



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ευφυής έλεγχος στη διαχείριση ενέργειας μικροδικτύου

Διπλωματική Εργασία

Χριστακόπουλος Σταύρος

Επιβλέπων: Σταμούλης Γεώργιος

Ιανουάριος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ευφυής έλεγχος στη διαχείριση ενέργειας μικροδικτύου

Διπλωματική Εργασία

Χριστακόπουλος Σταύρος

Επιβλέπων: Σταμούλης Γεώργιος

Ιανουάριος 2023



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Smart control in microgrid energy management

Diploma Thesis

Christakopoulos Stavros

Supervisor: Stamoulis Georgios

January 2023

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Σταμούλης Γεώργιος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Βόκας Γεώργιος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Μέλος

Περαντζάκης Γεώργιος

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ
ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Χριστακόπουλος Σταύρος

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Christakopoulos Stavros

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η πολυετής διαδρομή των σπουδών μου, στην σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, φτάνει στο τέλος της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Σταμούλη, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση, που μου παρείχε έως την ολοκλήρωσή της.

Όπως σε όλη την διάρκεια της ζωής μου, έτσι και κατά την συγγραφή αυτής της εργασίας η στήριξη από την οικογένεια μου και κυρίως τους γονείς μου, Ρόζα και Παναγιώτη, ήταν ζωτικής σημασίας και έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην υπέρβαση των δυσκολιών που συνάντησα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Τάσο, την Κωνσταντίνα και τους υπόλοιπους δικούς μου ανθρώπους, οι οποίοι με συντρόφευσαν στο ταξίδι μου και μου πρόσφεραν απλόχερα την αγάπη και την υποστήριξή τους. Ελπίζω να συνεχίσετε να βαδίζετε πλάι μου, όπως κάνατε μέχρι σήμερα.

Ευφυής έλεγχος στη διαχείριση ενέργειας μικροδικτύου

Χριστακόπουλος Σταύρος

Περίληψη

Η ραγδαία αύξηση της ενεργειακής ζήτησης, σε συνδυασμό με τον αρνητικό αντίκτυπο των συμβατικών καυσίμων στο περιβάλλον, έχουν δημιουργήσει ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα σε παγκόσμιο επίπεδο. Την λύση της έρχεται να δώσει η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα, το παραδοσιακό μοντέλο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αλλάζει, εξελίσσεται και αποκτά «έξυπνα» και αποκεντρωμένα χαρακτηριστικά. Το μικροδίκτυο ανήκει στην κατηγορία των έξυπνων δικτύων έχοντας τα δικά του μοναδικά χαρακτηριστικά, όπως η διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας σε μικρή κλίμακα με καλά ικανοποιητικά επίπεδα διείσδυσης «καθαρών» πηγών ενέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική διερευνάται η διαχείριση ενός μικροδικτύου που αποτελείται από ένα αιολικό πάρκο, ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, δύο συστοιχίες μπαταριών και μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Ο τρόπος που επιλέχθηκε είναι ο ευφυής έλεγχος. Μέσω του λογισμικού MATLAB και συγκεκριμένα του Fuzzy Logic Toolbox πραγματοποιείται η σχεδίαση δύο ελεγκτών, με στόχο την πρόβλεψη φορτίου συναρτήσει των καιρικών συνθηκών και την διαχείριση των ενεργειακών πόρων του μικροδικτύου.

Λέξεις-κλειδιά:

Μικροδίκτυο; ευφυής έλεγχος; ασαφής λογική; ασαφής ελεγκτής; MATLAB; Fuzzy Logic Toolbox; πρόβλεψη φορτίου; διαχείριση ενέργειας; διεσπαρμένη παραγωγή

Smart control in microgrid energy management

Christakopoulos Stavros

Abstract

Rapid increase of energy demand, coupled with the negative impact that conventional fuel has on the environment, have created a very serious problem around the globe. A solution to this issue is expected to be given by the integration of renewable energy sources in power systems. At the same time, the model of a traditional power system is changing, evolving and acquiring “intelligent” and distributed characteristics. A microgrid is a part to the smart grid category having its own unique characteristics, such as small-scale distributed production with satisfying levels of clean energy sources integration. In the current thesis, we are investigating the management of a microgrid that consists of a wind farm, a photovoltaic power station, a battery energy storage systems and combined heat and power units. The chosen method is intelligent control. Through the MATLAB software, and specifically through the Fuzzy Logic Toolbox, we create two controllers for the purpose of load forecasting and the microgrid’s energy sources management.

Keywords:

Microgrid; smart control; fuzzy logic; fuzzy controller; MATLAB; Fuzzy Logic Toolbox; Load forecasting; energy management; distributed generation

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες</i>	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvii</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων</i>	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	<i>xxiii</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>xxvii</i>
<i>Συνομογραφίες</i>	<i>xxix</i>
<i>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</i>	<i>31</i>
1.1 Το αντικείμενο της διπλωματικής.....	31
1.2 Οργάνωση του τόμου	32
<i>Κεφάλαιο 2 Διεσπαρμένοι Ενεργειακοί Πόροι</i>	<i>33</i>
2.1 Εισαγωγή.....	33
2.2 Βασικά χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής.....	34
2.3 Τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής.....	34
2.3.1 Ανεμογεννήτριες.....	35
2.3.2 Φωτοβολταϊκά	39
2.3.3 Κυψέλες καυσίμου	43
2.3.4 Υδροηλεκτρικά συστήματα.....	45
2.3.5 Γεωθερμία.....	46
2.4 Συστήματα αποθήκευσης.....	47
2.4.1 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες	48
2.4.1.1 Μπαταρίες μολύβδου οξέος (Lead-acid ή PbA).....	48
2.4.1.2 Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-Ion)	49
2.4.1.3 Μπαταρίες νατρίου-θείου (NaS)	49
<i>Κεφάλαιο 3 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας</i>	<i>51</i>
3.1 Εισαγωγή.....	51

3.2 Κεντρική παραγωγή ενέργειας.....	51
3.3 Ευφυή δίκτυα	54
3.4 Μικροδίκτυα	56
3.4.1 Κατηγορίες μικροδικτύων.....	57
3.4.2 Συστατικά στοιχεία ΕΗΔ - Μικροδικτύων	58
3.4.2.1 Απόκριση Ζήτησης	59
3.4.2.2 Ευφυής Έλεγχος	60
3.4.3 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις	61
Κεφάλαιο 4 Ευφυής έλεγχος και Ασαφής Λογική.....	63
4.1 Εισαγωγή στην ασαφή λογική.....	63
4.2 Βασικοί όροι.....	63
4.2.1 Ασαφή Σύνολα	63
4.2.2 Συναρτήσεις συμμετοχής.....	64
4.2.3 Ιδιότητες ασαφών συνόλων	67
4.2.4 Πράξεις με ασαφή σύνολα	67
4.3 Λεκτικοί τελεστές.....	69
4.4 Ασαφείς κανόνες και συνεπαγωγές.....	69
4.5 Αποασαφοποίηση (Defuzzification).....	71
4.6 Ασαφείς ελεγκτές	71
Κεφάλαιο 5 Σίφνος: Ανάλυση της υπό μελέτη περιοχής.....	73
5.1 Εισαγωγή.....	73
5.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	73
5.2.1 Ηλιακό δυναμικό	73
5.2.2 Αιολικό δυναμικό.....	75
5.3 Υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας	76
5.4 Ζήτηση ενέργειας.....	79
Κεφάλαιο 6 Το μοντέλο της προσομοίωσης	80
6.1 Εισαγωγή.....	80
6.2 Υλοποίηση ελεγκτή για την παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ	81
6.2.1 Μεταβλητές εισόδου	82

