεκριμένη ώρα.

Είσοδος	Έξοδος	Βάρος τόξου	Είσοδος	Έξοδος	Βάρος τόξου
<i>t</i> _{<i>i</i>1}	p _{i2}	8760	<i>t</i> _{c13}	p _{c13}	$M_{Pc10} - M_{Pi15}$
p_{w10}	<i>t</i> _{c1}	$M_{Pl3}^{*}(1 + M_{Pil7})$	<i>t</i> _{c15}	p _{c15}	M_{Pc10}
		+ $M_{Pw10}*M_{Pi18}$			
p_{w10}	t_{c2}	$M_{Pl3}^{*}(1 + M_{Pil7})$	p _{c12}	<i>t</i> _{c16}	M_{Pc12}
		$+ M_{Pw10} * M_{Pi18}$			
p_{w10}	<i>t</i> _{c33}	M_{Pw10}	p _{c13}	<i>t</i> _{c16}	M_{Pc13}
p ₁₃	<i>t</i> _{c1}	M_{Pl3}	p _{c15}	<i>t</i> _{c17}	M_{Pc15}
p ₁₃	<i>t</i> _{c2}	M_{Pl3}	<i>t</i> _{c16}	p _{c33}	M_{Pc12}
p ₁₃	<i>t</i> _{c33}	M_{Pl3}	<i>t</i> _{c17}	p _{c33}	M_{Pc15}
p _{i17}	<i>t</i> _{c1}	M_{Pi17}	p _{c17}	<i>t</i> _{c18}	M_{Pc17}
p _{i17}	<i>t</i> _{c2}	M_{Pi17}	<i>t</i> _{c18}	p _{c33}	0
p _{i18}	<i>t</i> _{c1}	M_{Pi18}	p _{c19}	<i>t</i> _{c19}	M_{Pi19}
p _{i18}	<i>t</i> _{c2}	M_{Pi18}	<i>t</i> _{c19}	p_{c20}	$1 + M_{Pi20} + (M_{Pi21} - M_{Pi20}) * rnd(0, 1)$
<i>t</i> _{c1}	p_{c2}	$M_{Pl3} - M_{Pw10}$	p _{c26}	<i>t</i> _{c27}	M_{Pc26}
t_{c2}	p _{c33}	0	p _{c27}	<i>t</i> _{c28}	M_{Pc27}
p_{c2}	<i>t</i> _{c4}	$M_{Pi16}*M_{Pi15}$	<i>t</i> _{c28}	p_{c28}	<i>rnd</i> (0, 1)
p_{c2}	<i>t</i> _{c5}	$M_{Pi16}*M_{Pi15}$	p _{c28}	<i>t</i> _{c29}	M_{Pi22}
p_{c2}	<i>t</i> _{c6}	M_{Pc2}	p _{c28}	<i>t</i> _{c30}	M_{Pc28}
p _{i16}	<i>t</i> _{c4}	M_{Pi16}	p _{c28}	<i>t</i> _{c31}	M_{Pi22}
p _{i16}	<i>t</i> _{c5}	M_{Pi16}	p _{c31}	<i>t</i> _{c29}	M_{Pc31}
t_{c4}	p_{c4}	$M_{Pi16}*M_{Pi15}$	p _{c31}	<i>t</i> _{c31}	M_{Pc31}
<i>t</i> _{c5}	p_{c4}	M_{Pc2}	p _{c31}	<i>t</i> _{c32}	M_{Pc31}
<i>pc</i> 4	<i>t</i> _{c7}	M_{Pc4}	p _{i22}	<i>t</i> _{c29}	M_{Pi22}
<i>pc</i> 4	<i>t</i> _{c8}	M_{Pc4}	p _{i22}	<i>t</i> _{c31}	M_{Pi22}
<i>t</i> _{c7}	p _{c17}	M_{Pc4}	<i>t</i> _{c29}	p _{c33}	0
<i>t</i> _{c8}	p_{c31}	M_{Pc4}	<i>t</i> _{c29}	p _{c20}	$1 + M_{Pi20} + (M_{Pi21} - M_{Pi20})^* rnd(0, 1)$
<i>t</i> _{c8}	p_{c8}	M_{Pc4}	<i>t</i> _{c31}	p _{c10}	M_{Pc31}
p_{c8}	<i>t</i> _{c11}	M_{Pc8}	<i>t</i> _{c33}	p _{c35}	$M_{Pc33} + M_{Pw10} - M_{Pl3}$
p_{c8}	<i>t</i> _{c12}	M_{Pc8}	p _{c35}	<i>t</i> _{c34}	0
<i>t</i> _{c11}	p _{c10}	M_{Pc8}	p _{c35}	<i>t</i> _{c35}	0
p _{c10}	<i>t</i> _{c13}	M_{Pi15}	p _{c35}	<i>t</i> _{c36}	M_{Pc35}
<i>p</i> _{c10}	<i>t</i> _{c14}	M_{Pc10}	<i>t</i> _{c34}	<i>pc</i> 37	M_{Pc35}
<i>p</i> _{c10}	<i>t</i> _{c15}	M_{Pi15}	<i>t</i> _{c35}	p _{c40}	$-M_{Pc35}$
<i>t</i> _{c13}	p _{c12}	M_{Pi15}			

Πίνακας 5.3: Τιμές μη μοναδιαίων βαρών για τα τόξα στο υΔΡ ΝΤΓ.

Υπάρχουν όμως επιπλέον συνθήκες που πρέπει να εξεταστούν στο υΔΡ πριν λειτουργήσει τελικά η NTΓ. Αρχικά, η NTΓ δεν μπορεί να λειτουργήσει αν βρίσκεται ήδη υπό επισκευή ή συντήρηση. Σε αυτή την περίπτωση η p_{c6} έχει ένα δείγμα και η t_{c7} είναι σε ετοιμότητα, οδηγώντας το υΔΡ να προσθέσει μηδέν δείγματα στη θέση p_{c33} που δείχνει την τελική ενέργεια της NTΓ. Επιπλέον, πρέπει να εξεταστεί η περίπτωση να μην λειτουργούσε η NTΓ την προηγούμενη ώρα. Εάν αυτό ισχύει, η p_{c27} θα εμπεριέχει δείγματα και η t_{c28} θα είναι σε ετοιμότητα, οδηγώντας έτσι στην εξέταση ύπαρξης βλάβης λόγω επανεκκίνησης της NTΓ. Εάν λειτουργούσε η NTΓ την προηγούμενη ώρα, η t_{c11} θα ενεργοποιηθεί, οδηγώντας έτσι σε κανονική λειτουργία της NTΓ.

Ακόμη όμως και στην περίπτωση που η ΝΤΓ λειτουργεί κανονικά μια δεδομένη ώρα, χρειάζεται να εξεταστεί ένας επιπλέον περιορισμός: εάν η ισχύς που παράγεται από τη ΝΤΓ είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ισχύ της ΝΤΓ, η επιπλέον ισχύς που χρειάζεται για να εξυπηρετηθεί το φορτίο υπολογίζεται στην p_{c13} , διαφορετικά όλη η ζήτηση φορτίου ικανοποιείται (θέση p_{c15}). Η λειτουργία της ΝΤΓ σε μια δεδομένη ώρα, που εκφράζεται μέσω της ενεργοποίησης της t_{c13} ή της t_{c15} , προσθέτει ένα δείγμα στην p_{c19} . Εάν η σήμανση της p_{c19} εξισωθεί με τον αριθμό ωρών λειτουργίας στον οποίο απαιτείται συντήρηση της ΝΤΓ (θέση p_{i19}), η t_{c19} θα ενεργοποιηθεί και η διάρκεια της επισκευής της ΝΤΓ θα υπολογιστεί στην p_{c20} , ενώ στο τέλος της διαδικασίας θα προστεθεί ένα δείγμα στην p_{c27} .

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εάν η t_{c28} βρίσκεται σε ετοιμότητα, εξετάζεται η περίπτωση βλάβης λόγω επανεκκίνησης της ΝΤΓ. Σε αυτή την περίπτωση, ένας τυχαίος αριθμός δημιουργείται στην p_{c28} και συγκρίνεται με την πιθανότητα βλάβης της ΝΤΓ λόγω επανεκκίνησης που δίνεται στην p_{i22} . Εάν ο τυχαίος αριθμός που παράγεται είναι μεγαλύτερος από την πιθανότητα βλάβης, η ΝΤΓ λειτουργεί κανονικά (η t_{c31} ενεργοποιείται). Στην αντίθετη περίπτωση, η t_{c29} ενεργοποιείται και η ΝΤΓ τίθεται υπό επισκευή, ενώ οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο υΔΡ είναι όμοιες με εκείνες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και αφορούν τη διαδικασία συντήρησης της ΝΤΓ μετά την ενεργοποίηση της t_{c19} .

Για κάθε ώρα προσομοίωσης, η ποσότητα είτε της ΠΗΕ, είτε της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας υπολογίζεται στην p_{c35} , αθροίζοντας την ενέργεια από την ΑΓ και τη ΝΤΓ και αφαιρώντας το φορτίο. Εάν η προκύπτουσα σήμανση είναι θετικός αριθμός, η t_{c34} ενεργοποιείται και η ΠΗΕ υπολογίζεται στην p_{c37} . Διαφορετικά, η μετάβαση που ενεργοποιείται είναι η t_{c35} , η οποία αυξάνει την τιμή του δείκτη ΑΑΦ κατά ένα (θέση p_{c39}) και του δείκτη ΑΜΤΕ κατά την ποσότητα της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (θέση p_{c40}).



Σχήμα 5.15: Υπολογισμός του ΔΑΦ στο υποδίκτυο Petri εξόδου.

5.4.4.5 Υποδίκτυο Petri εξόδου

Το υΔΡ εξόδου υπολογίζει τους υπόλοιπους δείκτες αξιοπιστίας οι οποίοι δεν έχουν προσδιοριστεί στο υΔΡ ΑΓ ή στο υΔΡ ΝΤΓ. Στο Σχήμα 5.15 απεικονίζεται η αρχική κατάσταση του τμήματος του υΔΡ εξόδου που υπολογίζει την ετήσια τιμή του ΔΑΦ (θέση p_{o1}), ο οποίος είναι ίσος με το πηλίκο της ΑΜΤΕ (θέση p_{c40}) με την ΑΑΦ (θέση p_{c39}). Η μετάβαση t_{o1} μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο όταν δεν υπάρχουν εναπομένουσες ώρες στο έτος προσομοίωσης (η p_{i2} δεν εμπεριέχει δείγματα). Μετά τον υπολογισμό του ΔΑΦ, η t_{o2} ενεργοποιείται και προσθέτει ένα δείγμα στην p_{i23} , έτσι ώστε να εκκινήσει η διαδικασία προσομοίωσης για τον επόμενο χρόνο.

5.4.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Το βασικό σενάριο που θεωρήθηκε στη μοντελοποίηση μέσω ΔΡ περιλαμβάνει μία ΑΓ με ονομαστική ισχύ 20 kW και μια NTΓ μέγιστης παραγόμενης ισχύος 15 kW, που χρειάζονται να εξυπηρετήσουν ηλεκτρικό φορτίο με ετήσια αιχμή ίση με 20 kW. Αν και ο αριθμός των εναλλακτικών που μπορούν να προκύψουν σε σχέση με το βασικό σενάριο είναι απεριόριστος, έχουν αναπτυχθεί τέσσερα επιπλέον σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, εξετάζεται η επίδραση της προσθήκης περισσοτέρων ΑΓ ίδιου τύπου. Στο δεύτερο σενάριο, αντί της μίας ΑΓ του βασικού σεναρίου, μελετάται η εγκατάσταση δύο μικρότερων ΑΓ που παράγουν την ίδια συνολική ονομαστική ισχύ σε σχέση με την ΑΓ του βασικού σεναρίου. Το τρίτο σενάριο εξετάζει την επίδραση της μείωσης της \overline{V}_{annual} κατά 1 m/s σε σχέση με την τιμή της στο βασικό σενάριο. Το τέταρτο σενάριο εξετάζει τη περίπτωση εγκατάστασης ΝΤΓ με υψηλότερη ονομαστική ισχύ (18 kW). Σε όλα τα παραπάνω σενάρια, οι διάρκειες που σχετίζονται με τη βλάβη ή επισκευή των ΑΓ και της ΝΤΓ έχουν τις τιμές που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 5.1. Για να διασφαλιστεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, ο υπολογισμός των δεικτών αξιοπιστίας και επίδοσης του ΜΑΣΗΕ έγινε εξάγοντας τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων για μια περίοδο προσομοίωσης ίση με 100 έτη [5.33].

A cúrsen a	1 AΓ	2 AΓ	3 AГ
Δεικτης	(Βασικό σενάριο)	(1° σενάριο)	(1° σενάριο)
ПАФ (%)	10.27	8.46	7.50
$AA\Phi$ (h/yr)	899.28	741.03	657.01
AMTE (kWh/yr)	3577.82	3319.69	3059.31
ΔAE (%)	3.32	3.08	2.84
$\Lambda\Sigma$ (min/yr)	10733	9959	9178
$\Sigma\Delta$ (int/yr)	486.65	479.77	449.91
$\Delta\Delta$ (h/int)	1.85	1.54	1.46
$\Delta M\Pi E (kWh/int)$	7.35	6.91	6.79
$\Delta A\Phi$ (kW/int)	3.98	4.47	4.65
ΠΕΑΓ (kWh)	62217	123004	184998
ΠΕΝΤΓ (kWh)	70625	53509	45612
$\Sigma\Phi$ (%)	35.51	35.10	35.20
ΠΗΕ (kWh)	28719	72132	125971

Πίνακας 5.4: Δείκτες του ΜΑΣΗΕ για διαφορετικό αριθμό ΑΓ.

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται οι δείκτες που υπολογίστηκαν από το ΔΡ για την περίπτωση εγκατάστασης μίας, δύο ή τριών ΑΓ του ίδιου τύπου ($P_R = 20$ kW), οι οποίες συνδυάζονται με τη NTΓ. Από τη μελέτη του Πίνακα 5.4 συμπεραίνεται ότι η προσθήκη της δεύτερης ΑΓ βελτιώνει σημαντικά τους δείκτες αξιοπιστίας και επιπλέον ελαττώνει τη χρήση της NTΓ. Από την άλλη πλευρά, η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας (ΠΗΕ) αυξάνεται σημαντικά, και πιθανόν να απαιτείται η διερεύνηση τρόπων αξιοποίησής της. Η προσθήκη της τρίτης ΑΓ βελτιώνει περαιτέρω τους δείκτες αξιοπιστίας και επιπλέον ελαττώνει τη χρήση της NTΓ. Από την άλλη πλευρά, η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας (ΠΗΕ) αυξάνεται σημαντικά, και πιθανόν να απαιτείται η διερεύνηση τρόπων αξιοποίησής της. Η προσθήκη της τρίτης ΑΓ βελτιώνει περαιτέρω τους δείκτες αξιοπιστίας και αυξάνει την ΠΗΕ. Οι δύο περιπτώσεις του πρώτου σεναρίου που θεωρήθηκαν μπορούν να γίνουν πολύ ελκυστικές εάν ληφθούν υπόψη περιβαλλοντικοί και οικονομικοί παράγοντες, οι οποίοι δεν περιλαμβάνονται στην υπάρχουσα μεθοδολογία. Επιπλέον, χρειάζεται να

μελετηθούν και θέματα που σχετίζονται με την ποιότητα ισχύος του συστήματος, καθώς η διείσδυση της αιολικής ενέργειας αυξάνεται. Παρόλα αυτά, μια τόσο λεπτομερής ανάλυση της λειτουργίας του ΜΑΣΗΕ δεν αποτελεί στόχο της παρούσας διατριβής.