6.2.2 Μεταβλητές εξόδου.....	91
6.2.3 Διαμόρφωση συνόλου κανόνων 1 ^{ου} συστήματος ασαφούς συμπερασμού	93
6.2.4 Αποτελέσματα συστήματος ασαφούς συμπερασμού για τον 1 ^ο ελεγκτή	95
6.2.5 Παραδείγματα υπολογισμών μέσω συστήματος ασαφούς συμπερασμού του 1 ^{ου} ελεγκτή	97
6.3 Υλοποίηση ελεγκτή για την κάλυψη της ζήτησης φορτίου στο ΜΔ	99
6.3.1 Μεταβλητές εισόδου	99
6.3.2 Μεταβλητές εξόδου.....	102
6.3.3 Διαμόρφωση συνόλου κανόνων 2 ^{ου} συστήματος ασαφούς συμπερασμού	104
6.3.4 Παραδείγματα υπολογισμών μέσω συστήματος ασαφούς συμπερασμού του 2 ^{ου} ελεγκτή	106
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική ενασχόληση	109
Βιβλιογραφία.....	111

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1 Απεικόνιση διασύνδεσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής	33
Εικόνα 2.2: Τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής [3]	35
Εικόνα 2.3: Ανεμόμυλοι του οροπεδίου Λασιθίου στην Κρήτη [6]	36
Εικόνα 2.4: Μηχανικά μέρη και στοιχεία ελέγχου μιας Α/Γ οριζόντιου άξονα [5]	37
Εικόνα 2.5: Στάδια μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε μια τυπική Α/Γ [7]	37
Εικόνα 2.6: Τυπική καμπύλη παραγωγής ισχύος μιας Α/Γ σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου [5]	39
Εικόνα 2.7: Ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε συστήματα [9]	41
Εικόνα 2.8: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V ενός ΦΒ για διαφορετικές θερμοκρασίες [10]	41
Εικόνα 2.9: Γράφημα ετήσιας διακύμανσης λόγων επίδοσης ΦΒ [11]	42
Εικόνα 2.10: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V για διαφορετικές τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας [10]	43
Εικόνα 2.11: Σχηματικό διάγραμμα κυψελών καυσίμου τύπου PEMFC [12]	44
Εικόνα 2.12: Τυπική δομή μικρού υδροηλεκτρικού συστήματος [14]	45
Εικόνα 2.13: α) Γεωθερμικός σταθμός δυαδικού κύκλου β) Γεωθερμικός σταθμός ξηρού ατμού γ) Γεωθερμικός σταθμός υγρού ατμού [15]	46
Εικόνα 2.14: Τυπική ημερήσια καμπύλη προφίλ ισχύος για ΣΑΕ με μπαταρίες [16]	48
Εικόνα 3.1 : Γεωγραφική κατανομή σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [19]	52
Εικόνα 3.2: Εξάπλωση κοιτασμάτων λιγνίτη στην Ελλάδα [19]	53
Εικόνα 3.3: Σχηματική απεικόνιση τυπικής δομής του ελληνικού ΣΗΕ [20]	54
Εικόνα 3.4: Τυπική δομή ευφυούς δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας [22]	55
Εικόνα 3.5: Απλουστευμένο διάγραμμα δομής ενός ΜΔ [24]	56
Εικόνα 3.6: Τρόποι κατηγοριοποίησης μικροδικτύων [25]	57
Εικόνα 3.7: Κατηγορίες βασικών τεχνολογιών ΕΗΔ [21]	59
Εικόνα 4.1: Γραφική παράσταση τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής [29]	65
Εικόνα 4.2: Γραφική παράσταση τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής [29]	65
Εικόνα 4.3 Γραφική παράσταση γκαουσιανής συνάρτησης συμμετοχής [29]	66

Εικόνα 4.4: Γραφική παράσταση σιγμοειδούς συνάρτησης συμμετοχής [29].....	66
Εικόνα 4.5: Γραφικές αναπαραστάσεις της ένωσης (a), τομής (b) και συμπληρώματος (c)	68
Εικόνα 4.6 Τυπική δομή ενός ασαφούς ασαφή ελεγκτή [31].....	72
Εικόνα 5.1: Χάρτης της Σίφνου [32]	73
Εικόνα 5.2: Χάρτης της μέσης ημερήσιας και μέσης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα(Global Horizontal Irradiance) [33] [34]	74
Εικόνα 5.3: Χάρτης αιολικού δυναμικού της Ελλάδας [34]	75
Εικόνα 5.4 Χάρτης αιολικού δυναμικού Σίφνου [35].....	76
Εικόνα 5.5: Λειτουργική δομή υβριδικού σταθμού Σίφνου εγγυημένης ισχύος 8 MW [11]	77
Εικόνα 5.6: Συνολική ημερήσια ζήτηση φορτίου στο νησί της Σίφνου για το έτος 2021 [20]	79
Εικόνα 6.1: Αρχική οθόνη Fuzzy Logic Toolbox στο λογισμικό MATLAB	81
Εικόνα 6.2: Μέσες ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (Solar Irradiance) για το έτος 2020 [38].....	82
Εικόνα 6.3: Είσοδος 1 ^{ου} ελεγκτή: Ηλιακή ακτινοβολία (Solar radiation).....	83
Εικόνα 6.4: Μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας στην Σίφνο για το έτος 2020 [38]	84
Εικόνα 6.5: Είσοδος 1 ^{ου} ελεγκτή: Θερμοκρασία κελιού (Cell temperature)	85
Εικόνα 6.6: Μέσες ωριαίες τιμές ταχύτητας ανέμου σε ύψος 10 μέτρων για το 2020 [38]	86
Εικόνα 6.7: Είσοδος 1 ^{ου} ελεγκτή: ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 μέτρων.....	86
Εικόνα 6.8: Χαρακτηριστική καμπύλη P-V μονοκρυσταλλικού ΦΒ πάνελ για διαφορετικές συνθήκες σκίασης [41]	87
Εικόνα 6.9: Είσοδος 1 ^{ου} ελεγκτή: Σκίαση	88
Εικόνα 6.10: Καμπύλη ισχύος A/Γ	88
Εικόνα 6.11: Μέσες ωριαίες τιμές ταχύτητας ανέμου σε ύψος 10 μέτρων για το έτος 2020	89
Εικόνα 6.12: Είσοδος 1 ^{ου} ελεγκτή: Ταχύτητα ανέμου σε ύψος 50m	90
Εικόνα 6.13: Διάγραμμα εξάρτησης συντελεστή ισχύος ανεμογεννήτριας από την ταχύτητα στην αιχμή του πτερυγίου και την γωνία του πτερυγίου [43]	90
Εικόνα 6.14: Είσοδος 1 ^{ου} ελεγκτή: Γωνία πτερυγίου	91

Εικόνα 6.15: Έξοδος 1 ^{ου} ελεγκτή: Παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά	92
Εικόνα 6.16: Έξοδος 1 ^{ου} ελεγκτή: Παραγωγή ενέργειας από Α/Γ	93
Εικόνα 6.17: Rule Editor συστήματος ασαφούς συμπερασμού (FIS)	93
Εικόνα 6.18: Βάση κανόνων ασαφούς λογικής 1 ^{ου} ελεγκτή (1-24).....	94
Εικόνα 6.19: Βάση κανόνων ασαφούς λογικής 1 ^{ου} ελεγκτή (25-48).....	94
Εικόνα 6.20: Βάση κανόνων ασαφούς λογικής 1 ^{ου} ελεγκτή (49-72).....	94
Εικόνα 6.21: Βάση κανόνων ασαφούς λογικής 1 ^{ου} ελεγκτή (73-92).....	95
Εικόνα 6.22: Απεικόνιση αποτελεσμάτων της εξόδου «Solar energy production» στον Surface Viewer	95
Εικόνα 6.23: Απεικόνιση αποτελεσμάτων της εξόδου «Wind turbine energy production» στον Surface Viewer	96
Εικόνα 6.24: Απεικόνιση των τιμών των μεταβλητών του συστήματος στον Rule Viewer	97
Εικόνα 6.25: Είσοδος 2 ^{ου} ελεγκτή: Παραγωγή ενέργειας από ΦΒ	99
Εικόνα 6.26: Είσοδος 2 ^{ου} ελεγκτή: Παραγωγή ενέργειας Α/Γ.....	100
Εικόνα 6.27: Γράφημα ωριαίας ζήτησης ενέργειας 15/01/2020 στην Σίφνο.....	101
Εικόνα 6.28: Γράφημα ωριαίας ζήτησης ενέργειας 1/08/2020 στην Σίφνο.....	101
Εικόνα 6.29: Είσοδος 2 ^{ου} ελεγκτή: Ζήτηση φορτίου	102
Εικόνα 6.30: Έξοδος 2 ^{ου} ελεγκτή: Διείσδυση συστήματος μπαταριών	103
Εικόνα 6.31: Έξοδος 2 ^{ου} ελεγκτή: Κάλυψη φορτίου από μονάδες ΣΗΘ	104
Εικόνα 6.32: Βάση κανόνων ασαφούς λογικής 2 ^{ου} ελεγκτή (1-24).....	105
Εικόνα 6.33: Βάση κανόνων ασαφούς λογικής 2 ^{ου} ελεγκτή (25-48).....	105
Εικόνα 6.34: Βάση κανόνων ασαφούς λογικής 2 ^{ου} ελεγκτή (49-61).....	106
Εικόνα 6.35: Απεικόνιση αποτελεσμάτων της εξόδου «Κάλυψη φορτίου από ΣΗΘ» στον Surface Viewer	106
Εικόνα 6.36: Αποτελέσματα του συστήματος ασαφούς συμπερασμού παραδείγματος 1	108
Εικόνα 6.37: Αποτελέσματα του συστήματος ασαφούς συμπερασμού παραδείγματος 2	108

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά τυπικών τεχνολογιών ΣΑΕ με μπαταρίες [16].....	50
Πίνακας 5.1 Ηλεκτρικά συστήματα ΜΔΝ [20]	78
Πίνακας 6.1: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής για την ηλιακή ακτινοβολία	83
Πίνακας 6.2: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής για την θερμοκρασία κελιού	84
Πίνακας 6.3: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής της ταχύτητας ανέμου σε ύψος 10 m .	86
Πίνακας 6.4: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής για την σκίαση	87
Πίνακας 6.5: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 50 m.	89
Πίνακας 6.6: Διαμόρφωση επιπέδων συναρτήσεων συμμετοχής για το βήμα πτερυγίου	91
Πίνακας 6.7: Διαμόρφωση επιπέδων συναρτήσεων συμμετοχής για την παραγωγή ενέργειας των ΦΒ.....	92
Πίνακας 6.8: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής παραγωγής ενέργειας στις Α/Γ	92
Πίνακας 6.9: Παράδειγμα υπολογισμού παραγόμενης ενέργειας στον 1 ^ο ελεγκτή	97
Πίνακας 6.10: Παράδειγμα υπολογισμού παραγόμενης ενέργειας στον 1 ^ο ελεγκτή	98
Πίνακας 6.11: : Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής ζήτησης ενέργειας	102
Πίνακας 6.12: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής ενέργειας συσσωρευτών.....	103
Πίνακας 6.13	104
Πίνακας 6.14: Παράδειγμα 1, διαχείρισης φορτίου από τον 2 ^ο ελεγκτή	107
Πίνακας 6.15: Παράδειγμα 2, διαχείρισης φορτίου από τον 2 ^ο ελεγκτή	107

Συντομογραφίες

ΔΕΠ	Διεσπαρμένοι Ενεργειακοί Πόροι
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
ΣΑΕ	Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΗΘ	Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας
ΥΤ	Υψηλή Τάση
ΜΤ	Μέση Τάση
ΧΤ	Χαμηλή Τάση
DC	Direct Current / Συνεχές Ρεύμα
AC	Alternating Current / Εναλλασσόμενο Ρεύμα
MPPT	Maximum Power Point Tracking / Εντοπισμός Σημείου Μέγιστης Ισχύος
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell / Κυψέλη Καυσίμου Εναλλαγής Μεμβράνης Πρωτονίων
ΥΗΕ	Υδροηλεκτρικό Έργο
ΜΥΗΕ	Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο
Α/Γ	Ανεμογεννήτρια
ΦΒ	Φωτοβολταϊκό
ΜΔ	Μικροδίκτυο
BESS	Battery Energy Storage System / Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας με Μπαταρίες
FESS	Flywheel Energy Storage System / Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας με Σφονδύλους
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage / Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας με Υπεραγώγιμα Πηνία
H ₂ ESS	Hydrogen Energy Storage Systems / Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας με υδρογόνο
ΕΗΔ	Ευφυή Ηλεκτρικά Δίκτυα

PCC	Point of Common Coupling / Σημείο Κοινής Σύνδεσης
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers / Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
GHI	Global Horizontal Irradiance / Συνολική Ηλιακή Ακτινοβολία προσπίπτουσα σε οριζόντια επιφάνεια
DHI	Diffuse Horizontal Irradiance / Διάχυτη Ηλιακή Ακτινοβολία
DNI	Direct Horizontal Irradiance / Άμεση Ηλιακή Ακτινοβολία
ΜΔΝ	Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά
ΡΑΕ	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι και αιτία της προόδου και της διευκόλυνσης της καθημερινότητας δισεκατομμυρίων ανθρώπων ανά τον πλανήτη. Συνεπώς με την αύξηση πληθυσμού δημιουργείται η ανάγκη, όχι μόνο για παραγωγή μεγαλύτερων επιπέδων ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και για την αποτελεσματικότερη διαχείριση των ήδη διαθέσιμων ενεργειακών πόρων. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με το διαρκές και συνεχώς αυξανόμενο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής, επιτάσσουν αλλαγές στο ενεργειακό μοντέλο και στροφή σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας, φιλικότερες προς το περιβάλλον. Ήδη η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει φιλόδοξους στόχους όσον αφορά τους ενεργειακούς και περιβαλλοντικούς της στόχους. Ειδικότερα γίνεται προσπάθεια για μείωση των επιπέδων των αερίων του θερμοκηπίου κατά 50% σε σχέση με τα επίπεδα της δεκαετίας του '90, μέχρι το 2030. Αυτή η ενεργειακή μετάβαση δίνει την ευκαιρία στην ενσωμάτωση διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων και την αλλαγή του παραδοσιακού καταναλωτή σε ένα περισσότερο ενεργό στοιχείο του δικτύου [1]. Η χρήση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας θα έχει μεγάλο αντίκτυπο στον ενεργειακό χάρτη της Ευρώπης και η χώρα μας δεν αποτελεί εξαίρεση. Το μοντέλο παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, περιλαμβάνει το κεντρικό δίκτυο διανομής από το οποίο τροφοδοτείται η ηπειρωτική χώρα και μεγάλο μέρος των πολυάριθμων νησιών της. Ωστόσο υπάρχουν μέχρι και σήμερα κομμάτια του πληθυσμού σε απομακρυσμένες περιοχές από το κεντρικό δίκτυο, όπως είναι τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά. Σύγχρονες έννοιες όπως η διεσπαρμένη παραγωγή, τα ευφυή ηλεκτρικά δίκτυα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα μικροδίκτυα υπόσχονται να δώσουν ενεργειακά «καθαρή» λύση στο ενεργειακό πρόβλημα τόσο στον κεντρικό κορμό του δικτύου ενέργειας όσο και στους πιο απομακρυσμένους κλάδους του.