Η ετήσια εξέλιξη της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας του συστήματος για τις τρεις περιπτώσεις του Πίνακα 5.4 παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.16. Η τιμή της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας στην ώρα 8760 είναι ίση με την AMTE του έτους αυτού. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.16 αναφέρονται σε ένα τυπικό έτος προσομοίωσης, στο οποίο η προκύπτουσα τιμή της AMTE προσεγγίζει αυτήν που δίνεται στον Πίνακα 5.4 σε κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τη μελέτη του γραφήματος, αν και στο τέλος του έτους η τιμή της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας είναι μεγαλύτερη όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των ΑΓ, υπάρχουν μεγάλες περίοδοι του έτους που η παραπάνω παρατήρηση δεν ισχύει. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι πολλά από τα δεδομένα του συστήματος που επηρεάζουν το αποτέλεσμα εξαρτώνται από τυχαίους αριθμούς: η ταχύτητα του ανέμου (εξίσωση (5.4)), οι χρόνοι βλάβης και επισκευής της ΑΓ (εξισώσεις (5.6) και (5.7)), η διάρκεια συντήρησης της ΝΤΓ και η πιθανότητα βλάβης λόγω επανεκκίνησης της ΝΤΓ.



Σχήμα 5.16: Εξέλιξη της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας για ένα τυπικό έτος προσομοίωσης.

Η σύγκριση των δεικτών του βασικού σεναρίου με τα εναπομείναντα τρία σενάρια δίνεται στον Πίνακα 5.5. Στο δεύτερο σενάριο, οι δύο ΑΓ με $P_R = 10$ kW που θεωρούνται έχουν την ίδια V_{in} και V_{out} με την ΑΓ του βασικού σεναρίου. Η εξίσωση της νέας καμπύλης ισχύος μπορεί να προκύψει αν διαιρεθεί με το δύο η εξίσωση (5.2). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, στο δεύτερο σενάριο παρουσιάζεται ελαφρά βελτίωση στους δείκτες αξιοπιστίας. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η συχνότητα των διακοπών λειτουργίας, αλλά παρόλα αυτά τόσο η διάρκειά τους, όσο και η μη τροφοδοτούμενη ενέργεια σε κάθε διακοπή μειώνονται. Επιπλέον, αν και η παραγόμενη ενέργεια από τις ΑΓ (ΠΕΑΓ) είναι ελαφρώς μειωμένη στο δεύτερο σενάριο, η καλύτερη κατανομή στη διαδικασία συντήρησης των δύο ΑΓ σε σχέση με τη μία ΑΓ (υπάρχει μικρότερη πιθανότητα να είναι και οι δύο ΑΓ ταυτόχρονα εκτός λειτουργίας) μειώνει ελαφρά τόσο την παραγόμενη ενέργεια από τη ΝΤΓ (ΠΕΝΤΓ), όσο και την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας (ΠΗΕ).

Δείκτης	Βασικό σενάριο	2° σενάριο	3° σενάριο	4° σενάριο
ПАФ (%)	10.27	10.06	12.27	3.89
$AA\Phi$ (h/yr)	899.28	880.85	1074.73	340.65
AMTE (kWh/yr)	3577.82	3462.67	3790.18	2814.26
$\Delta AE(\%)$	3.32	3.22	3.52	2.61
$\Lambda\Sigma$ (min/yr)	10733	10388	11371	8443
$\Sigma\Delta$ (int/yr)	486.65	515.05	524.45	152.85
$\Delta\Delta$ (h/int)	1.85	1.71	2.05	2.23
$\Delta M\Pi E (kWh/int)$	7.35	6.72	7.23	18.42
$\Delta A\Phi$ (kW/int)	3.98	3.93	3.53	8.26
$\Pi EA\Gamma (kWh)$	62217	61958	43249	62779
ΠΕΝΤΓ (kWh)	70625	70354	84852	72715
$\Sigma\Phi$ (%)	35.51	35.36	24.68	35.83
ПНЕ (kWh)	28719	28073	24190	30608

Πίνακας 5.5: Σύγκριση δεικτών των σεναρίων 2-4 με το βασικό σενάριο.

Στο τρίτο σενάριο, η μείωση της \overline{V}_{annual} από τα 6 m/s στα 5 m/s έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική επιδείνωση των περισσοτέρων δεικτών του συστήματος, κάτι που αποδεικνύει τη μεγάλη συσχέτιση μεταξύ αιολικού δυναμικού και απόδοσης του συστήματος. Ο δείκτης που επηρεάζεται περισσότερο είναι ο ετήσιος συντελεστής φορτίου (ΣΦ) των ΑΓ που μειώνεται περισσότερο από 30%, ο οποίος σχετίζεται με το βαθμό εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού από την ΑΓ.

Στο τέταρτο σενάριο, η αύξηση της μέγιστης ισχύος της ΝΤΓ κατά 3 kW σε σχέση με το βασικό σενάριο οδηγεί σε σημαντική βελτίωση των περισσότερων δεικτών. Εξαίρεση αποτελούν η διάρκεια των διακοπών λειτουργίας και η ποσότητα της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας σε καθεμιά από αυτές, που συνδυάζονται όμως με μειωμένο αριθμό διακοπών λειτουργίας κατά περίπου 70%, η παραγόμενη ενέργεια από τη ΝΤΓ (ΠΕΝΤΓ) και η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας (ΠΗΕ). Η μικρή επιδείνωση των δύο τελευταίων δεικτών οφείλεται στο ότι η αύξηση της μέγιστης ισχύος της ΝΤΓ αυξάνει επίσης και την ελάχιστη ισχύ την οποία μπορεί να δώσει η ΝΤΓ (30% της μέγιστης ισχύος). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεγαλύτερης περίσσειας ενέργειας όταν η απαιτούμενη ισχύς από τη ΝΤΓ βρίσκεται κάτω από το όριο της ελάχιστης τιμής που μπορεί να λάβει.



Σχήμα 5.17: Ιστόγραμμα της ΑΑΦ για το βασικό σενάριο (100 έτη προσομοίωσης).

Η πληροφορία που αποκτάται μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας μπορεί να δημιουργήσει τα ιστογράμματα όλων των δεικτών, πέραν των μέσων τιμών που παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 5.4 και 5.5. Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα της ΑΑΦ για το βασικό σενάριο.

5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία που βασίζεται σε ΔΡ και αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής αυτής παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα στην προσομοίωση και ανάλυση αξιοπιστίας ενός ΜΑΣΗΕ. Καταρχήν, η προτεινόμενη μεθοδολογία παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα των κλασσικών μεθόδων προσομοίωσης, ενώ επιπλέον συνδυάζει το χαρακτηριστικό της γραφικής αναπαράστασης της διαδικασίας προσομοίωσης, αποτελώντας έτσι ένα ισχυρό μέσο επικοινωνίας ανάμεσα σε επιστήμονες με θεωρητικό και με εφαρμοσμένο προσανατολισμό. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η αναπαράσταση στο ίδιο μοντέλο τόσο της στατικής δομής του συστήματος, όσο και της δυναμικά μεταβαλλόμενης κατάστασής του. Επιπρόσθετα, τα ΔΡ είναι ένα γενικό εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει ένα μεγάλο αριθμό συστημάτων, που μπορεί να είναι τελείως διαφορετικά μεταξύ τους. Μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των ΔΡ είναι ότι έχουν πολύ λίγες, αλλά εξαιρετικά ισχυρές αρχές, οι οποίες τα κάνουν ένα εργαλείο που η εκμάθησή του μπορεί να γίνει εύκολα και γρήγορα.

Στην παρούσα διατριβή προτείνεται ένα νέο είδος τόξου στα ΔP, το τόξο βάσης δεδομένων. Η χρήση των τόξων βάσης δεδομένων επιτρέπει την εύκολη εισαγωγή πραγματικών δεδομένων στη διαδικασία προσομοίωσης, που εγγυώνται την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση των ρευστών στοχαστικών ΔP στο υπό μελέτη σύστημα διαφοροποιείται από τη συνήθη πρακτική, καθώς η προσομοίωση ενός ΜΑΣΗΕ απαιτεί πολλά χρονικά διαστήματα σύντομης διάρκειας και όχι στιγμιαία μεταβαλλόμενους ρυθμούς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] R. Billinton and R.N. Allan, *Reliability evaluation of power systems* -2^{nd} *edition*. Plenum Press: New York, 1996.
- [5.2] R. Billinton and R.N. Allan, *Reliability evaluation of engineering systems* -2^{nd} *edition*. Plenum Press: New York, 1992.
- [5.3] Ε.Ν. Διαλυνάς, Αξιοπιστία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1996.
- [5.4] R. Billinton and R. Karki, "Capacity planning in small isolated power systems using probabilistic methods," *IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*, vol. 146, no. 1, pp. 61-64, Jan. 1999.
- [5.5] R. Allan and R. Billinton, "Probabilistic assessment of power systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 2, pp. 140-162, Feb. 2000.
- [5.6] C.A. Petri, "Kommunikation mit automaten," Ph.D. Dissertation, Institut für Instrumentelle Mathematik, Bonn, 1962. Επίσης, Αγγλική μετάφραση: "Communication with automata," Griffiss Air Force Base, New York, 1966.
- [5.7] J. Peterson, *Petri net theory and the modeling of systems*. Prentice-Hall: New Jersey, 1981.
- [5.8] T. Murata, "Petri nets: properties, analysis and applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 4, pp. 541-580, Apr. 1989.
- [5.9] R. David and H. Alla, "Petri nets for modeling of dynamic systems a survey," *Automatica*, vol. 30, no. 2, pp. 175-202, 1994.
- [5.10] Γ.Ι. Τσιναράκης, "Μοντελοποίηση και μελέτη συστημάτων παραγωγής τυχαίας τοπολογίας με δίκτυα Petri: μια προσέγγιση ιεραρχικού ελέγχου," Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2007.
- [5.11] M.A. Marsan, G. Balbo, G. Conte, S. Donatelli, and G. Franceschinis, *Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets*. John Wiley & Sons: Chichester, 1995.
- [5.12] S. Christensen and N.D. Hansen, "Coloured Petri nets extended with place capacities, test arcs and inhibitor arcs," in *Application and Theory of Petri Nets*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 691, Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- [5.13] K. Jensen, Coloured Petri nets, volume 1, basic concepts. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 1997.
- [5.14] E.L. Melado, "Analysis of discrete event systems by simulation of timed Petri net models," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 61, pp. 53-59, 2002.
- [5.15] R. David and H. Alla, *Discrete, continuous and hybrid Petri nets*. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2005.
- [5.16] R. David and H. Alla, "Continuous Petri nets," 8th European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, Zaragoza, 1987.
- [5.17] R. David and H. Alla, "On hybrid Petri nets," *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, vol. 11, pp. 9-40, 2001.
- [5.18] R. David and H. Alla, "Autonomous and timed continuous Petri nets," in *Proceedings of the* 11th International Conference on Application and Theory of Petri Nets, Paris, 1990, pp. 367-386.

- [5.19] J. Le Bail, H. Alla, and R. David, "Hybrid Petri nets," in *Proceedings of the European Control Conference*, Grenoble, 1991, pp. 1472-1477.
- [5.20] K.S. Trivedi and V.G. Kulkarni, "FSPNs: fluid stochastic Petri nets," in *Proceedings of the* 14th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets, Chicago, 1993, pp. 24-31.
- [5.21] K. Wolter, "Second order fluid stochastic Petri nets: an extension of GSPNs for approximate and continuous modelling," in *Proceedings of the 1st World Congress on Systems Simulation* (WCSS'97), Singapore, 1997, pp. 328-332.
- [5.22] Y.A. Katsigiannis, P.S. Georgilakis, and G.J. Tsinarakis, "Introducing a coloured fluid stochastic Petri net-based methodology for reliability and performance evaluation of small isolated power systems including wind turbines", *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, no. 2, pp. 75-88, 2008.
- [5.23] HOMER, the micropower optimization model. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <u>http://www.nrel.gov/homer</u>
- [5.24] HYBRID2, the hybrid system simulation code. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2/download.html
- [5.25] Visual Object Net ++, Petri net simulation package. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <u>http://www.r-drath.de/VON/von_e.htm</u>
- [5.26] "The IEEE eeliability test system 1996," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1010-1020, Aug. 1999.
- [5.27] J.F. Manwell, J.G. McGowan, and A.L. Rogers, *Wind energy explained*. John Wiley & Sons: Chichester, 2002.
- [5.28] G.M. Masters, *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons: New Jersey, 2004.
- [5.29] R. Billinton and W. Li, Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods. Plenum Press: New York, 1994.
- [5.30] R. Karki and R. Billinton, "Cost effective wind energy utilization for reliable power supply," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 435-440, June 2004.
- [5.31] M. Muselli, G. Notton, and A. Louche, "Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management," *Solar Energy*, vol. 65, no. 3, pp. 143-157, 1999.
- [5.32] Bagen and R. Billinton, "Evaluation of different operating strategies in small stand-alone power systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 3, pp. 654-660, Sept. 2005.
- [5.33] I. Macdonald and P. Strachan, "Practical application of uncertainty analysis", *Energy and Buildings*, vol. 33, pp. 219-227, 2001.
ΣΥΝΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΑΠΟΜΩΝΟΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η συνολική αποτίμηση της λειτουργίας ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται να λαμβάνει υπόψη οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, τα οποία αποτελούν αντικρουόμενους στόχους. Η επίλυση του προβλήματος αυτού ανήκει στον τομέα της πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης, στην οποία στόχος δεν είναι η εύρεση μίας βέλτιστης λύσης, αλλά η εύρεση ενός συνόλου ισοδύναμων λύσεων που ονομάζεται σύνολο των Pareto-βέλτιστων λύσεων. Στην παρούσα διατριβή λαμβάνεται ως οικονομικό κριτήριο η ελαχιστοποίηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας, και ως περιβαλλοντικό κριτήριο η ελαχιστοποίηση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου του συστήματος, όπως αυτά υπολογίζονται από την εφαρμογή της μεθοδολογίας ανάλυσης κύκλου ζωής των συστατικών του προς μελέτη συστήματος. Η ανάλυση κύκλου ζωής ενός οποιουδήποτε προϊόντος λαμβάνει υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής του, από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι την τελική απόθεση/ανακύκλωση. Η επίλυση του παραπάνω προβλήματος της πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης γίνεται με εφαρμογή του ελιτιστικού γενετικού αλγορίθμου NSGA-II.

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης σχετίζεται με την εύρεση εφικτών λύσεων και τη σύγκρισή τους σύμφωνα με μία ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις. Στην περίπτωση που το πρόβλημα βελτιστοποίησης περιλαμβάνει μία αντικειμενική συνάρτηση, όπως αυτό που μελετήθηκε στα Κεφάλαια 2 έως 4, η διαδικασία στοχεύει στην εύρεση της βέλτιστης εφικτής λύσης σύμφωνα με το δεδομένο κριτήριο. Η πλειονότητα όμως των προβλημάτων βελτιστοποίησης που απαντώνται σε πραγματικές συνθήκες περιλαμβάνει την ύπαρξη πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Συνήθως, οι συναρτήσεις αυτές προσπαθούν να ικανοποιήσουν αντικρουόμενους στόχους, οι οποίοι δεν μπορούν να εκφραστούν εύκολα σε ένα ποσοτικό μέγεθος, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απευθείας σύγκρισή τους. Για το λόγο αυτό χρειάζεται να αναζητηθεί μια συμβιβαστική λύση η οποία να βρίσκεται σε συμφωνία με τις προτεραιότητες του αποφασίζοντα. Η διαδικασία εύρεσης μιας τέτοιας λύσης καλείται πολυαντικειμενική βελτιστοποίηση.