1.1 Το αντικείμενο της διπλωματικής

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι ο σχεδιασμός ενός συστήματος πρόβλεψης της παραγόμενης ενέργειας και διαχείρισης των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων σε ένα μικροδίκτυο, που έχει ως βάση το αυτόνομο δίκτυο της Σίφνου. Αυτό θα συμβεί με τον

σχεδιασμό δύο ελεγκτών που λειτουργούν με συστήματα ασαφούς συμπερασμού μέσω του λογισμικού MATLAB. Συγκεκριμένα, στο περιβάλλον του Fuzzy Logic Toolbox, θα σχεδιαστεί ένας ελεγκτής, ο οποίος θα εξάγει συμπεράσματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του μικροδικτύου βάσει των μετεωρολογικών δεδομένων της Σίφνου για το έτος 2020. Έπειτα πραγματοποιείται η σχεδίαση ενός δεύτερου ελεγκτή ο οποίος στόχο έχει την διαχείριση της κάλυψης φορτίου λαμβάνοντας υπόψιν τους διαθέσιμων ενεργειακών επιπέδων των πόρων του μικροδικτύου, βάσει των στοιχείων ζήτησης του νησιού για το έτος 2020.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Η διάρθρωση της παρούσας διπλωματικής είναι η εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της διεσπαρμένης παραγωγής και στις διάφορες κατηγορίες διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων, συμπεριλαμβάνοντας τεχνολογίες παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας.

Το Κεφάλαιο 3 αναφέρεται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Γίνεται μια περιγραφή του συστήματος ενέργειας στην Ελλάδα, των παραδοσιακών μεθόδων παραγωγής και περιγράφονται έννοιες και χαρακτηριστικά των Ευφυών Ηλεκτρικών Δικτύων και των Μικροδικτύων.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται ανάλυση της έννοιας της ασαφούς λογικής παραθέτοντας απλές μαθηματικές έννοιες. Στην συνέχεια αναλύεται το κομμάτι του ευφυούς ελέγχου βάσει των συστημάτων ασαφούς συμπερασμού, ώστε να γίνει κατανοητή η μέθοδος σχεδίασης των ελεγκτών της παρούσας εργασίας.

Το Κεφάλαιο 5 είναι μια περιγραφή της περιοχής της Σίφνου. Παρουσιάζονται τα γεωγραφικά στοιχεία του νησιού, τα επίπεδα του αιολικού και ηλιακού δυναμικού και το υφιστάμενο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

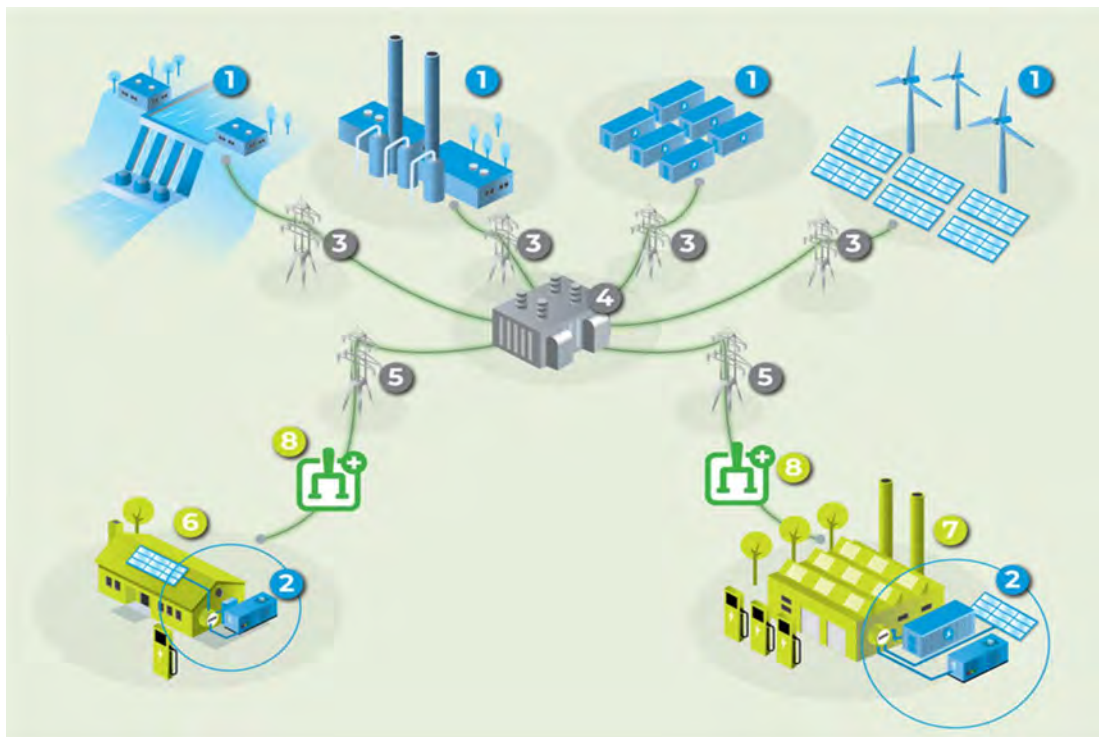
Το Κεφάλαιο 6 γίνεται ο σχεδιασμός των ελεγκτών ασαφούς λογικής και εξάγονται συμπεράσματα για την συμπεριφορά τους βάσει των μετεωρολογικών δεδομένων, των επίπεδα ενεργειακής ζήτησης και των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής μελλοντικές προτάσεις.

Κεφάλαιο 2 Διεσπαρμένοι Ενεργειακοί Πόροι

2.1 Εισαγωγή

Η αυξανόμενη διασύνδεση πηγών πιο κοντά στα σημεία κατανάλωσης επηρεάζει την παραδοσιακή λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Η αναδιάρθρωση των ΣΗΕ και η ανάπτυξη τεχνολογιών, που αφορούν την δημιουργία σχετικά μικρών σε ισχύ μονάδων, οδήγησε στην ανάπτυξη της έννοιας της διεσπαρμένης παραγωγής, η οποία τοποθετεί τις μονάδες παραγωγής πλησιέστερα στα κέντρα κατανάλωσης. Για την διεσπαρμένη παραγωγή έχουν δοθεί αρκετοί παραπλήσιοι ορισμοί αλλά και αρκετές ταυτόσημες ορολογίες όπως «Κατακεντρωμένη Παραγωγή» ή Αποκεντρωμένη Παραγωγή. Ένας καλός ορισμός είναι εκείνος που ορίζει ως διεσπαρμένη παραγωγή την «παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες παραγωγής σημαντικά μικρότερες σε ισχύ από τις μονάδες εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να είναι εφικτή η σύνδεσή τους σχεδόν σε κάθε σημείο ενός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας» [2].



Εικόνα 2.1 Απεικόνιση διασύνδεσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

2.2 Βασικά χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής

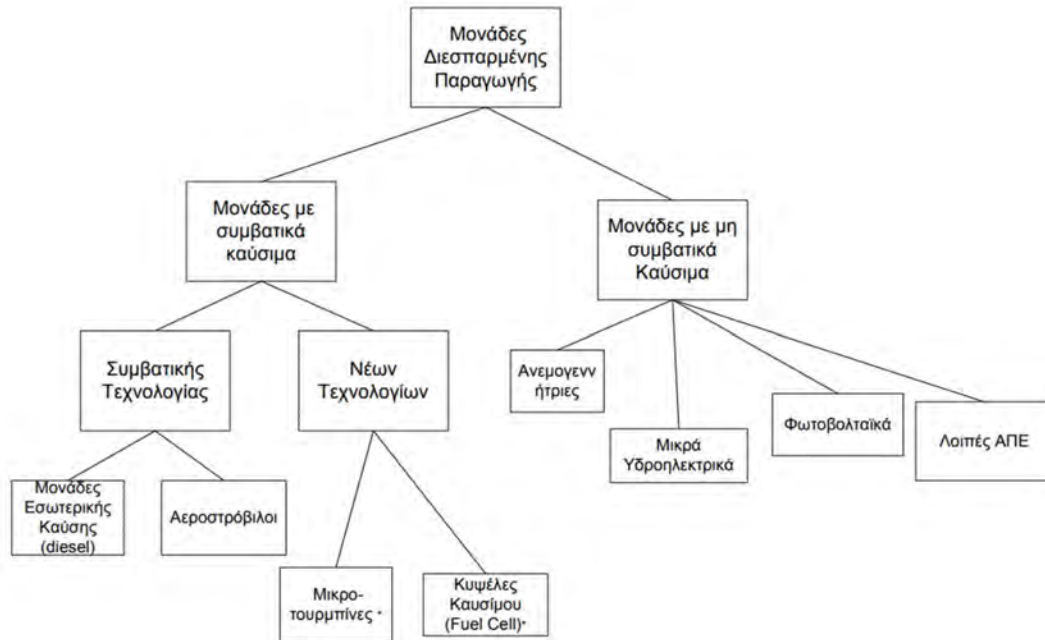
Η εγκατάσταση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος ανά τον κόσμο, με μερικές χώρες όπως η Δανία, να έχουν μεγάλο ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος τους με την μορφή αιολικών πάρκων και μονάδων Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ). Οι διεσπαρμένοι ενεργειακοί πόροι συνδέονται στα δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) και Μέσης Τάσης (ΜΤ) παρέχοντας επικουρικές υπηρεσίες σε περιπτώσεις όπως η απόκριση φορτίου σε ώρες αιχμής. Τα βασικά χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω σημεία [3].

- Δεν είναι κεντρικά σχεδιαζόμενη και δεν αναπτύσσεται από μια συγκεκριμένη εταιρεία ηλεκτρισμού ή διαχειριστή του δικτύου.
- Δεν επιβάλλεται κάποιος κεντρικός προγραμματισμός λειτουργίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής από τον διαχειριστή του συστήματος.
- Η ισχύς των μονάδων που εγκαθίστανται δεν ξεπερνά τα 50-100MW. Συνήθως αναφερόμαστε σε μονάδες παραγωγής μερικών εκατοντάδων kW.
- Η σύνδεση της κάθε μονάδας παραγωγής με το κεντρικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλογα με τις προδιαγραφές που ορίζονται για το κάθε υπό μελέτη σύστημα.

2.3 Τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής

Υπάρχουν διαφορετικές κατηγοριοποιήσεις των τεχνολογιών ΔΠ βάσει διαφόρων κριτηρίων και χαρακτηριστικών τους. Ένας τέτοιος τρόπος θα μπορούσε να είναι ο διαχωρισμός του σε δύο μεγάλες τεχνολογικές κατηγορίες: τις μονάδες απευθείας σύζευξης (Direct Coupled) και τις μονάδες σύζευξης μέσω αντιστροφέα (Inverted Coupled technology). Μονάδες στατικής μετατροπής ενέργειας όπως είναι οι κυψέλες καυσίμων και τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούν παραδείγματα η σύζευξη των οποίων γίνεται μέσω αντιστροφέα. Ενώ μονάδες περιστροφικής μετατροπής της ενέργειας (Rotational Energy Conversion) όπως οι ανεμογεννήτριες ανήκουν στην κατηγορία τεχνολογιών άμεσης σύζευξης [4]. Οι βασικότερες τεχνολογίες των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής δίνονται συνοπτικά στο διάγραμμα της εικόνας 2.2. Στο διάγραμμα διακρίνουμε πως υπάρχουν δύο μεγάλες ομάδες, εκείνες που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα και εκείνες που χρησιμοποιούν ανανεώσιμα καύσιμα όπως είναι η αιολική ενέργεια. Στην

συνέχεια του κεφαλαίου θα αναλυθούν οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες ΔΠ και θα δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα.



Εικόνα 2.2: Τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής [3]

2.3.1 Ανεμογεννήτριες

Η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες. Η ανησυχία για τα μεγάλα ποσοστά εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, την κλιματική αλλαγή και την αστάθεια των τιμών των ορυκτών καυσίμων καθιστά την ενσωμάτωση αιολικών μονάδων παραγωγής ενέργειας πιο ελκυστική από ποτέ. Ο άνεμος είναι μια ανανεώσιμη, ακόρεστη και καθαρή πηγή ενέργειας, χαρακτηριστικά που τον καθιστούν ιδανικό για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μια χώρας [5]. Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) είναι κατασκευές που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική σε δύο στάδια. Πρώτα μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια και στην συνέχεια η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας στο πρώτο στάδιο μετατροπής μπορεί να γίνει και με άλλους τρόπους εκτός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ευρέως διαδεδομένη τα τελευταία εκατό χρόνια ήταν η χρήση ανεμόμυλων για την άντληση νερού και την κάλυψη γεωργικών και κτηνοτροφικών αναγκών. Χαρακτηριστικό

παράδειγμα μια τέτοιας χρήσης για την χώρα μας αποτελούν οι περίφημοι ανεμόμυλοι στο Οροπέδιο Λασιθίου, οι οποίοι βρίσκονται στην θέση τους ακόμα και σήμερα, χωρίς ωστόσο να βρίσκονται σε πλήρη λειτουργική κατάσταση.



Εικόνα 2.3: Ανεμόμυλοι του οροπεδίου Λασιθίου στην Κρήτη [6]

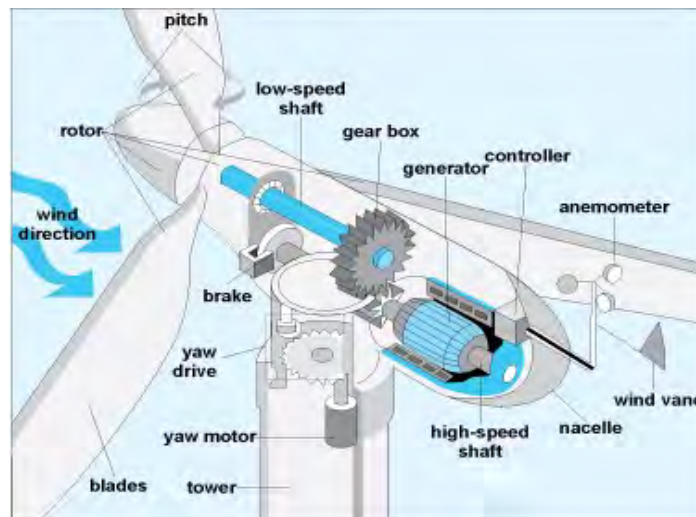
Ανά τα χρόνια δημιουργήθηκαν πολλές μονάδες μετατροπής της αιολικής ενέργειας, με τις περισσότερες να αντιστοιχίζονται στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κάθετου άξονα και τις Α/Γ σταθερής ταχύτητας (fixed speed) και μεταβλητής ταχύτητας (variable speed). Ανάμεσα σε αυτές, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων αποτελούν την πιο διαδεδομένη λύση μεγάλων παραγωγών αιολικής ενέργειας. Η ταχύτητα περιστροφής μιας τέτοιας Α/Γ είναι συνήθως στις 20-50 στροφές ανά λεπτό (rpm), η οποία πρέπει να πολλαπλασιαστεί με μηχανικά μέσα μέχρι να φτάσουν τις 1000-3000 rpm, ώστε να καλυφθούν οι προδιαγραφές μιας γεννήτριας ηλεκτρικού ρεύματος [5].