Κατά τη μελέτη των ΣΗΕ, δύο αντικρουόμενοι στόχοι λαμβάνονται συνήθως υπόψη: η ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος και η ελαχιστοποίηση των αερίων εκπομπών του συστήματος. Στην ειδικότερη περίπτωση της μελέτης των ΜΑΣΗΕ το συγκεκριμένο πρόβλημα

αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς εκτός από τις συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες που είναι παρούσες στην πλειονότητα των ΣΗΕ, τα ΜΑΣΗΕ περιλαμβάνουν συνήθως υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων ενεργειακών τεχνολογιών, καθώς και συστήματα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συμβατικές τεχνολογίες παρέχουν ενέργεια με αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο, αλλά ταυτόχρονα εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες αερίων όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), λαμβάνοντας υπόψη είτε τις απευθείας εκπομπές κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους, είτε τις εκπομπές σε όλη τη διάρκεια ζωής τους όπως αυτές αποτιμούνται από τη μεθοδολογία της **ανάλυσης** κύκλου ζωής (AKZ). Από την άλλη πλευρά, οι τεχνολογίες ΑΠΕ συνήθως παρουσιάζουν μεγαλύτερα κόστη αρχικής επένδυσης και μη ελεγχόμενο ρυθμό παραγωγής, δεν εκπέμπουν υπολογίσιμες ποσότητες αερίων κατά τη λειτουργία τους, αλλά κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής τους είναι δυνατό να παραχθούν σημαντικές ποσότητες αερίων εκπομπών.

6.2 ΠΟΛΥΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Σε ένα πρόβλημα πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης, η σύγκριση δύο εφικτών λύσεων $x_{(i)}$ και $x_{(i)}$ μπορεί να οδηγήσει σε ένα από τα παρακάτω ενδεχόμενα:

- 1. Η λύση $x_{(i)}$ κυριαρχεί της λύσης $x_{(i)}$, εάν ισχύουν ταυτόχρονα οι ακόλουθες συνθήκες:
 - a. Η λύση $x_{(i)}$ δεν είναι χειρότερη της $x_{(j)}$ για καμία αντικειμενική συνάρτηση.
 - b. Η λύση $x_{(i)}$ είναι καλύτερη της $x_{(i)}$ σε τουλάχιστον μία αντικειμενική συνάρτηση.
- 2. Η λύση $x_{(j)}$ κυριαρχεί της λύσης $x_{(i)}$.
- Καμία από τις δύο λύσεις δεν κυριαρχεί της άλλης, οπότε και χαρακτηρίζονται ως μη κυριαρχούσες λύσεις.

Οι λύσεις οι οποίες είναι μη κυριαρχούσες μέσα σε ολόκληρο το χώρο αναζήτησης του προβλήματος χαρακτηρίζονται ως **Pareto-βέλτιστες** και συγκροτούν το σύνολο των **Pareto-βέλτιστων λύσεων**. Χωρίς ύπαρξη επιπρόσθετης πληροφορίας, καμιά από τις λύσεις που ανήκουν στο σύνολο Pareto δεν μπορεί να θεωρηθεί καλύτερη μιας άλλης. Στα προβλήματα πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης με συγκρουόμενους αντικειμενικούς στόχους είναι σημαντική η ύπαρξη πολλών λύσεων αυτού του τύπου. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί και τη σημαντικότερη διαφορά ανάμεσα στη βελτιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης και την πολυαντικειμενική βελτιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης και την πολυαντικειμενική βελτιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης και την πολυαντικειμενική συνάρτησης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση σημαντική είναι η ύπαρξη ενός ικανού αριθμού μη κυριαρχουσών λύσεων που προκύπτουν εξαιτίας των συγκρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων. Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορεί να συναχθεί ότι υπάρχουν δύο αντίστοιχης βαρύτητας στόχοι στην πολυαντικειμενική βελτιστοποίηση [6.1]:

- Η εύρεση ενός συνόλου λύσεων όσο το δυνατόν εγγύτερου στο σύνολο των Paretoβέλτιστων λύσεων.
- 2. Η εύρεση ενός συνόλου λύσεων όσο το δυνατόν πιο διακριτού.

Η πραγματοποίηση του ενός από τους παραπάνω στόχους δεν συνεπάγεται και την πραγματοποίηση του άλλου στόχου. Η επίτευξη και των δύο στόχων καθιστά αναγκαία την εισαγωγή μηχανισμών εντός του αλγόριθμου επίλυσης, οι οποίοι δίνουν έμφαση τόσο στη σύγκλιση πλησίον του συνόλου των Pareto-βέλτιστων λύσεων, όσο και στη διατήρηση ενός διακριτού συνόλου λύσεων. Για το λόγο αυτό η πολυαντικειμενική βελτιστοποίηση θεωρείται δυσκολότερη στην επιτυχή της υλοποίηση σε σχέση με τη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης.

Για την επίλυση προβλημάτων πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός κλασσικών μεθόδων, όπως ο πολυκριτήριος παραμετρικός προγραμματισμός και ο προγραμματισμός στόχων. Οι μέθοδοι αυτές μετατρέπουν το πρόβλημα πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης σε πρόβλημα βελτιστοποίησης μίας αντικειμενικής συνάρτησης, χρησιμοποιώντας ορισμένους κανόνες που έχουν εισαχθεί από το χρήστη. Τα βασικότερα μειονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι:

- Έχουν τη δυνατότητα να υπολογίσουν μόνο μια λύση που ανήκει στο σύνολο Pareto σε κάθε προσομοίωση του αλγορίθμου. Εάν ο χρήστης ενδιαφέρεται να υπολογίσει πολλές λύσεις που να ανήκουν στο σύνολο Pareto, χρειάζεται να χρησιμοποιήσει τον αλγόριθμο πολλές φορές με διαφορετικά δεδομένα εισόδου, κάτι που όμως δεν εγγυάται την εύρεση διαφορετικής λύσης σε σχέση με αυτές που έχουν ήδη υπολογιστεί.
- Απαιτούν την ύπαρξη πρότερης γνώσης του προβλήματος, όπως τον καθορισμό κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας ή κατάλληλων τιμών στόχων.
- Οι περισσότερες από αυτές τις μεθόδους παρουσιάζουν πρόβλημα στην εύρεση Paretoβέλτιστων λύσεων σε μη κυρτά προβλήματα.
- 4. Παρουσιάζουν δυσκολία επίλυσης σε προβλήματα βελτιστοποίησης που απαντώνται σε πραγματικές συνθήκες, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν περίπλοκους παράγοντες όπως μεγάλο αριθμό ακέραιων μεταβλητών, μη γραμμικότητα, τυχαιότητα, ύπαρξη μη τυποποιημένων περιορισμών (π.χ., λογικοί περιορισμοί).

Για την επίλυση προβλημάτων πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων, κυρίως από την περιοχή των μεθευρετικών μεθόδων, που υπερβαίνουν τις παραπάνω δυσκολίες των κλασσικών μεθόδων. Από τις μεθευρετικές αυτές μεθόδους, η μεγάλη πλειονότητα ανήκει στην κατηγορία των γενετικών αλγορίθμων (ΓΑ) [6.2] επειδή οι ΓΑ διαχειρίζονται εγγενώς ένα πληθυσμό από πιθανές λύσεις, αντί για μία μόνο λύση, και επομένως προτείνουν απευθείας ένα σύνολο από μη κυριαρχούσες λύσεις σε κάθε προσομοίωσή τους.

Οι πρώτοι ΓΑ που παρουσιάστηκαν για την επίλυση προβλημάτων πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης (VEGA [6.3], NSGA [6.4], NPGA [6.5]) δεν περιλάμβαναν ελιτισμό λόγω της δυσκολίας εφαρμογής του σε ένα πρόβλημα πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, όλες οι μη κυριαρχούσες λύσεις σε ένα πληθυσμό μπορούν να θεωρηθούν ως ισοδύναμα υποψήφιες για διατήρησή τους στην επόμενη γενιά του ΓΑ. Παρόλα αυτά, ο πληθυσμός των μη κυριαρχουσών λύσεων δεν είναι ελέγξιμος, και επομένως είναι δύσκολο να οριστεί ελιτισμός με έναν ελέγξιμο τρόπο. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε και επιλύθηκε χρησιμοποιώντας ποικίλες προσεγγίσεις σε επόμενες γενιές ΓΑ (DPGA [6.6], SPEA [6.7], NSGA-II [6.8]), έχοντας ως αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση των αποτελεσμάτων.

6.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΑΣΗΕ

6.3.1 Εισαγωγή

Η οικονομική αποτίμηση της εγκατάστασης και λειτουργίας ενός ΜΑΣΗΕ βασίζεται στον υπολογισμό του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας (KHE), η διαδικασία υπολογισμού του οποίου περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Για την περιβαλλοντική αποτίμηση, η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου του συστήματος, όπως αυτές υπολογίζονται από την AKZ. Η AKZ είναι μια διαδικασία που αποτιμά τις

επιπτώσεις ενός προϊόντος λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής του, από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι την τελική απόθεση/ανακύκλωση του προϊόντος. Συνήθως η ΑΚΖ περιορίζεται στην περιβαλλοντική αποτίμηση, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί επιπλέον να περιλαμβάνει την αποτίμηση οικονομικών και κοινωνικών ζητημάτων [6.9].

Κατά τη μελέτη των ΣΗΕ, η διαδικασία της ΑΚΖ περιλαμβάνει τον υπολογισμό αερίων εκπομπών όπως τα αέρια του θερμοκηπίου, το διοξείδιο του θείου (SO₂) και τα αιωρούμενα σωματίδια. Ο λόγος για τον οποίο στην παρούσα διατριβή λαμβάνονται υπόψη μόνο οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι γιατί τα συγκεκριμένα αέρια παρουσιάζουν την ιδιαιτερότητα ότι οι περιβαλλοντικές τους επιδράσεις δεν εξαρτώνται από την τοποθεσία στην οποία εκπέμπονται [6.10]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή έγκυρων αποτελεσμάτων σε κάθε περίπτωση, δεδομένου ότι ο συνολικός κύκλος ζωής ενός προϊόντος περιλαμβάνει συνήθως στάδια που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές τοποθεσίες.

6.3.2 Ανάλυση κύκλου ζωής συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Η ΑΚΖ ενός προϊόντος αποτελείται συνήθως από τέσσερα βήματα:

- Τον καθορισμό στόχου, στον οποίο γίνεται περιγραφή της εφαρμογής που θα αναλυθεί και καθορίζονται τα όρια των διεργασιών που λαμβάνονται για τα διάφορα στάδια ζωής του προϊόντος (εξόρυξη υλικών, κατανάλωση ενέργειας, χρήση, ανακύκλωση, τελική απόθεση).
- Την ανάλυση απογραφής, κατά την οποία γίνεται συλλογή των δεδομένων που σχετίζονται με τις ενεργειακές απαιτήσεις του προϊόντος, τα υλικά που το αποτελούν, τα απόβλητα που παράγονται και τα αέρια που εκπέμπονται.
- Την αποτίμηση επιπτώσεων, η οποία εξετάζει τις επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον που προκύπτουν από τη χρήση των πόρων (ενέργειας και υλικών) που συλλέχτηκαν στο στάδιο της ανάλυσης απογραφής.
- 4. Την ανάλυση βελτίωσης, στην οποία συνδυάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης απογραφής και της αποτίμησης επιπτώσεων για την αξιολόγηση του προϊόντος. Επιπλέον, στο βήμα αυτό καθορίζονται οι τομείς στους οποίους μπορεί να υπάρξει ελάττωση των επιπτώσεων.

Στον τομέα των ΣΗΕ, η AKZ λαμβάνει υπόψη τις αέριες εκπομπές κατά την κατασκευή και λειτουργία τους, καθώς και τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που συνδέονται με όλες τις σχετιζόμενες διαδικασίες, όπως η εξόρυξη, η μεταποίηση, η μεταφορά και η τελική απόθεση του προϊόντος. Τα αποτελέσματα της AKZ για τις μονάδες παραγωγής ενός ΣΗΕ εκφράζονται ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) και όχι ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος (kW). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ορισμένες μονάδες παραγωγής λειτουργούν στην ονομαστική τους ισχύ για τα μεγαλύτερο μέρος του έτους, ενώ άλλες μονάδες λειτουργούν σε ποσοστό της ονομαστικής τους ισχύος και για μικρότερα χρονικά διαστήματα. Εάν λοιπόν η σύγκριση των συστημάτων αυτών γινόταν ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος, τα αποτελέσματα θα ήταν σε πολλές περιπτώσεις μη αντιπροσωπευτικά [6.11]. Επιπλέον, σε ΣΗΕ που περιλαμβάνουν τεχνολογίες με μη ελεγχόμενο ρυθμό παραγωγής (ΑΓ, ΦΒ) απαιτείται συχνά η εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία πρέπει να συμπεριληφθούν και αυτά στην AKZ του συστήματος [6.9].

Η αποτίμηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην AKZ των ΣΗΕ δίνεται συνήθως σε ποσότητα ισοδύναμου CO₂ (CO₂-eq.). Ο όρος αυτός υποδηλώνει ότι στην AKZ έχουν ληφθεί υπόψη όχι μόνο οι εκπομπές CO₂, αλλά και οι εκπομπές άλλων αερίων του θερμοκηπίου, όπως το μεθάνιο (CH₄) και το υποξείδιο του αζώτου (N₂O). Διαφορετικά όμως αέρια του θερμοκηπίου έχουν διαφορετική επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς και διαφορετική διάρκεια ζωής. Για να ληφθούν υπόψη αυτές οι διαφορές, έχει δημιουργηθεί ένα σύνολο από δείκτες που μετατρέπουν τις εκπομπές των αερίων αυτών σε ισοδύναμες εκπομπές CO₂ για μια περίοδο 100 ετών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η άθροισή τους [6.11]. Στον Πίνακα 6.1 περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των σημαντικότερων αέριων του θερμοκηπίου.

Αέριο του θερμοκηπίου	Διάρκεια ζωής (έτη)	Δείκτης ισοδύναμου CO2 [6.12]
CO ₂	100 έως 200	1
CH ₄	8.4 έως 12	21
N ₂ O	120	310

Πίνακας 6.1: Βασικές ιδιότητες αερίων του θερμοκηπίου.

6.3.3 Εκπομπές ισοδύναμου CO2 των συστατικών ενός ΜΑΣΗΕ

Οι τεχνολογίες ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής (ΑΓ, ΦΒ και μικρά ΥΗΕ) έχουν χαμηλές εκπομές αερίων του θερμοκηπίου. Όσον αφορά τις ΑΓ, υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των εκπομπών ισοδύναμου CO₂ και των ανεμολογικών δεδομένων της περιοχής εγκατάστασης, καθώς η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου μειώνει τις εκπομπές για ένα δεδομένο τύπο ΑΓ. Η τιμή που επιλέχτηκε είναι τα 0.011 kg CO₂-eq./kWh, η οποία αναφέρεται σε ταχύτητα ανέμου 6.5 m/s [6.13]. Τα ΦΒ συστήματα παρουσιάζουν τα τελευταία χρόνια τη μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση εκπομπών ισοδύναμου CO₂ σε σχέση με παλαιότερες μελέτες, τα δεδομένα των οποίων βασίζονταν σε λιγότερο σύγχρονες διαδικασίες παραγωγής του ΦΒ πλαισίου. Επιπλέον, σημαντικό παράγοντα αποτελεί και η τοποθεσία εγκατάστασης, καθώς σε θερμότερα κλίματα διαπιστώνεται μείωση των εκπομπών για δεδομένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόσφατες μελέτες οι οποίες αναφέρονται σε χώρες της νότιας Ευρώπης προσδιορίζουν στις εκπομπές ισοδύναμου CO₂ τιμές ίσες με 0.045 kg CO₂-eq./kWh για ΦΒ μονοκρυσταλλικού πυριτίου, 0.037 kg CO₂-eq./kWh για ΦΒ πολυκρυσταλλικού πυριτίου, και 0.030 kg CO₂-eq./kWh [6.15], ανεξάρτητα από το εάν το ΥΗΕ είναι φυσικής ή ρυθμιζόμενης παροχής.