Τα κύρια στοιχεία μιας ανεμογεννήτριας φαίνονται στην εικόνα 2.4 και είναι τα εξής:

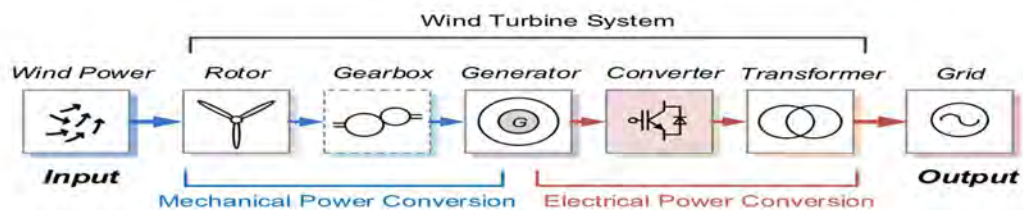
- Ο δρομέας (rotor): Στον δρομέα περιλαμβάνονται η πλήμνη (hub) πάνω στην οποία είναι προσαρτημένα τα πτερύγια (blades) και το σύστημα καθορισμού της κλίσης

των πτερυγίων (pitch blade step). Όπως θα αναφερθεί στην συνέχεια η γωνία κλίσης των πτερυγίων είναι σημαντικός παράγοντας στην παραγωγή ενέργειας μια Α/Γ. Η πλήμνη συνδέεται με τον άξονα χαμηλών στροφών (low-speed shaft), ο οποίος σε συνδυασμό με τον άξονα υψηλών στροφών (high speed shaft) και το κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox) αποτελούν το σύστημα μετάδοσης κίνησης.

- Η άτρακτος ή θάλαμος (nacelle): Η άτρακτος είναι το στοιχείο το οποίο στεγάζει μέρη του συστήματος κίνησης όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, το σύστημα πέδησης (brake) και τον πίνακα ελέγχου στον οποίο βρίσκονται όλες οι διατάξεις αυτοματισμών για την βέλτιστη λειτουργία της Α/Γ.
- Ο πυλώνας (tower)
- Βοηθητικά συστήματα μέτρησης και ελέγχου: Σημαντική είναι και η ύπαρξη μετρητικών εργαλείων όπως ο ανεμοδείκτης (διεύθυνση ανέμου) και το ανεμόμετρο (ταχύτητα ανέμου) και το σύστημα προσανατολισμού. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τον μηχανισμό περιστροφής του θαλάμου (yaw drive) και από έναν κινητήρα μέσω του οποίου αυτό επιτυγχάνεται (yaw motor).



Εικόνα 2.4: Μηχανικά μέρη και στοιχεία ελέγχου μιας Α/Γ οριζόντιου άξονα [5]



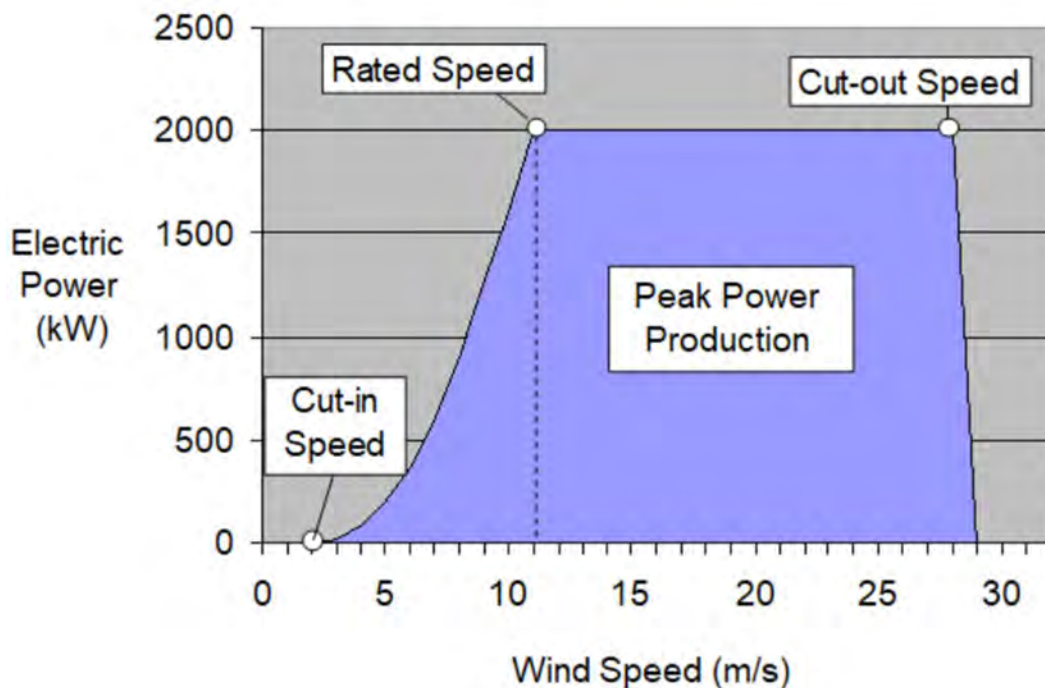
Εικόνα 2.5: Στάδια μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε μια τυπική Α/Γ [7]

Όπως προαναφέρθηκε οι Α/Γ είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια περιστροφής του ρότορα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια γεννήτρια εγκατεστημένη στην άτρακτο. Η μαθηματική σχέση που περιγράφει το ενεργειακό δυναμικό του ανέμου είναι η εξής:

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (2.1)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του ανέμου, A ή επιφάνεια την οποία διαπερνά ο άνεμος, V_w είναι η ταχύτητα του ανέμου και C_p ο συντελεστής που αφορά το ποσοστό αιολικής ενέργειας που μπορεί να εκμεταλλευτεί μια ανεμογεννήτρια. Από την σχέση 2.1 αντιλαμβανόμαστε πως η αιολική ενέργεια είναι άμεσα εξαρτημένη από την επιφάνεια της Α/Γ που διαπερνάται από αέρα ή πιο απλά από το τετράγωνο της ακτίνας του ρότορα. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο το μήκος των πτερυγίων των Α/Γ αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Σημαντικό είναι επίσης να σημειωθεί ότι η παραγόμενη ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου, οπότε η εκμετάλλευση ακόμα και μικρών ταχυτήτων κρίνεται επαρκής [5].