Στην περίπτωση των γεννητριών, οι εκπομπές ισοδύναμου CO₂ σχετίζονται άμεσα με το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Οι ντηζελογεννήτριες που χρησιμοποιούν καύσιμο ντήζελ εκπέμπουν κατά μέσο όρο 0.880 kg CO₂-eq./kWh, εκ των οποίων τα 0.775 kg CO₂-eq./kWh είναι οι απευθείας εκπομπές κατά τη λειτουργία του κινητήρα [6.16]. Εάν χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο το βιοντήζελ οι εκπομπές μειώνονται κατά 78.3% [6.17], κάτι που συνεπάγεται τιμή ίση με 0.191 kg CO₂-eq./kWh. Για τις κυψέλες καυσίμου εξετάζονται ξεχωριστά οι δύο διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής H₂: η αναμόρφωση υδρογονανθράκων (στα ΜΑΣΗΕ χρησιμοποιείται συνήθως μεθανόλη) και η ηλεκτρόλυση νερού. Η αναμόρφωση μεθανόλης είναι μια τεχνολογία που δεν έχει εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα στα ΣΗΕ, και επομένως δεν έγινε δυνατή η εύρεση τιμών εκπομπών ισοδύναμου CO₂. Δεδομένου όμως του γεγονότος ότι η μεθανόλη παρασκευάζεται βιομηχανικά από φυσικό αέριο, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα εκπομπών ισοδύναμου CO₂ για κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν με αναμόρφωση φυσικού αερίου και παρουσιάζουν τιμές 0.664 kg CO₂-eq./kWh [6.11]. Στην περίπτωση παροχής H₂ που προέρχεται από ηλεκτρόλυση νερού, οι εκπομπές για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου είναι ίσες με 0.020 kg CO₂-eq./kWh [6.18].

Στα συστήματα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας οι εκπομπές ισοδύναμου CO₂ εκφράζονται ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) που αποθηκεύεται. Η προκύπτουσα τιμή

εκπομπών για τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος είναι 0.028 kg CO₂-eq./kWh [6.19]. Εάν η τεχνολογία αποθήκευσης περιλαμβάνει μονάδα ηλεκτρόλυσης και δεξαμενή υδρογόνου, οι οποίες μπορούν στη συνέχεια να τροφοδοτήσουν μια κυψέλη καυσίμου, οι εκπομπές είναι ίσες με 0.011 kg CO₂-eq./kWh [6.18]. Όσον αφορά τα περιφερειακά εξαρτήματα, οι μετατροπείς δεν εξετάζονται μεμονωμένα στην AKZ των ΣΗΕ. Τα μοναδικά στοιχεία που σχετίζονται με αυτούς συμπεριλαμβάνουν αντιστροφείς αναλύσεις ΦΒ συστημάτων που περιλαμβάνουν αντιστροφείς (τμήμα των μετατροπέων), από όπου προκύπτει ότι η συνεισφορά τους σε σχέση με το συνολικό ΦΒ σύστημα είναι σημαντικά μικρότερη του 1% [6.20]. Για το λόγο αυτό, οι εκπομπές των μετατροπέων θεωρούνται αμελητέες στην παρούσα διατριβή.

Η σύνοψη των παραπάνω αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2. Οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου GHG_{tot} (σε th CO_2 -eq.) σε όλη τη διάρκεια ζωής του MAΣHE R_{SIPS} (σε y) υπολογίζονται αθροίζοντας τις ετήσιες εκπομπές GHG_{ancomp} (σε kg CO_2 -eq.) για κάθε συστατικό *comp* του συστήματος.

$$GHG_{tot} = R_{SIPS} \cdot \sum_{comp} \frac{GHG_{ancomp}}{1000} \,. \tag{6.1}$$

Συστατικό ΜΑΣΗΕ	Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου			
200tutiko MAZHE	(kg CO ₂ -eq./kWh)			
ΑΓ σε περιοχή με μέση ταχύτητα ανέμου 6.5 m/s	0.011			
ΦΒ μονοκρυσταλλικού πυριτίου	0.045			
ΦΒ πολυκρυσταλλικού πυριτίου	0.037			
ΦΒ άμορφου πυριτίου	0.030			
Μικρό ΥΗΕ φυσικής παροχής	0.025			
Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ	0.880			
Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ	0.191			
Κυψέλη καυσίμου με αναμόρφωση μεθανόλης	0.664			
Κυψέλη καυσίμου με ηλεκτρόλυση νερού	0.020			
Μονάδα ηλεκτρόλυσης και δεξαμενή υδρογόνου	0.011			
Συσσωρευτής μολύβδου-οξέος	0.028			
Μετατροπέας	0			

Πίνακας 6.2: Εκπομπές ισοδύναμου CO₂ για τα συστατικά ενός ΜΑΣΗΕ.

6.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ NSGA-II

Στην παρούσα διατριβή, η οικονομική και περιβαλλοντική αποτίμηση ενός ΜΑΣΗΕ υλοποιείται με τη βοήθεια του ελιτιστικού ΓΑ NSGA-II [6.8]. Τα βασικά χαρακτηριστικά του NSGA-II είναι η απλότητά του και η εξαιρετική επίδοσή του σε σχέση με αντίστοιχους αλγορίθμους στην επίλυση δύσκολων προβλημάτων πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης [6.21]. Ο αλγόριθμος αυτός είναι εξέλιξη του πολυαντικειμενικού μη ελιτιστικού ΓΑ NSGA [6.4] και αποτελείται από τρία βασικά τμήματα: την ταξινόμηση των μη κυριαρχουσών λύσεων, τη διατήρηση της διακριτότητας των λύσεων, και τον κύριο αλγόριθμο.



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας ταξινόμησης των μη κυριαρχουσών λύσεων.

6.4.1 Ταξινόμηση των μη κυριαρχουσών λύσεων

Κατά τον αλγόριθμο ταξινόμησης των μη κυριαρχουσών λύσεων, ολόκληρος ο πληθυσμός N_{pop} μιας γενιάς του ΓΑ ταξινομείται σε αύξουσα σειρά επιπέδων μη κυριαρχίας. Για προβλήματα που εμπεριέχουν περιορισμούς, χρειάζεται να γίνει διεύρυνση της έννοιας της κυριαρχίας σε σχέση με αυτή που περιγράφηκε στην ενότητα 6.2, καθώς ο πληθυσμός μπορεί να περιέχει λύσεις που παραβιάζουν τους περιορισμούς. Κατά τη σύγκριση δύο λύσεων $x_{(i)}$ και $x_{(j)}$ μπορεί λάβει χώρα ένα από τα ακόλουθα ενδεχόμενα:

- 1. Η λύση $x_{(i)}$ ικανοποιεί τους περιορισμούς ενώ η λύση $x_{(j)}$ δεν τους ικανοποιεί, οπότε η $x_{(i)}$ κυριαρχεί της $x_{(j)}$.
- 2. Η λύση $x_{(i)}$ ικανοποιεί τους περιορισμούς ενώ η λύση $x_{(i)}$ δεν τους ικανοποιεί, οπότε η $x_{(j)}$ κυριαρχεί της $x_{(i)}$.
- Και οι δύο λύσεις παραβιάζουν τους περιορισμούς, οπότε επικρατεί η λύση με τη μικρότερη παραβίαση των περιορισμών.
- Και οι δύο λύσεις ικανοποιούν τους περιορισμούς, οπότε η σύγκριση γίνεται με τους κανόνες που περιγράφονται στην ενότητα 6.2.

Με βάση τους παραπάνω κανόνες, για κάθε λύση $x_{(i)}$ του πληθυσμού N_{pop} υπολογίζονται δύο ποσότητες: ο αριθμός των λύσεων $n_{x(i)}$ οι οποίες υπερέχουν της $x_{(i)}$, και το σύνολο $S_{x(i)}$ που περιλαμβάνει τις λύσεις στις οποίες η $x_{(i)}$ υπερέχει. Όλες οι λύσεις για τις οποίες ισχύει $n_{x(i)} = 0$ ανήκουν στο σύνολο των μη κυριαρχουσών λύσεων του πρώτου επιπέδου. Επιπλέον, για όλα τα μέλη των συνόλων $S_{x(i)}$ που ανήκουν στις μη κυριαρχούσες λύσεις γίνεται μείωση της ποσότητας $n_{x(i)}$ κατά ένα. Αποτέλεσμα αυτού είναι ο καθορισμός του συνόλου των μη κυριαρχουσών λύσεων του δευτέρου επιπέδου, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις λύσεις στις οποίες η αναπροσαρμοσμένη ποσότητα $n_{x(i)}$ είναι ίση με το μηδέν. Ακολουθώντας αντίστοιχη διαδικασία, γίνεται η ταξινόμηση όλων των λύσεων του πληθυσμού σε διαφορετικά επίπεδα μη κυριαρχουσών λύσεων.

6.4.2 Διατήρηση της διακριτότητας των λύσεων

Ο μηχανισμός της διατήρησης της διακριτότητας των λύσεων στον NSGA-II χρησιμοποιείται για να ικανοποιηθεί ο δεύτερος βασικός στόχος ενός προβλήματος πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης, η εύρεση δηλαδή ενός συνόλου λύσεων όσο το δυνατό πιο διακριτού. Για το λόγο αυτό απαιτείται ο υπολογισμός μιας ποσότητας που καλείται πληθυσμιακή απόσταση, η οποία δίνει το μέτρο της εγγύτητας μεταξύ δύο μελών του πληθυσμού του ΓΑ. Ο υπολογισμός της πληθυσμιακής απόστασης απαιτεί αρχικά την ταξινόμηση κατά αύξουσα σειρά του πληθυσμού των λύσεων σύμφωνα με κάθε αντικειμενική συνάρτηση f_k του προβλήματος. Στη συνέχεια, στις λύσεις $x_{(i)}$ που παρουσιάζεται η ελάχιστη και μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f_k αντιστοιχείται άπειρη τιμή απόστασης $d_{kx(i)}$. Σε όλες τις υπόλοιπες ενδιάμεσες λύσεις $x_{(j)}$ της ταξινόμησης, ορίζεται τιμή απόστασης $d_{kx(j)}$ ίση με την κανονικοποιημένη διαφορά στις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων των άμεσα γειτνιαζουσών τους λύσεων $x_{(j-1)}$ και $x_{(j+1)}$ ($f_k(x_{(j-1)}) \leq f_k(x_{(j+1)})$):

$$d_{kx(j)} = \frac{f_k(x_{(j+1)}) - f_k(x_{(j-1)})}{f_{kmax} - f_{kmin}}$$
(6.2)

όπου f_{kmax} και f_{kmin} η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f_k στον πληθυσμό των λύσεων. Η συνολική πληθυσμιακή απόσταση $d_{x(i)}$ κάθε λύσης $x_{(i)}$ του πληθυσμού είναι ίση με το

άθροισμά των αποστάσεων $d_{kx(i)}$ της συγκεκριμένης λύσης σε όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις f_k του προβλήματος:

$$d_{x(i)} = \sum_{k} d_{kx(i)} .$$
 (6.3)

Η γραφική επεξήγηση του τρόπου υπολογισμού της πληθυσμιακής απόστασης $d_{x(j)}$ μιας λύσης $x_{(j)}$ σε ένα πρόβλημα με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις f_1 και f_2 φαίνεται στο Σχήμα 6.2, από όπου μπορεί να συναχθεί ότι η $d_{x(j)}$ είναι ανάλογη με το ήμισυ της περιμέτρου του κυβοειδούς σχήματος (ορθογώνιο παραλληλόγραμμο στην περίπτωση των δύο διαστάσεων) που συνδέει τις δύο άμεσα γειτονικές της λύσεις. Στα πλεονεκτήματα του μηχανισμού της πληθυσμιακής απόστασης απόστασης απόστασης απόστασης περιλαμβάνεται η μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα, καθώς και το γεγονός ότι το τελικό αποτέλεσμα δεν εξαρτάται από εξωτερικές παραμέτρους που πρέπει να εισαχθούν από το χρήστη.



Σχήμα 6.2: Υπολογισμός της πληθυσμιακής απόστασης $d_{x(j)}$ μιας λύσης $x_{(j)}$.

6.4.3 Κύριος αλγόριθμος

Στην περιγραφή του κυρίως τμήματος του NSGA-II γίνεται η θεώρηση ότι ο ΓΑ είναι δυαδικής κωδικοποίησης. Το πρώτο στάδιο εκτέλεσης του αλγορίθμου περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός τυχαίου πληθυσμού γονέων N_{par} , ο οποίος ταξινομείται ως προς τις μη κυριαρχούσες λύσεις του. Για τη διαδικασία επιλογής του πληθυσμού χρησιμοποιείται η μέθοδος της επιλογής τουρνουά [6.8], η οποία επιπλέον εξασφαλίζει και τον ελιτισμό του ΓΑ, ενώ ακολουθούν οι μηχανισμοί διασταύρωσης και μετάλλαξης, ώστε να δημιουργηθεί ένας πληθυσμός απογόνων N_{off} ίσου πλήθους με τον πληθυσμό γονέων N_{par} . Η περιγραφή που ακολουθεί περιλαμβάνει τη διαδικασία που ακολουθείται σε οποιαδήποτε επόμενη γενιά του ΓΑ.

Αρχικά, οι πληθυσμοί γονέων και απογόνων συνδυάζονται μεταξύ τους και δημιουργούν ένα συνολικό πληθυσμό $N_{pop} = N_{off} + N_{par}$, ο οποίος ταξινομείται ως προς τις μη κυριαρχούσες λύσεις του. Οι λύσεις που ανήκουν στο πρώτο σύνολο των μη κυριαρχουσών λύσεων είναι οι καλύτερες σε ολόκληρο τον πληθυσμό, και είναι επιθυμητό να διατηρηθούν και στην επόμενη γενιά του ΓΑ. Εάν το μέγεθος Level₁ του συνόλου αυτού είναι μικρότερο από τον απαιτούμενο πληθυσμό των γονέων, όλα τα μέλη του Level₁ εισάγονται στον N_{par} . Τα υπόλοιπα μέλη του N_{par} επιλέγονται από τα επόμενα

σύνολα των μη κυριαρχουσών λύσεων σύμφωνα με την κατάταξή τους. Κατά συνέπεια, οι λύσεις του συνόλου Level₂ εισάγονται αμέσως μετά, ακολουθούμενες από τις λύσεις του συνόλου Level₃, κοκ. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να συμπληρωθεί ο πληθυσμός N_{par} . Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ο αριθμός των μελών του τελευταίου συνόλου μη κυριαρχουσών λύσεων Level_i που μπορεί να εισαχθεί στον πληθυσμό N_{par} είναι μεγαλύτερος από τον υπολειπόμενο αριθμό λύσεων που απαιτείται για να συμπληρωθεί ο πληθυσμός, οπότε για την πλήρωση των κενών θέσεων χρειάζεται να ακολουθηθεί μια διαδικασία ταξινόμησης. Για το λόγο αυτό, τα μέλη του Level_i ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά των τιμών της συνολικής πληθυσμιακής απόστασής τους, και επιλέγονται όσες λύσεις χρειάζονται για να συμπληρώσουν τις υπόλοιπες θέσεις του N_{par} . Στη συνέχεια ακολουθούν οι μηχανισμοί επιλογής (με τη μέθοδο επιλογής τουρνουά), διασταύρωσης και μετάλλαξης του πληθυσμού N_{par} , έτσι ώστε να δημιουργηθεί ο νέος πληθυσμός απογόνων N_{off} . Το συνολικό διάγραμμα ροής του αλγορίθμου NSGA-II φαίνεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου NSGA-II.

6.5 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια αποτελεί εξέλιξη του προβλήματος συνδυαστικής βελτιστοποίησης που εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 2, με την επιπλέον προσθήκη της αντικειμενικής συνάρτησης που περιγράφει το περιβαλλοντικό κόστος του συστήματος. Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη τη διάρκεια ζωής του ΜΑΣΗΕ:

$$\min(KHE)$$
 (6.4)

ενώ η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου GHG_{tot} σε όλη τη διάρκεια ζωής του ΜΑΣΗΕ:

$$\min(\text{GHG}_{tot})$$
 (6.5)

υπό τους ακόλουθους περιορισμούς:

1. Περιορισμός αρχικού κόστους του συστήματος IC:

$$IC \le IC_{max} \,. \tag{6.6}$$

2. Περιορισμός μέγιστης ετήσιας απώλειας φορτίου:

$$f_{A\Phi} = \frac{\sum_{\Delta t}^{\text{year}} (A\Phi_{\Delta t} \cdot \Delta t)}{E_{anload}} \le f_{A\Phi max} \,.$$
(6.7)

3. Περιορισμός της μέγιστης ετήσιας απώλειας ισχύος:

$$f_{\rm AI} = \frac{\sum_{\Delta t}^{\rm year} (AI_{\Delta t} \cdot \Delta t)}{E_{anload}} \le f_{\rm AImax} \,.$$
(6.8)

4. Περιορισμός μέγιστης ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου από τις γεννήτριες του ΜΑΣΗΕ:

$$\sum_{\Delta t}^{\text{year}} FC_{gen\Delta t} \le FC_{angenmax} \quad \forall \quad gen.$$
(6.9)

5. Περιορισμός ελάχιστης ετήσιας ενέργειας που παράγεται από τεχνολογίες ΑΠΕ, ως συνάρτηση της συνολικής ετήσιας ενέργειας που παράγει το σύστημα:

$$f_{RES} = \frac{E_{anRES}}{E_{antot}} \ge f_{RESmin} \qquad \text{órov} \qquad 0 \le f_{RESmin} \le 1.$$
(6.10)

6. Περιορισμοί μεγέθους των συστατικών του ΜΑΣΗΕ:

$$size_{comp} \ge 0 \quad \forall \quad comp$$
 (6.11)

$$size_{comp} \leq size_{compmax} \quad \forall \quad comp.$$
 (6.12)

6.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου θα χρησιμοποιηθεί για την οικονομική και περιβαλλοντική αποτίμηση δύο υβριδικών ΜΑΣΗΕ που εμπεριέχουν διαφορετικές τεχνολογίες αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρώτο σύστημα εμπεριέχει συσσωρευτές και είναι ταυτόσημο με αυτό που εξετάζεται στο κεφάλαιο 3, ενώ το δεύτερο σύστημα εμπεριέχει δεξαμενή υδρογόνου και είναι ταυτόσημο με αυτό που εξετάζεται στο ενότητα 4.8. Ο ΓΑ που χρησιμοποιείται είναι δυαδικής κωδικοποίησης και είναι αντίστοιχος με αυτόν που περιγράφεται στην ενότητα 3.4, τόσο στον τρόπο αναπαράστασης του χρωμοσώματος, όσο και στη μεθοδολογία υπολογισμού της συνάρτησης ποινής των περιορισμών. Ο αριθμός των προσομοιώσεων λειτουργίας του ΜΑΣΗΕ, N_{sims}, που εκτελούνται σε κάθε περίπτωση είναι ίσος με:

$$N_{sims} = N_{pop} + gn \cdot N_{off} \tag{6.13}$$

όπου gn ο αριθμός των γενεών, N_{pop} ο συνολικός πληθυσμός του ΓΑ και N_{off} ο πληθυσμός των απογόνων.

6.6.1 Μελέτη υβριδικού συστήματος που εμπεριέχει συσσωρευτές

Κατά τη διάρκεια εύρεσης των παραμέτρων που εξασφαλίζουν τη βέλτιστη επίδοση του αλγορίθμου NSGA-II, ο πληθυσμός N_{pop} διατηρήθηκε ίσος με 100, καθώς η μείωση του πληθυσμού έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του πλήθους και της διακριτότητας του βέλτιστου συνόλου των μη κυριαρχουσών λύσεων. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση του πληθυσμού του ΓΑ είναι δυνατό να βελτιώσει ελαφρά την επίδοσή του μετά από μεγάλο αριθμό γενεών, έχοντας όμως ως παράλληλο αποτέλεσμα και τη σημαντική αύξηση του αριθμού των προσομοιώσεων που εκτελούνται. Για το λόγο αυτό, στο τέλος της ενότητας αυτής συγκρίνεται η επίδοση ενός ΓΑ με πληθυσμό $N_{pop} = 100$ ο οποίος συνδυάζεται με μια διαδικασία τοπικής αναζήτησης, και ενός ΓΑ με πληθυσμό $N_{pop} = 200$.



Σχήμα 6.4: Επίδραση του τύπου κωδικοποίησης στο σύνολο μη κυριαρχουσών λύσεων ($N_{pop} = 100, gn = 50,$ ομοιόμορφη διασταύρωση, ρυθμός μετάλλαξης 0.01), (α) συμβατικός δυαδικός κώδικας, (β) κώδικας Gray.

Οι παράμετροι του ΓΑ που ελέγχονται επιπλέον είναι ο τύπος κωδικοποίησης, ο αριθμός των γενεών gn, ο τύπος της διασταύρωσης και ο ρυθμός μετάλλαξης. Από τη μελέτη του Σχήματος 6.4 διαπιστώνεται ότι διατηρώντας όμοιες τιμές στις υπόλοιπες παραμέτρους του ΓΑ, η χρήση του

κώδικα Gray αυξάνει το πλήθος και τη διασπορά του συνόλου των μη κυριαρχουσών λύσεων, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει την ποιότητά τους.

Στο Σχήμα 6.5 φαίνεται το σύνολο των μη κυριαρχουσών λύσεων για διαφορετικό αριθμό των γενεών του ΓΑ. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί, από την 50^η ήδη γενιά του ΓΑ προκύπτει ένα ικανοποιητικό σύνολο λύσεων, το οποίο βελτιώνεται ελαφρώς στις επόμενες γενιές, με ταυτόχρονη αύξηση όμως του υπολογιστικού φόρτου. Για το λόγο αυτό, το σύνολο λύσεων της 50^{ης} γενιάς θα χρησιμοποιηθεί ως βάση για τη διαδικασία τοπικής αναζήτησης.



Σχήμα 6.5: Επίδραση του αριθμού γενεών gn στο σύνολο μη κυριαρχουσών λύσεων ($N_{pop} = 100$, κώδικας Gray, ομοιόμορφη διασταύρωση, ρυθμός μετάλλαξης 0.01), (α) gn = 30, (β) gn = 50, (γ) gn = 80, (δ) gn = 100.

Η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων διασταύρωσης γίνεται στο Σχήμα 6.6, από όπου προκύπτει η υπεροχή της ομοιόμορφης διασταύρωσης λόγω της καλύτερης διασποράς λύσεων που επιτυγχάνεται. Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται η επίδραση του ρυθμού μετάλλαξης στο σύνολο των μη κυριαρχουσών λύσεων. Ο ρυθμός μετάλλαξης 0.01 δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, καθώς προσφέρει αντίστοιχη ποιότητα και σημαντικά μεγαλύτερο πλήθος λύσεων σε σχέση με μεγαλύτερες τιμές ρυθμού μετάλλαξης, ενώ υπερέχει καθολικά σε σχέση με μικρότερες τιμές ρυθμού μετάλλαξης.



Σχήμα 6.6: Επίδραση του τύπου διασταύρωσης στο σύνολο μη κυριαρχουσών λύσεων ($N_{pop} = 100, gn = 50$, κώδικας Gray, ρυθμός μετάλλαξης 0.01), (α) ομοιόμορφη διασταύρωση, (β) διασταύρωση ενός σημείου.



Σχήμα 6.7: Επίδραση του ρυθμού μετάλλαξης στο σύνολο μη κυριαρχουσών λύσεων ($N_{pop} = 100, gn = 50$, κώδικας Gray, ομοιόμορφη διασταύρωση), (α) σύγκριση ρυθμών μετάλλαξης 0.01 και 0.1, (β) σύγκριση ρυθμών μετάλλαξης 0.01 και 0.001.

Για την περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων του ΓΑ, χρησιμοποιήθηκε μια μεθοδολογία που συνδυάζει την τοπική αναζήτηση και την ταξινόμηση των μη κυριαρχουσών λύσεων. Η διαδικασία τοπικής αναζήτησης είναι αντίστοιχη με αυτή που περιγράφεται στην

αναζήτηση ταμπού (ενότητα 3.3), ενώ για την ταξινόμηση χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του Σχήματος 6.1. Αρχικά, σε κάθε μέλος του συνόλου των μη κυριαρχουσών λύσεων του ΓΑ εφαρμόζεται τοπική αναζήτηση και στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η διαδικασία ταξινόμησης, οπότε και προκύπτει το νέο σύνολο μη κυριαρχουσών λύσεων (πρώτη γενιά τοπικής αναζήτησης). Στο σύνολο αυτό, εφαρμόζεται τοπική αναζήτηση για τις νεοεισελθούσες λύσεις και επαναταξινόμηση. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να παύσουν να εισάγονται καινούργια μέλη στο σύνολο των μη κυριαρχουσών λύσεων. Στο Σχήμα 6.8 απεικονίζονται τα αποτελέσματα για διαφορετικούς πληθυσμούς του ΓΑ και για διαφορετικά στάδια της τοπικής αναζήτησης. Ο διπλασιασμός του πληθυσμού του ΓΑ (Σχήμα 6.8(β)) σε σχέση με την αρχική λύση (Σχήμα 6.8(α)) προσφέρει αντίστοιχη ποιότητα αποτελεσμάτων, μεγαλύτερο αριθμό λύσεων, αλλά και σημαντική αύξηση του αριθμού προσομοιώσεων που εκτελούνται (5200 έναντι 2600). Κατά την πρώτη γενιά τοπικής αναζήτησης της αρχικής λύσης (Σχήμα 6.8(γ)) έχει παραχθεί ένα ευρύτερο σύνολο μη κυριαρχουσών λύσεων χωρίς σημαντική αύξηση του αριθμού των προσομοιώσεων (2971). Η τελευταία γενιά τοπικής αναζήτησης της αρχικής λύσης (Σχήμα 6.8(δ)) δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το Σχήμα 6.8(β) στη μεγάλη πλειονότητα των λύσεων, ενώ ο αριθμός προσομοιώσεων αυξάνεται από τις 5200 στις 6561. Τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας τοπικής αναζήτησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3, ενώ στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζονται οι βέλτιστες παράμετροι του ΓΑ.



Σχήμα 6.8: Επίδραση του πληθυσμού N_{pop} και της διαδικασίας τοπικής αναζήτησης στο σύνολο μη κυριαρχουσών λύσεων (gn = 50, κώδικας Gray, ομοιόμορφη διασταύρωση, ρυθμός μετάλλαξης 0.01), (α) $N_{pop} = 100$, (β) $N_{pop} = 200$, (γ) αποτελέσματα πρώτης γενιάς τοπικής αναζήτησης του (α), (δ) αποτελέσματα τελευταίας γενιάς τοπικής αναζήτησης του (α).

	Μεγέθη συστατικών του ΜΑΣΗΕ							Αντικειμενικές συναρτήσεις		
A/A		ΦB	Ντζ.	Βιοντζ.	K.K.	_	Μετατρ.	Στρατη-	KHĖ	Εκπομπές
λυσης	AI	(kW_{n})	(kŴ)	(kW)	(kW)	Συσσ.	(kW)	γική	(€/kWh)	CO_2 -eq. (tn)
1	9	0	20	5	4	100	36	ΠΦ	0.227383	775.763
2	9	0	20	5	4	100	38	ΠΦ	0.227427	760.459
3	9	0	20	5	4	100	40	ΠΦ	0.227708	747.233
4	9	0	20	5	4	110	38	ΠΦ	0.227776	737.287
5	9	4	20	7.5	0	100	40	ΠΦ	0.227855	644.319
6	9	4	20	7.5	0	110	38	ΠΦ	0.227940	635.057
7	9	4	20	7.5	0	110	40	ΠΦ	0.228246	622.168
8	9	4	20	7.5	0	120	38	ΠΦ	0.228444	614.800
9	9	3	20	7.5	0	130	40	ΠΦ	0.228579	598.455
10	9	3	20	7.5	0	140	38	ΠФ	0.228906	594.359
11	10	1	20	7.5	0	110	42	ΠΦ	0.228998	594.079
12	9	3	20	7.5	0	130	42	ΠΦ	0.229014	586.649
13	10	1	20	7.5	0	120	40	ΠΦ	0.229032	585.040
14	9	3	20	7.5	0	140	40	ΠФ	0.229163	580.639
15	10	1	20	7.5	0	120	42	ΠΦ	0.229339	571.926
16	10	0	20	7.5	0	130	44	ΠФ	0.229523	555.013
17	10	0	20	7.5	0	140	42	ΠΦ	0.229719	549.783
18	10	0	20	7.5	0	140	44	ΠΦ	0.230077	536.866
19	10	0	20	7.5	0	140	46	ΠФ	0.230710	527.063
20	10	1	20	7.5	0	130	48	ΠФ	0.231881	524.365
21	10	1	20	10	0	130	48	ΠФ	0.234017	523.170
22	10	0	15	15	0	120	42	ΠФ	0.236352	515.731
23	10	0	15	15	0	130	40	ΠФ	0.236429	512.493
24	10	0	15	15	0	130	42	ΠФ	0.236439	499.271
25	10	0	15	15	0	130	44	ΠФ	0.236648	488.586
26	10	0	15	15	0	140	42	ΠФ	0.236685	484.372
27	10	0	15	15	0	140	44	ΠФ	0.236895	473.507
28	10	0	15	15	0	140	46	ΠΦ	0.237421	465.097
29	10	1	15	15	0	130	48	ΠФ	0.238507	462.949
30	10	0	7.5	20	0	140	42	ΠФ	0.242320	365.568
31	10	0	7.5	20	0	140	44	ΠΦ	0.242321	358.584
32	10	0	7.5	20	0	140	46	ΠΦ	0.242666	353.211
33	10	1	7.5	20	0	130	48	ΠФ	0.243795	352.328
34	10	1	3	25	0	130	44	ΠФ	0.247778	286.369
35	10	2	3	25	0	130	42	ΠФ	0.247839	286.008
36	10	1	3	25	0	130	46	ΠФ	0.248195	283.524
37	10	1	3	25	0	130	48	ΠФ	0.248760	281.040
38	9	6	0	30	0	120	42	ΠФ	0.255535	239.498
39	9	6	0	30	0	120	44	ΠΦ	0.255640	237.808

Πίνακας 6.3: Σύνολο μη κυριαρχουσών λύσεων μετά το τέλος της διαδικασίας τοπικής αναζήτησης.