Εξαιτίας της επιρροής του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου της σχέσης 2.1 στην μετατροπή ενέργειας, τα διάφορα επίπεδα αυτής παράγουν μηχανική ενέργεια στον ρότορα πολλαπλάσια της χωρητικότητας και των προδιαγραφών μιας τυπικής Α/Γ. Για την αποφυγή φθορών της μονάδας, οι μοντέρνες Α/Γ έχουν συστήματα ελέγχου που αλλάζουν την γωνία του πτερυγίου (pitch blade step) ή και αποκόπτουν εντελώς την παραγωγή, σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών ανέμων ικανών να προκαλέσουν φθορές στα μηχανικά μέρη το συστήματος. Στην εικόνα 2.6 βλέπουμε την καμπύλη ισχύος μιας τυπικής ανεμογεννήτριας. Παρατηρούμε πως η Α/Γ παράγει ενέργεια για τιμές ταχύτητας του ανέμου, ανάμεσα στην ελάχιστη ταχύτητα λειτουργίας (cut-in speed) και την ονομαστική ταχύτητα (rated speed) ακολουθώντας την καμπύλη της σχέσης 2.3. Για ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής και μικρότερες της ταχύτητας αποκοπής (cut-out speed) η μονάδα παράγει σταθερά την ονομαστική της ισχύ. Όταν ταχύτητα του ανέμου αποκτήσει τιμή ίση με την τιμή της ταχύτητας αποκοπής η μονάδα τίθεται εκτός λειτουργίας για να προστατευθεί από φθορές, καθώς διαφορετικά θα λειτουργούσε εκτός των προδιαγραφών σχεδιασμού της. Στην εικόνα 2.6 βλέπουμε ένα παράδειγμα της καμπύλης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 2.6: Τυπική καμπύλη παραγωγής ισχύος μιας Α/Γ σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου [5]

2.3.2 Φωτοβολταϊκά

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας θεωρείται ένα από τα δημοφιλέστερα πεδία στην αγορά ενέργειας, λόγω των ταχύτατων ρυθμών ανάπτυξης φωτοβολταϊκών τεχνολογιών και των μεγάλων επενδυτικών κεφαλαίων που αφιερώνονται σε αυτές. Το 1839 ο Γάλλος φυσικός Alexandre-Edmund Becquerel, παρατήρησε την δημιουργία ηλεκτρικής τάσης κατά την διάρκεια ενός πειράματος του περιλάμβανε δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια τοποθετημένα σε αγώγιμο διάλυμα. Η παραγωγή ηλεκτρισμού αυξανόταν με την έκθεση του πειράματος στο φως. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε φωτοβολταϊκό (ΦΒ) φαινόμενο και αποτελεί την ραχοκοκαλιά της τεχνολογίας των ηλιακών κυττάρων-κυψελών. Από τότε και μέχρι το 1950 έγιναν αρκετά πειράματα για την αξιοποίηση αυτού του φαινομένου. Ωστόσο είχαν απογοητευτικά αποτελέσματα όσον αφορά την απόδοση τους η οποία κυμαινόταν σε ποσοστά γύρω στο 1-2%. Παρόλα αυτά στις αρχές του 1950 αναπτύχθηκε η μέθοδος Czochraski για την δημιουργία κρυστάλλων σιλικόνης. Με την χρήση των κρυστάλλων

σιλικόνης για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων , δημιουργήθηκαν κελιά των οποίων η απόδοση έφτανε το 11% [8].

Η μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό κατά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο συμβαίνει στις φωτοβολταϊκές κυψέλες, οι οποίες κατασκευάζονται από ημιαγωγικά υλικά και μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων σε ηλεκτρισμό. Μια φωτοβολταϊκή κυψέλη είναι στην ουσία ένα διόδιο p-n, που λειτουργεί σύμφωνα με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και στο οποίο δημιουργείται σταθερή τάση με την πρόσπτωση ηλιακού φωτός. Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ηλιακού κελιού είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}), η τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) και ο συντελεστής πλήρωσης (fill factor). Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει την σχέση μεταξύ των τριών αυτών χαρακτηριστικών είναι η εξής [8]:

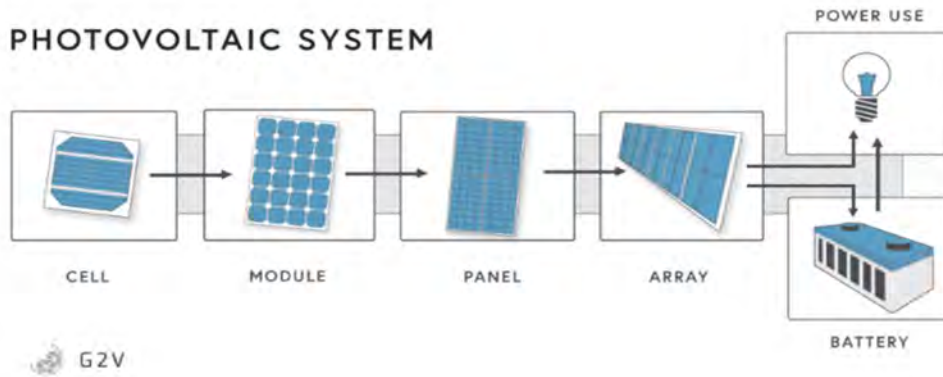
$$Fill\ Factor = I_m V_m / I_{sc} V_{oc} \quad (2.2)$$

Υπάρχουν μεγάλες κατηγορίες ηλιακών κελιών, ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτά και τον τρόπο κατασκευής τους:

- Ηλιακά κελιά πρώτης γενιάς: Πρόκειται για τα ηλιακά κελιά τα οποία είναι βασισμένα σε κρυστάλλους πυριτίου. Αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τύπο στην παγκόσμια αγορά και χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες τα μονοκρυσταλλικά (single crystalline solar cells) και τα πολυκρυσταλλικά (Polycrystalline solar cells). Το 80% της αγοράς φωτοβολταϊκών καταλαμβάνει η τεχνολογία μονοκρυσταλλικών κελιών.
- Ηλιακά κελιά δεύτερης γενιάς: Η χρήση πλακιδίων κρυστάλλων σιλικόνης για την κατασκευή κυψελών είναι κοστοβόρα. Το κόστος αυτό μπορεί να μειωθεί εάν τοποθετηθούν λεπτές μεμβράνες πυριτίου (Si) πάχους ενός χιλιοστού.
- Ηλιακά κελιά τρίτης γενιάς: Η έρευνα όσον αφορά αυτήν την κατηγορία κελιών στρέφεται σε ανόργανους-οργανικούς ημιαγωγούς. Στην τρίτη γενιά ηλιακών κυψελών, μεταξύ άλλων, ανήκουν τα κελιά κβαντικής κουκίδας (Quantum Dot solar cells) και τα οργανικά ηλιακά κελιά (Organic solar sells) [8].

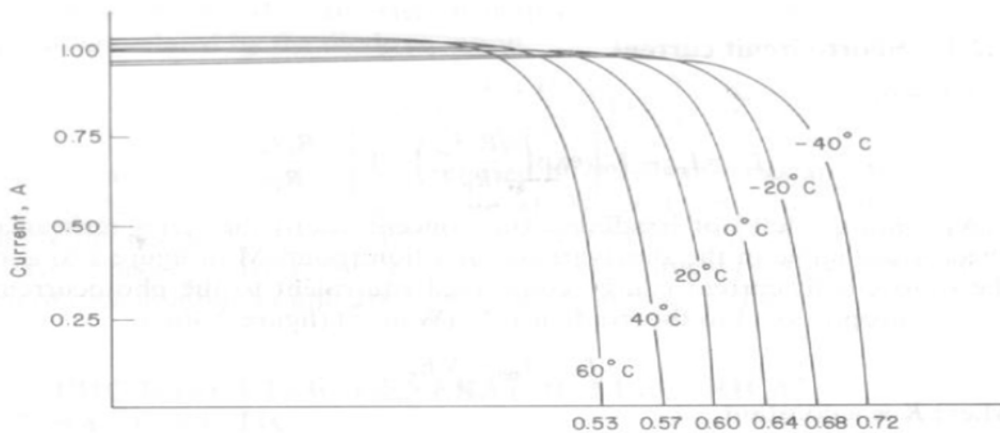
Επειδή η ενέργεια που παράγεται από ένα ηλιακό κελί, λόγω του περιορισμένου μεγέθους του, είναι σχετικά μικρή, συνδέουμε έναν αριθμό ηλιακών κελιών μεταξύ τους, σε σειρά είτε παράλληλα, και σχηματίζουμε ένα ΦΒ πλαίσιο (PV module). Ο συνδυασμός πολλών ΦΒ πλαισίων οδηγεί στην δημιουργία ενός ΦΒ πάνελ (PV panel). Η σύνδεση φωτοβολταϊκών πάνελ δημιουργεί μια φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array) μέσω τις

οποίας επιτυγχάνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγαλύτερη κλίμακα στα ΦΒ συστήματα.