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Συσσ. = Συσσωρευτές, Μετατρ. = Μετατροπέας, ΠΦ = Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

Από τη μελέτη του Πίνακα 6.3 προκύπτει ότι όλες οι μη κυριαρχούσες λύσεις εμπεριέχουν υψηλό αριθμό ΑΓ και συσσωρευτών, μετατροπείς αντίστοιχης ισχύος (της τάξεως των 40 kW), υιοθέτηση της στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου, ενώ οι ΦΒ συστοιχίες και οι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούνται είναι ελάχιστης ή μηδενικής ισχύος. Οι διαφορές στις τιμές των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων οφείλονται στη διαφορετική συμμετοχή των ντηζελογεννητριών με καύσιμο το ντήζελ και το βιοντήζελ. Συγκεκριμένα, το καύσιμο ντήζελ παρουσιάζει χαμηλότερα

κόστη και υψηλότερες εκπομπές CO₂-eq., ενώ το καύσιμο βιοντήζελ υψηλότερα κόστη και χαμηλότερες εκπομπές CO₂-eq.. Από τις τεχνολογίες ΑΠΕ, η ΑΓ παρουσιάζει τον καλύτερο συνδυασμό χαμηλού κόστους και χαμηλών εκπομπών CO₂-eq., ενώ η χρήση μεγάλου αριθμού συσσωρευτών είναι απαραίτητη για τη σωστή διαχείριση της ενέργειας ενός συστήματος στο οποίο υπάρχει απαίτηση για παραγωγή μεγάλης ποσότητας ενέργειας από μονάδες μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής. Η έλλειψη ΦΒ συστοιχιών εξηγείται από το υψηλό κόστος τους, ενώ η έλλειψη κυψελών καυσίμων με καύσιμο μεθανόλη οφείλεται στο συνδυασμό του υψηλού κόστους και των υψηλών εκπομπών CO₂-eq., όπως αυτές προκύπτουν από τη μεθοδολογία της AKZ.

Παράμετρος	Τιμή
Πληθυσμός, Ν _{pop}	100
Αριθμός γενεών, gn	50, ακολουθούμενες από διαδικασία τοπικής αναζήτησης
Κωδικοποίηση	Κώδικας Gray
Τύπος διασταύρωσης	Ομοιόμορφη
Ρυθμός μετάλλαξης	0.01

Πίνακας 6.4: Βέλτιστες παράμετροι αλγορίθμου NSGA-II.

6.6.2 Μελέτη υβριδικού συστήματος που εμπεριέχει δεξαμενή υδρογόνου

Για την οικονομική και περιβαλλοντική αποτίμηση ενός ΜΑΣΗΕ που χρησιμοποιεί ως τεχνολογία αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας τη δεξαμενή υδρογόνου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος NSGA-II με τις παραμέτρους που αναγράφονται στον Πίνακα 6.4. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εκτέλεση του ΓΑ και από τη διαδικασία της τοπικής αναζήτησης δείχνονται στα Σχήματα 6.9(α) και 6.9(β), αντίστοιχα. Από τη σύγκρισή τους, προκύπτει η αναγκαιότητα της διαδικασίας τοπικής αναζήτησης, καθώς αυξάνει σημαντικά το πλήθος του συνόλου των μη κυριαρχουσών λύσεων. Ο συνολικός αριθμός προσομοιώσεων που εκτελούνται στις δύο περιπτώσεις είναι αντίστοιχα 2600 και 5983. Τα τελικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τη διαδικασία τοπικής αναζήτησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5.



Σχήμα 6.9: Σύνολο μη κυριαρχουσών λύσεων ΜΑΣΗΕ που εμπεριέχει δεξαμενή υδρογόνου $(N_{pop} = 100, gn = 50, κώδικας Gray, ομοιόμορφη διασταύρωση, ρυθμός μετάλλαξης 0.01), (α) απευθείας αποτελέσματα ΓΑ, (β) αποτελέσματα τελευταίας γενιάς τοπικής αναζήτησης.$

$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	κπομπές D ₂ -eq. (tn) 517.477 507.687 502.522 501.585 497.532 496.344 493.239 478.120 477.076
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	D ₂ -eq. (n) 517.477 507.687 502.522 501.585 497.532 496.344 493.239 478.120 477.076
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	517.477 507.687 502.522 501.585 497.532 496.344 493.239 478.120 477.076
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	507.687 502.522 501.585 497.532 496.344 493.239 478.120 477.076
3 9 0 20 10 12 20 20 20 0.299478 1 4 9 1 20 10 12 20 16 20 0.300391 1 5 9 0 20 10 12 20 24 20 0.300655 1	502.522 501.585 497.532 496.344 493.239 478.120
4 9 1 20 10 12 20 16 20 0.300391 1 5 9 0 20 10 12 20 24 20 0.300655 1	501.585 497.532 496.344 493.239 478.120
5 9 0 20 10 12 20 24 20 0.300655 1	497.532 496.344 493.239 478.120
	496.344 493.239 478.120
6 9 1 20 10 12 20 20 20 0.301445 1	493.239 478.120
7 10 0 20 10 12 20 8 20 0.301466 1	478.120
8 10 0 20 10 12 20 12 20 0.301588 1	177 076
9 9 0 20 10 12 24 16 24 0.302032 1	4//.9/0
10 10 0 20 10 12 20 16 20 0.302045 1	468.013
11 10 0 20 10 12 20 20 20 0.302983 1	461.658
12 9 1 20 10 16 24 20 24 0.304885 1	434.335
13 10 0 20 10 16 24 16 24 0.305261 1	404.882
14 10 0 20 10 16 24 20 24 0.306049 1	396.990
15 10 0 20 10 16 24 24 24 0.307123 1	391.926
16 10 1 20 10 16 24 20 24 0.308052 1	391.031
17 10 0 20 10 16 24 28 24 0.308254 1	387.255
18 9 0 15 15 12 20 12 20 0.309121 1	326 525
19 9 0 15 15 12 20 16 20 0.309406 1	319 740
20 9 0 15 15 12 20 10 20 0.309100 1	316 152
20 9 0 15 15 12 20 20 20 0.510270 1 21 9 1 15 15 12 20 16 20 0.311241 1	315 411
21 9 1 15 15 12 20 10 20 0.511241 1 22 9 0 15 15 12 20 24 20 0.311364 1	311 890
22 9 0 15 15 12 20 21 20 0.511304 1	311 791
23 10 0 15 15 12 20 20 20 0.312114 1	294 867
25 10 0 15 15 12 20 16 20 0.312211 1	287 813
26 10 0 15 15 12 20 10 20 0.312100 126 10 0 15 15 12 20 20 20 0.313220 1	283 310
20 10 0 15 15 12 20 20 20 0.313220 127 10 0 15 15 12 20 24 20 0.314212 1	279 240
27 10 0 15 15 12 20 24 20 0.314212 1 28 10 0 15 15 12 24 16 24 0.315121 1	264 047
29 10 0 15 15 12 24 10 24 0.315421 1	256 503
30 9 1 15 15 16 24 20 24 0.315815 1	253.688
31 10 0 15 16 16 21 20 21 0.015000 1	229 543
32 10 0 15 16 16 24 20 24 0.316449 1	223 698
33 10 0 15 15 16 24 24 0317367 1	219 980
34 10 0 15 16 16 21 21 21 0.017507 10 10 10 10 10 10 10	216.512
35 10 1 15 15 16 24 24 0.319354 1	215 585
36 10 0 15 15 16 24 32 24 0.319605 1	212.780
37 9 0 15 16 32 21 32 21 0.319000 1	212.098
38 9 0 15 15 16 32 24 32 0.320371 1	204 603
39 9 0 15 15 16 32 28 32 0321044 1	198 187
40 9 0 15 16 32 32 32 0.321000 1	193 232
41 10 0 15 15 16 32 20 32 0.322069 1	174 037
42 10 0 15 16 32 26 32 0.32200	167 101
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	159 325
$44 \mid 10 0 15 15 16 32 32 32 0.322500 1$	153.577
45 10 0 15 15 10 32 32 0.323000 145 10 0 15 15 20 32 0 323858 1	148.839
$46 \mid 10 \mid 0 \mid 15 \mid 15 \mid 20 \mid 32 \mid 20 \mid 32 \mid 0.325050 \mid 1$	140.493
$47 \mid 10 0 15 15 20 32 21 32 0.324109 1$	134 911
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	130.995
$49 \mid 10 0 15 15 16 36 32 32 0.325004 1$	130.159
$50 \mid 10 0 15 15 20 32 36 32 0.326976 1$	126.496
51 10 0 15 15 20 36 24 36 0.327435 1	117 432

Πίνακας 6.5: Σύνολο μη κυριαρχουσών λύσεων μετά το τέλος της διαδικασίας τοπικής αναζήτησης.

A / A		Μεγέθη συστατικών του ΜΑΣΗΕ								Αντικειμενικές συναρτήσεις	
A/A		ΦB	Ντζ.	Βιοντ.	K.K.	Ηλεκτρ.	Δεξ. Η ₂	Μετατρ.	KHE	Εκπομπές	
λυσης	AI	(kW _p)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kg)	(kW)	(€/kWh)	CO_2 -eq. (tn)	
52	10	0	15	15	20	36	28	36	0.327744	1109.577	
53	10	0	15	15	20	36	32	36	0.328491	1103.832	
54	10	0	15	15	20	36	36	36	0.329449	1098.686	
55	10	0	15	15	24	36	24	36	0.329655	1097.042	
56	10	0	15	15	24	36	28	36	0.330234	1090.341	
57	10	0	15	15	24	36	32	36	0.331070	1085.378	
58	10	0	15	15	20	40	32	40	0.331932	1081.574	
59	10	0	15	15	24	36	36	36	0.332058	1081.134	
60	10	0	15	15	20	40	36	40	0.332601	1073.691	
61	10	0	15	15	20	40	40	40	0.333386	1068.172	
62	10	0	15	15	24	40	32	40	0.334209	1060.776	
63	10	0	15	20	20	40	36	40	0.342832	1054.705	
64	10	0	15	20	24	40	28	40	0.344527	1047.467	
65	10	0	15	20	24	40	32	40	0.345012	1041.116	
66	10	0	15	25	20	40	32	40	0.351947	1037.211	
67	10	0	15	25	20	40	36	40	0.352370	1030.182	

<u>Επεξηγήσεις</u>: Ντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο ντήζελ, Βιοντζ. = Ντηζελογεννήτρια με καύσιμο βιοντήζελ, Κ.Κ. = Κυψέλη καυσίμου, Ηλεκτρ. = Μονάδα ηλεκτρόλυσης, Δεξ. Η₂ = Δεξαμενή υδρογόνου, Μετατρ. = Μετατροπέας.

Μελετώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.5, διαπιστώνεται ότι οι μη κυριαρχούσες λύσεις του ΜΑΣΗΕ με δεξαμενή υδρογόνου εξακολουθούν να εμπεριέχουν υψηλό αριθμό ΑΓ. Η μεγάλη διαφοροποίηση σε σχέση με το σύστημα που χρησιμοποιεί συσσωρευτές έγκειται στη σημαντική αύξηση του μεγέθους των κυψελών καυσίμου. Αυτή οφείλεται 1) στο καθαρότερο καύσιμο (H₂) που χρησιμοποιείται, και 2) στο γεγονός ότι το καύσιμο αυτό δεν αγοράζεται, αλλά προέρχεται από την περίσσεια ενέργειας του συστήματος (συνήθως από τις ΑΓ). Το μηδενικό μέγεθος ΦΒ συστοιχιών που περιλαμβάνεται σε κάθε λύση έχει ως αποτέλεσμα τη λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης με ενέργεια που προέρχεται από τις γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος, και εξηγεί την ισότητα στα μεγέθη μεταξύ της μονάδας ηλεκτρόλυσης και του μετατροπέα. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 6.5 σε σχέση με τον Πίνακα 6.3 παρατηρείται η σημαντική αύξηση τόσο του KHE, όσο και των εκπομπών CO₂-eq. στο σύστημα με δεξαμενή υδρογόνου. Το αυξημένο KHE οφείλεται στο μεγαλύτερο κόστος της τεχνολογίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι αυξημένες εκπομπές οφείλονται κατά κύριο λόγο στην αυξημένη λειτουργία της ντηζελογεννήτριας με καύσιμο ντήζελ, που αποτελεί το συστατικό του ΜΑΣΗΕ με τις μεγαλύτερες εκπομπές CO₂-eq. (Πίνακας 6.2). Συγκεκριμένα, αν και η ονομαστική ισχύς της ντηζελογεννήτριας με καύσιμο ντήζελ παραμένει στην ίδια τάξη μεγέθους και στα δύο συστήματα, ο συντελεστής φορτίου ($\Sigma\Phi$) αυξάνεται σημαντικά στο ΜΑΣΗΕ με δεξαμενή υδρογόνου, εξαιτίας της πολύ μικρότερης συνολικής απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης (μονάδα ηλεκτρόλυσης, δεξαμενή υδρογόνου και κυψέλη καυσίμου) σε σχέση με τους συσσωρευτές.

6.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συνεκτίμηση του οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους στην αποτίμηση ενός ΜΑΣΗΕ έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός μεγάλου αριθμού μη κυριαρχουσών λύσεων, που παρουσιάζουν κοινά γνωρίσματα, αλλά και σημαντικές διαφορές. Όσον αφορά τα κοινά γνωρίσματα, όλες οι λύσεις περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό ΑΓ, μικρό μέγεθος ΦΒ συστοιχιών και επαρκές μέγεθος τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει την κατάταξη μιας λύσης σε σχέση με το οικονομικό και το περιβαλλοντικό κριτήριο είναι το μέγεθος των ντηζελογεννητριών με καύσιμο ντήζελ σε σχέση με τις ντηζελογεννήτριες με καύσιμο βιοντήζελ. Μεγάλα μεγέθη ντηζελογεννητριών με καύσιμο ντήζελ οδηγούν σε μικρότερο KHE και μεγαλύτερες εκπομπές CO₂-eq., ενώ η χρήση μεγάλων μεγεθών ντηζελογεννητριών με καύσιμο βιοντήζελ οδηγεί σε αντίστροφα αποτελέσματα. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση κυψελών καυσίμου με καύσιμο τη μεθανόλη δεν συστήνεται, λόγω του υψηλού κόστους και των αυξημένων εκπομπών CO₂-eq. που παρουσιάζουν.

Όσον αφορά τη σύγκριση των τεχνολογιών αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, παρατηρείται σημαντική υπεροχή των ΜΑΣΗΕ που εμπεριέχουν συσσωρευτές σε σχέση με τα ΜΑΣΗΕ που εμπεριέχουν δεξαμενές υδρογόνου, τόσο στο οικονομικό όσο και στο περιβαλλοντικό κριτήριο. Για την εύρεση του συνόλου των μη κυριαρχουσών λύσεων, η συνεργασία του ΓΑ πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης NSGA-II και του αλγορίθμου τοπικής αναζήτησης δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα, καθώς συνδυάζει την άριστη ποιότητα και το μεγάλο εύρος του συνόλου των μη κυριαρχουσών λύσεων, ή συνεροχήτησης δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα, καθώς συνδυάζει την άριστη ποιότητα και το μεγάλο εύρος του συνόλου των μη κυριαρχουσών λύσεων, χωρίς ταυτόχρονα να αυξάνει απαγορευτικά τον υπολογιστικό φόρτο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons: Chichester, 2001.
- [6.2] D.F. Jones, S.K. Mirrazavi, and M. Tamiz, "Multi-objective meta-heuristics: an overview of the current state-of-art," *European Journal of Operational Research*, vol. 137, pp. 1-9, 2002.
- [6.3] J.D. Schaffer, "Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms," Ph.D. Dissertation, Vanderbilt University, Nashville, 1984.
- [6.4] N. Srinivas and K. Deb, "Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms," *Evolutionary Computing Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 221-248, 1994.
- [6.5] J. Horn, N. Nafploitis, and D. Goldberg, "A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization," in *Proceedings of the 1st IEEE Conference on Evolutionary Computation*, pp. 82-87, 1994.
- [6.6] A. Osyczka and S. Kundu, "A new method to solve generalized multicriteria optimization problems using the simple genetic algorithm," *Structural Optimization*, vol. 10, no. 2, pp. 94-99, 1995.
- [6.7] E. Zitzler and L. Thiele, "Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 3, no. 4, November 1999.
- [6.8] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, April 2002.
- [6.9] E. Nieuwlaar, "Life cycle assessment and energy systems," *Elsevier Encyclopaedia of Energy*, vol. 3, pp. 647-654, 2004.
- [6.10] B.F. Hobbs and P. Meier, *Energy decisions and the environment: a guide to the use of multicriteria methods.* Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [6.11] L. Gagnon, C. Belanger, and Y. Uchiyama, "Life-cycle assessment of electricity generation options: the status of research in year 2001," *Energy Policy*, vol. 30, pp. 1267-1278, 2002.
- [6.12] IPCC, "The revised guidelines for national greenhouse gas inventories," Intergovernmental Panel on climate change, Reference manual, New York, 1996.
- [6.13] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Soder, "Distributed generation: a definition," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [6.14] V. Fthenakis and E. Alsema, "Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004–early 2005 status," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 14, pp. 275-280, 2006.
- [6.15] F.A. Farret and M.G. Simões, *Integration of alternative sources of energy*. John Wiley & Sons: New Jersey, 2006.
- [6.16] R. Dones, T. Heck, and S. Hirschberg, "Greenhouse gas emissions from energy systems, comparison and overview," *Elsevier Encyclopaedia of Energy*, vol. 3, pp. 77-95, 2004.
- [6.17] M. Enguídanos, A. Soria, B. Kavalov, and P. Jensen, "Techno-economic analysis of biodiesel production in the EU: a short summary for decision-makers," European Commission, Joint Research Centre, Technical Report EUR 20279 EN, May 2002.

- [6.18] F.I. Khan, K. Hawboldt, and M.T. Iqbal, "Life cycle analysis of wind-fuel cell integrated system," *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 157–177, 2005.
- [6.19] C.J. Rydh, "Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage," *Journal of Power Sources*, vol. 80, pp. 21-29, 1999.
- [6.20] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, R. Battisti, and A. Corrado, "Energy, cost and LCA results of PV and hybrid PV/T solar systems," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 13, pp. 235-250, 2005.
- [6.21] K. Deb, A. Pratap, and T. Meyarivan, "Constrained test problems for multi-objective evolutionary optimization," in *Proceedings of the 1st International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, pp. 284-298, 2001.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Η διδακτορική διατριβή ασχολήθηκε με τα προβλήματα της εύρεσης της οικονομικά βέλτιστης δομής, της ανάλυσης αξιοπιστίας και της περιβαλλοντικής αποτίμησης ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η επίλυση των παραπάνω προβλημάτων εμπεριέχει σημαντικές δυσκολίες, λόγω της ύπαρξης ενός μεγάλου αριθμού εναλλακτικών επιλογών σχεδίασης καθώς και εξαιτίας της αβεβαιότητας στις τιμές πολλών και σημαντικών παραμέτρων του συστήματος.

Για το σύνθετο πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης της εύρεσης της βέλτιστης δομής ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εξετάστηκε καταρχήν η επίδοση τριών δημοφιλών μεθευρετικών μεθόδων: της αναζήτησης ταμπού, των γενετικών αλγορίθμων και της προσομοιωμένης ανόπτησης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν αντίστοιχης ποιότητας για όλες τις μεθόδους. Ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος και για τις τρεις μεθόδους ήταν ιδιαίτερα σύντομος συγκρινόμενος με τον απαγορευτικό χρόνο επίλυσης που απαιτεί η μέθοδος της πλήρους απαρίθμησης. Εξετάζοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε μεθόδου, διαπιστώθηκε η ταχύτερη σύγκλιση των γενετικών αλγορίθμων και της προσομοιωμένης ανόπτησης κοντά στην περιοχή των βέλτιστων λύσεων, ενώ η αναζήτηση ταμπού ήταν πιο αποδοτική στην εύρεση της βέλτιστης λύσης σε μια γειτονιά λύσεων. Για το λόγο αυτό προτάθηκε η χρήση δύο υβριδικών μεθοδολογιών που προκύπτουν με συνεργασία των παραπάνω μεθευρετικών μεθόδων και συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της καθεμιάς μεθευρετικής μεθόδου: 1) της υβριδικής μεθόδου γενετικών αλγορίθμων και αναζήτησης ταμπού, και 2) της υβριδικής μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης και αναζήτησης ταμπού. Και στις δύο αυτές υβριδικές μεθόδους, η βελτιστοποίηση γίνεται με την αναζήτηση ταμπού. Στην πρώτη υβριδική μέθοδο, ως αρχική (εφικτή) λύση γρησιμοποιείται το αποτέλεσμα που προκύπτει από το γενετικό αλγόριθμο. Στην δεύτερη υβριδική μέθοδο, ως αρχική λύση χρησιμποιείται το αποτέλεσμα που προκύπτει από την προσομοιωμένη ανόπτηση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι δύο υβριδικές μέθοδοι βελτιώνουν τη λύση (σε σχέση με τη λύση που έδωσαν ξεχωριστά κάθε μία από τις τρεις μεθευρετικές μεθόδους), χωρίς παράλληλα να αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός των απαιτούμενων προσομοιώσεων.

Στα μικρά απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που εξετάστηκαν, τέθηκαν ως στόχοι η αξιόπιστη λειτουργία τους σε όλη τη διάρκεια του έτους, η μεγάλη διείσδυση των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και ο περιορισμός του αρχικού τους κόστους. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων απέδειξε τη σημαντική συνεισφορά των ανεμογεννητριών, των συσσωρευτών, και των γεννητριών συμβατικού τύπου στην αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία του συστήματος. Οι τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών, των κυψελών καυσίμου και της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω δεξαμενών υδρογόνου δεν αποδείχτηκαν ιδιαίτερα αποδοτικές λόγω του υψηλού τους κόστους, αλλά στο μέλλον αναμένεται να επεκταθεί σημαντικά η χρήση τους.

Η αναγκαιότητα της ανάλυσης αξιοπιστίας ενός οποιουδήποτε συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται στο γεγονός ότι οι πιθανότητες λειτουργίας των διαφορετικών ενεργειακών τεχνολογιών που περιλαμβάνονται σε αυτό διαφέρουν μεταξύ τους, και επομένως η αποτίμηση της πραγματικής λειτουργίας του συστήματος μπορεί να εμπεριέχει αρκετές δυσκολίες. Για την ανάλυση αξιοπιστίας ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προτάθηκε στη διδακτορική αυτή διατριβή η χρήση των ρευστών στοχαστικών δικτύων Petri, που είναι ένα γραφικό και μαθηματικό εργαλείο μοντελοποίησης στοχαστικών συστημάτων που περιλαμβάνουν ροές. Η χρήση των ρευστών στοχαστικών δικτύων Petri συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των κλασσικών μεθόδων προσομοίωσης με το πλεονέκτημα της γραφικής αναπαράστασης τόσο της στατικής δομής του συστήματος, όσο και της δυναμικά μεταβαλλόμενης κατάστασής του. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε σε ένα υβριδικό σύστημα που περιλαμβάνει ντηζελογεννήτρια και ανεμογεννήτριες, όπου μελετήθηκε η επίδραση της αύξησης του μεγέθους των συστατικών του στη βελτίωση των βασικών δεικτών αξιοπιστίας και επίδοσης του συστήματος.

Στη διδακτορική αυτή διατριβή μοντελοποιήθηκε η περιβαλλοντική αποτίμηση της λειτουργίας ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας ως κριτήριο την ελαχιστοποίηση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των εξαρτημάτων του συστήματος, όπως αυτές προκύπτουν από τη μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής, και συνδυάστηκε με την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος, οπότε προέκυψε ένα σύνθετο πρόβλημα πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος προτάθηκε μία υβριδική τεχνική που απαιτεί τη συνεργασία ενός γενετικού αλγορίθμου πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης και ενός αλγορίθμου τοπικής αναζήτησης. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου έδειξαν ότι ορισμένα χαρακτηριστικά του συστήματος διατηρούνται αναλλοίωτα, ανεξάρτητα από τη βαρύτητα του οικονομικού ή του περιβαλλοντικού κριτηρίου. Στα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνεται ο μεγάλος αριθμός ανεμογεννητριών, το μικρό μέγεθος φωτοβολταϊκών συστοιχών και το επαρκές μέγεθος τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

7.2 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής επικεντρώνεται στα ακόλουθα σημεία:

 Στην ανάπτυξη δύο πρωτότυπων υβριδικών μεθοδολογιών α) γενετικών αλγορίθμων και αναζήτησης ταμπού, και β) προσομοιωμένης ανόπτησης και αναζήτησης ταμπού, για την επίλυση του σύνθετου προβλήματος συνδυαστικής βελτιστοποίησης της εύρεσης της βέλτιστης δομής ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, σημαντική είναι η συμβολή της διατριβής στη συγκριτική αξιολόγηση για πρώτη φορά ενός μεγάλου αριθμού μεθευρετικών μεθόδων, που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της οικονομικά βέλτιστης δομής ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κριτήρια αξιολόγησης είναι η ποιότητα της τελικής λύσης και η μείωση του υπολογιστικού φόρτου που επιτυγχάνεται. Επιπλέον, η μοντελοποίηση του προς μελέτη συστήματος σε κάθε χρησιμοποιούμενη μέθοδο έχει γίνει κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι πολύ εύκολη η προσαρμογή της σε προβλήματα με διαφορετικό τύπο και μέγεθος εξαρτημάτων, διαφορετικές στρατηγικές συνεργασίας των εξαρτημάτων, και διαφορετικούς περιορισμούς του προβλήματος.

- 2. Στην καινοτόμο θεώρηση που ακολουθείται κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης και ανάλυσης αξιοπιστίας ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με ρευστά στοχαστικά δίκτυα Petri. Συγκεκριμένα, αντί να καθοριστούν ρυθμοί ροής που περιγράφουν τη συνεχή μεταβολή του επιπέδου του ρευστού κατά την πάροδο του χρόνου, όπως στα συνήθη ρευστά στοχαστικά δίκτυα Petri, υιοθετείται η επιλογή σταθερών χρονικών διαστημάτων, έτσι ώστε να μπορέσουν να μελετηθούν τα βασικότερα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του συστήματος. Επιπλέον, για τις ανάγκες του συγκεκριμένου προβλήματος εισάγεται ένα νέο είδος συστατικού στα δίκτυα Petri, που ονομάζεται τόξο βάσης δεδομένων και επιτρέπει την εύκολη εισαγωγή μεγάλου πλήθους δεδομένων στη διαδικασία προσομοίωσης.
- 3. Στην υιοθέτηση μιας πρωτότυπης μεθοδολογίας συνυπολογισμού του οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους του συστήματος σε ένα πρόβλημα πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης. Η οικονομική αποτίμηση βασίζεται στον υπολογισμό του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ για την περιβαλλοντική αποτίμηση προτείνεται για πρώτη φορά να ληφθούν ως κριτήριο οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου του συστήματος, όπως αυτές υπολογίζονται από τη μεθοδολογίας της ανάλυσης κύκλου ζωής των συστατικών του. Η επιλογή της μεθοδολογίας ανάλυσης κύκλου ζωής οφείλεται στο γεγονός ότι οι εκπομπές ενός συστατικού του συστήματος σε όλη τη διάρκεια ζωής του μπορεί να διαφοροποιούνται σημαντικά από τις απευθείας εκπομπές του κατά τη διάρκεια λειτουργίας του. Επιπλέον, ο λόγος για τον οποίο λαμβάνονται υπόψη μόνο τα αέρια του θερμοκηπίου στην περιβαλλοντική αποτίμηση του συστήματος είναι γιατί παρουσιάζουν την ιδιαιτερότητα ότι οι περιβαλλοντικές τους επιδράσεις δεν εξαρτώνται από την τοποθεσία στην οποία εκπέμπονται, και επομένως δεν επηρεάζονται από το γεγονός ότι ο συνολικός κύκλος ζωής ενός προϊόντος περιλαμβάνει στάδια που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές τοποθεσίες.

7.3 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή είναι δυνατόν να επεκταθούν με την εφαρμογή τους σε ένα μεγαλύτερο εύρος συστημάτων. Επιπλέον, τα προβλήματα που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή είναι δυνατόν να επιλυθούν με εναλλακτικές μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα, προτείνονται οι ακόλουθες επεκτάσεις της διδακτορικής αυτής διατριβής:

- 1. Επέκταση του αλγορίθμου μοντελοποίησης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να περιλαμβάνονται σε αυτόν συστήματα διασυνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, θερμικά φορτία και τεχνολογίες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού.
- 2. Επέκταση της μεθοδολογίας προσομοίωσης και αξιοπιστίας μέσω δικτύων Petri, έτσι ώστε να μοντελοποιείται ένας μεγαλύτερος αριθμός ενεργειακών τεχνολογιών.
- Εφαρμογή και αξιολόγηση εναλλακτικών μεθευρετικών αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος της εύρεσης της οικονομικά βέλτιστης δομής ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.
- Εφαρμογή και αξιολόγηση εναλλακτικών μεθόδων για την πολυαντικειμενική οικονομική και περιβαλλοντική βελτιστοποίηση ενός μικρού απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

κέφ. 7 Σύμπερασματά

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

alternating current: εναλλασσόμενο ρεύμα capacity shortage: απώλεια ισχύος cycle charging startegy: στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή direct current: συνεχές ρεύμα dispatch strategy: στρατηγική συνεργασίας dispatchable unit: μονάδα ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής electric power distribution: διανομή ηλεκτρικής ισχύος electric power generation: παραγωγή ηλεκτρικής ισγύος electric power transmission: μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος excess energy: περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας generator: γεννήτρια hybrid power systems: υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας interconnected power systems: διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας isolated power systems: απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας load: φορτίο load curve: καμπύλη φορτίου load following strategy: στρατηγική παρακολούθησης φορτίου loss of load: απώλεια φορτίου non-dispatchable unit: μονάδα μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής operating reserve: λειτουργική εφεδρεία peak load: αιχμή φορτίου power systems: συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας renewable energy sources: avave $\omega \sigma \eta \epsilon \zeta \epsilon v \epsilon \rho \epsilon \epsilon \tau$ small isolated power systems: μικρά απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας spinning reserve: στρεφόμενη εφεδρεία surplus energy: περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας system dispatch: κατανομή φορτίου του συστήματος unmet load: μη εξυπηρετούμενο φορτίο

Μαθηματικοί όροι

correlation coefficient: συντελεστής συσχέτισης curve fitting: προσαρμογή τιμών σε καμπύλη dynamic analysis models: μοντέλα δυναμικής ανάλυσης inverse transform method: μέθοδος αντίστροφου μετασχηματισμού logistic models: λογιστικά μοντέλα statistical models: στατιστικά μοντέλα steady state models: μοντέλα μόνιμης κατάστασης λειτουργίας time series models: μοντέλα γρονοσειρών

<u>Ανεμογεννήτριες</u>

anemometer: ανεμόμετρο Betz limit: όριο Betz blade: πτερύγιο capacity factor: συντελεστής φορτίου gearbox: κιβώτιο ταχυτήτων horizontal axis wind turbine: ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα hub: πλήμνη

logarithmic law: λογαριθμικός νόμος nacelle: θάλαμος μηχανισμών, άτρακτος pitch control: έλεγχος του βήματος της έλικας power coefficient: συντελεστής ισχύος power curve: καμπύλη ισχύος power density: πυκνότητα ισχύος power law: εκθετικός νόμος rotor: δρομέας scale parameter: παράμετρος κλίμακας κατανομής Weibull shape parameter: παράμετρος μορφής κατανομής Weibull stall control: αεροδυναμικός έλεγχος tower: πυλώνας vertical axis wind turbine: ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα Weibull distribution: κατανομή Weibull wind turbine: ανεμογεννήτρια

Φωτοβολταϊκά συστήματα και ηλιακή γεωμετρία

air mass: μάζα αέρα albedo: διάχυτη ανακλαστικότητα του εδάφους amorphous silicon: $\dot{\alpha}\mu \circ \rho \phi \circ \pi \circ \rho i \tau \circ$ angle of incidence: γωνία πρόσπτωσης anisotropy index: δείκτης ανισοτροπίας azimuth angle: γωνία αζιμουθίου beam radiation: άμεση ακτινοβολία clearness index: δείκτης αιθριότητας declination: ηλιακή απόκλιση diffuse radiation: διάχυτη ακτινοβολία extraterrestrial radiation: εξωγήινη ακτινοβολία horizontal axis tracking systems: συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου οριζόντιου άξονα hour angle: γωνία ώρας *I-V curve*: καμπύλη *I-V* irradiance: πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας irradiation: πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας latitude: γεωγραφικό πλάτος longitude: γεωγραφικό μήκος maximum power point: σημείο μέγιστης ισχύος maximum power point tracker: ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος monocrystaline silicon: μονοκρυσταλλικό πυρίτιο open cirquit voltage: τάση ανοιχτοκύκλωσης P-V curve: καμπύλη P-V *peak Watt*: Watt αιχμής photovoltaic array: φωτοβολταϊκή συστοιχία photovoltaic cell: φωτοβολταϊκό στοιχείο photovoltaic effect: φωτοβολταϊκό φαινόμενο photovoltaic module: φωτοβολταϊκό πλαίσιο photovoltaic module efficiency: απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου photovoltaic system: φωτοβολταϊκό σύστημα polycrystaline silicon: πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

short cirquit current: ένταση βραχυκύκλωσης slope: κλίση solar constant: ηλιακή σταθερά solar hour: ηλιακή σταθερά solar radiation: ηλιακή ακτινοβολία standard test conditions: πρότυπες συνθήκες δοκιμής sun azimuth angle: γωνία αζιμουθίου του ήλιου sun zenith angle: γωνία ζενίθ του ήλιου temperature coefficient: θερμοκρασιακός συντελεστής time zone: ζώνη ώρας tracking systems: συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου δύο αξόνων vertical axis tracking systems: συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου κατακόρυφου άξονα

Μικρά υδροηλεκτρικά έργα

design flow: παροχή σχεδιασμού flow: παροχή gross head: γεωδαιτικό ύψος υδατόπτωσης hydro turbine: υδροστρόβιλος large hydro: μεγάλα υδροηλεκτρικό έργα net head: καθαρό ύψος υδατόπτωσης reservoir hydro: υδροηλεκτρικό έργα ρυθμιζόμενης παροχής residual flow: απομένουσα παροχή run-of-river hydro: υδροηλεκτρικό έργα φυσικής παροχής small hydro: μικρά υδροηλεκτρικό έργα

<u>Γεννήτριες και μετατροπείς</u>

alkaline fuel cell (AFC): αλκαλική κυψέλη καυσίμου anode: άνοδος biodiesel: βιοντήζελ biogas: βιοαέριο cathode: κάθοδος converter: μετατροπέας diesel: πετρέλαιο, ντήζελ Diesel cycle: κύκλος του Diesel diesel generator: ντηζελογεννήτρια direct methanol fuel cell (DMFC): κυψέλη καυσίμου απευθείας μετατροπής της μεθανόλης electrolysis: ηλεκτρόλυση electrolyte: ηλεκτρολύτης ethanol: αιθανόλη fuel: καύσιμο fuel cell: κυψέλη καυσίμου fuel curve: καμπύλη κατανάλωσης gasoline: βενζίνη generator: γεννήτρια higher heating value (HHV): ανώτερη θερμογόνος δύναμη hydrogen: υδρογόνο hydrogen storage: αποθήκευση υδρογόνου internal combustion engine: μηχανή εσωτερικής καύσης

inverter: αντιστροφέας losses: απώλειες lower heating value (LHV): κατώτερη θερμογόνος δύναμη *methanol*: μεθανόλη microturbine: μικρογεννήτρια molten carbonate fuel cell (MCFC): κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος natural gas: φυσικό αέριο phosphoric acid fuel cell (PAFC): κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος propane: προπάνιο proton exchange membrane fuel cell (PEMFC): κυψέλη καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης reciprocating engine: $\pi \alpha \lambda v \delta \rho \rho \mu \kappa \eta \gamma \alpha v \eta$ rectifier: ανορθωτής reformer: αναμορφωτής solid oxide fuel cell (SOFC): κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου standing losses: μόνιμες απώλειες

Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

absorption: προσρόφηση, απορρόφηση anode: άνοδος battery: συσσωρευτής battery charge current: ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή battery charge rate: ρυθμός φόρτισης συσσωρευτή battery cycles: κύκλοι λειτουργίας συσσωρευτή battery depth of discharge: βάθος εκφόρτισης συσσωρευτή battery discharge current: ρεύμα εκφόρτισης συσσωρευτή battery discharge rate: ρυθμός εκφόρτισης συσσωρευτή battery maximum charge current: μέγιστο ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή battery maximum discharge current: μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης συσσωρευτή battery nominal cell voltage: ονομαστική τάση κυψέλης συσσωρευτή battery self-discharge rate: ρυθμός αυτοεκφόρτισης συσσωρευτή battery setpoint state of charge: σημείο κατάστασης φόρτισης συσσωρευτή battery state of charge: κατάσταση φόρτισης συσσωρευτή capacitor: πυκνωτής capacitor plates: οπλισμοί πυκνωτή capacity: χωρητικότητα cathode: κάθοδος cell: κυψέλη charge: φόρτιση compressed air energy storage (CAES): αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα compressed hydrogen gas: συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο discharge: εκφόρτιση efficiency: απόδοση electrolyte: ηλεκτρολύτης electrolyser: μονάδα ηλεκτρόλυσης electrolyzer: μονάδα ηλεκτρόλυσης energy density: πυκνότητα ενέργειας energy storage systems: συστήματα αποθήκευσης (ηλεκτρικής) ενέργειας flywheel: σφόνδυλος flywheel spinning disk: στρεφόμενος δίσκος σφονδύλου

fuel cell: κυψέλη καυσίμου fuel tank: δεξαμενή καυσίμου higher heating value (HHV): ανώτερη θερμογόνος δύναμη hydro-pumped storage: avtlngiotauíevgn hydrogen storage: αποθήκευση υδρογόνου hydrogen tank: δεξαμενή υδρογόνου lead-acid battery: συσσωρευτής μολύβδου-οξέος lifetime: διάρκεια ζωής liquid hydrogen: υγρό υδρογόνο lithium-ion battery: συσσωρευτής λιθίου-ιόντος lower heating value (LHV): κατώτερη θερμογόνος δύναμη metal hydride: μεταλλικό υδρίδιο nickel-cadmium battery: συσσωρευτής νικελίου-καδμίου nickel-metal hydride battery: συσσωρευτής νικελίου-μεταλλικού υδριδίου specific energy: ειδική ενέργεια specific power: ειδική ισχύς supercapacitor: υπερπυκνωτής superconducting magnetic energy storage (SMES): υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας thermal storage: θερμική αποθήκευση ενέργειας ultracapacitor: υπερπυκνωτής water dam: υδατόφραγμα zinc-air battery: συσσωρευτής ψευδαργύρου-αέρα

Χρηματοοικονομικοί όροι

annual: ετήσιος annualized cost: κόστος σε ετήσια βάση cash flow: ταμειακή ροή capital: κεφάλαιο capital cost: κόστος κεφαλαίου capital recovery factor (CRF): παράγοντας ανάκτησης κεφαλαίου cost: κόστος cost of energy: κόστος ηλεκτρικής ενέργειας discount rate: επιτόκιο προεξόφλησης fixed cost: πάγιο κόστος fuel cost: κόστος καυσίμου future value: μελλοντική αξία *inflation*: πληθωρισμός interest rate: επιτόκιο lifetime: διάρκεια ζωής marginal cost: οριακό κόστος operation and maintenance cost: κόστος λειτουργίας και συντήρησης present value: παρούσα αξία remaining life: εναπομένουσα ζωή replacement cost: κόστος αντικατάστασης replacement cost duration: διάρκεια κόστους αντικατάστασης salvage value: εναπομείνασα αξία series: σειρά sinking fund factor (SFF): παράγοντας απόσβεσης total annualized cost: συνολικό κόστος σε ετήσια βάση

wear cost: κόστος φθοράς

Μεθευρετικές μέθοδοι

adaptive memory: $\pi \rho o \sigma \alpha \rho \mu o \sigma \tau \kappa \eta \mu v \eta \mu \eta$ annealing process: διαδικασία ανόπτησης aspiration criteria: κριτήρια αναφοράς binary genetic algorithms: γενετικοί αλγόριθμοι δυαδικής κωδικοποίησης Boltzmann constant: σταθερά Boltzmann Boltzmann factor: παράγοντας Boltzmann combinatorial optimization: συνδυαστική βελτιστοποίηση chromosome: χρωμόσωμα constraints: περιορισμοί cooling schedule: πρόγραμμα ψύξης crossover: διασταύρωση decoding: αποκωδικοποίηση distance parameter: παράμετρος απόστασης diversification strategies: στρατηγικές διαφοροποίησης elitism: ελιτισμός evolution strategies: εξελικτικές στρατηγικές evolutionary algorithms: εξελικτικοί αλγόριθμοι evolutionary programming: εξελικτικός προγραμματισμός fitness function: συνάρτηση καταλληλότητας gene: γονίδιο genetic algorithms: γενετικοί αλγόριθμοι *Gray code*: κώδικας Gray Hamming distance: απόσταση Hamming heuristic methods: ευρετικές μέθοδοι initial temperature: αρχική θερμοκρασία intensification strategies: στρατηγικές επίτασης local search: τοπική αναζήτηση Markov chain: αλυσίδα Markov metaheuristic methods: μεθευρετικές μέθοδοι *move*: κίνηση mutation: μετάλλαξη objective function: αντικειμενική συνάρτηση offspring: απόγονοι optimization: βελτιστοποίηση parents: γονείς population: πληθυσμός proportionate selection methods: μέθοδοι αναλογικής επιλογής real genetic algorithms: γενετικοί αλγόριθμοι πραγματικής κωδικοποίησης selection: επιλογή simulated annealing: $\pi \rho \circ \sigma \circ \mu \circ \omega \mu \in V$ single point crossover: διασταύρωση ενός σημείου stochastic universal sampling: καθολική στοχαστική δειγματοληψία tabu list: λίστα ταμπού tabu search: αναζήτηση ταμπού termination criteria: κριτήρια τερματισμού tournament selection: $\epsilon \pi i \lambda o \gamma \eta \tau o \upsilon \rho v o \upsilon \alpha$ uniform crossover: ομοιόμορφη διασταύρωση

Ανάλυση αξιοπιστίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

deterministic methods: αιτιοκρατικές μέθοδοι duration of interruptions: διάρκεια διακοπών energy index of unreliability: δείκτης αναξιοπιστίας ενέργειας energy not supplied index: $\delta\epsilon$ intro $\mu\eta$ παρεγόμενης ενέργειας frequency of interruptions: συχνότητα διακοπών load curtailed index: δείκτης απορριπτόμενου φορτίου loss of energy expectation: αναμενόμενη μη τροφοδοτούμενη ενέργεια loss of load expectation: αναμενόμενη απώλεια φορτίου loss of load probability: πιθανότητα απώλειας φορτίου maintenance: συντήρηση mean time to failure: μέσος χρόνος βλάβης mean time to repair: μέσος χρόνος επισκευής Monte Carlo simulation: προσομοίωση Monte Carlo probabilistic methods: πιθανοτικές μέθοδοι simulation methods: μέθοδοι προσομοίωσης starting failure probability: πιθανότητα βλάβης λόγω επανεκκίνησης system minutes: λεπτά συστήματος *time to failure*: χρόνος βλάβης time to repair: χρόνος επισκευής

<u>Δίκτυα Petri</u>

abbreviations: συντμήσεις *arc*: τόξο autonomous continuous Petri nets: αυτόνομα συνεχή δίκτυα Petri color: γρώμα colored Petri nets: έγχρωμα δίκτυα Petri conflict: σύγκρουση continuous Petri nets: συνεχή δίκτυα Petri continuous place: συνεχής θέση continuous transition: συνεχής μετάβαση database arc: τόξο βάσης δεδομένων deterministic Petri nets: αιτιοκρατικά δίκτυα Petri enabled: σε ετοιμότητα event sequence: ακολουθία γεγονότων extended Petri nets: εκτεταμένα δίκτυα Petri extensions: επεκτάσεις finite capacity Petri nets: δίκτυα Petri περιορισμένης χωρητικότητας firing rule: κανόνας ενεργοποίησης fluid stochastic Petri nets: ρευστά στοχαστικά δίκτυα Petri flush out arc: τόξο εκροής generalized Petri nets: γενικευμένα δίκτυα Petri guard: προφύλαξη hybrid Petri nets: υβριδικά δίκτυα Petri *immediate transition*: άμεση μετάβαση inhibitor arc: τόξο παρεμπόδισης input place: θέση εισόδου input transition: μετάβαση εισόδου jump transition: μετάβαση άλματος

marking: σήμανση memorizing: απομνημόνευση ordinary Petri nets: συνήθη δίκτυα Petri output place: θέση εξόδου output transition: μετάβαση εξόδου parallelism: παραλληλία Petri nets: δίκτυα Petri *place*: θέση priority Petri nets: δίκτυα Petri προτεραιότητας sink transition: μετάβαση βύθισης source transition: $\mu\epsilon\tau\dot{\alpha}\beta\alpha\sigma\eta\pi\eta\gamma\dot{\eta}\zeta$ stochastic Petri nets: στοχαστικά δίκτυα Petri synchronization: συγχρονισμός t-timed Petri nets: t-χρονικά δίκτυα Petri test arc: τόξο ελέγχου timed continuous Petri nets: χρονικά συνεχή δίκτυα Petri timed Petri nets: χρονικά δίκτυα Petri timed transition: χρονική μετάβαση token: δείγμα transition: μετάβαση

Πολυαντικειμενική βελτιστοποίηση

crowding distance: πληθυσμιακή απόσταση cuboid: κυβοειδές domination: κυριαρχία diverse: διακριτός multiobjective optimization: πολυαντικειμενική βελτιστοποίηση non-dominated set: σύνολο μη κυριαρχουσών λύσεων non-dominated solutions: μη κυριαρχούσες λύσεις Pareto optimal set: σύνολο των Pareto βέλτιστων λύσεων single objective optimization: βελτιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης sorting: ταξινόμηση

Ανάλυση κύκλου ζωής

CO₂ equivalent: ισοδύναμο CO₂ emissions: εκπομπές goal definition: καθορισμός στόχου greenhouse gases: αέρια του θερμοκηπίου impact assessment: αποτίμηση επιπτώσεων improvement analysis: ανάλυση βελτίωσης inventory analysis: ανάλυση απογραφής life cycle analysis: ανάλυση κύκλου ζωής