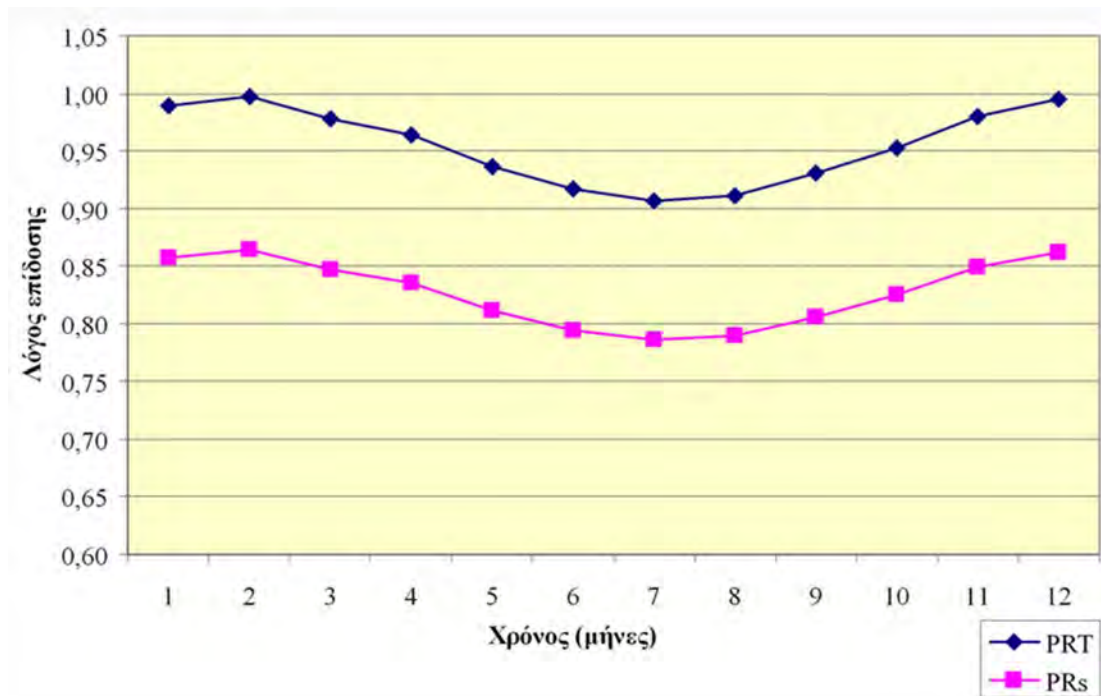
Εικόνα 2.7: Ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε συστήματα [9]

Ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των ΦΒ στοιχείων, πέραν των κατασκευαστικών του περιορισμών, δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε την θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμοκρασία ενός στοιχείου έχει άμεση επίδραση στην μετατροπή ενέργειας σε ένα ΦΒ στοιχείο. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της παραγωγής ισχύος στο πλαίσιο. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην μείωση της τάσης V_{oc} και συνεπώς της τάσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP).



Εικόνα 2.8: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V ενός ΦΒ για διαφορετικές θερμοκρασίες [10]

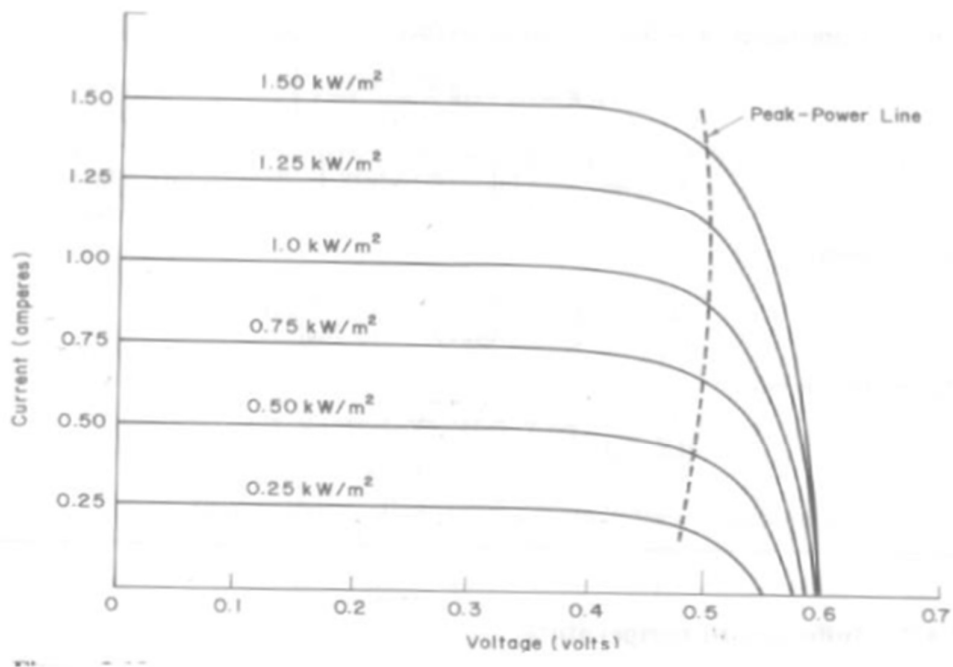
Στο διάγραμμα της εικόνας 2.8 παρατηρούμε, ότι για αυξήσεις της θερμοκρασίας, το σημείο μέγιστης ισχύος μετατοπίζεται αριστερά λόγω της μείωσης της τάσης [10]. Σε συνδυασμό με το διάγραμμα της εικόνας 2.9, όπου βλέπουμε μια πτώση των λόγων επίδοσης των ΦΒ τους καλοκαιρινούς μήνες, αντιλαμβανόμαστε πως η απόδοση ενός ΦΒ στοιχείου μειώνεται όταν η θερμοκρασία του πλαισίου ξεπερνά την θερμοκρασία πρότυπης λειτουργίας που είναι οι 25°C [11].



Εικόνα 2.9: Γράφημα ετήσιας διακύμανσης λόγων επίδοσης ΦΒ [11]

Σημαντικότερος παράγοντας για την παραγωγή ενέργειας σε ένα ΦΒ στοιχείο είναι φυσικά η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 . Η τιμή της παραγόμενης ισχύος είναι ανάλογη της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, οπότε όσο μεγαλύτερη πυκνότητα έχουμε σε μια επιφάνεια τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς που θα παραχθεί στην DC λειτουργία. Αυτό θα συμβεί βέβαια με δεδομένο ότι η θερμοκρασία των κελιών δεν θα είναι τόσο μεγάλη ώστε να μειώσει σε τόσο μεγάλο βαθμό της απόδοση του ΦΒ στοιχείου. Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία παίζει τόσο σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ισχύος, η τοποθέτηση του ΦΒ στοιχείου, όσον αφορά την τοποθεσία και την κλίση του, πρέπει να

είναι η βέλτιστη δυνατή. Όπως βλέπουμε στο γράφημα I-V της εικόνας 2.10 το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} αυξάνεται με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας.



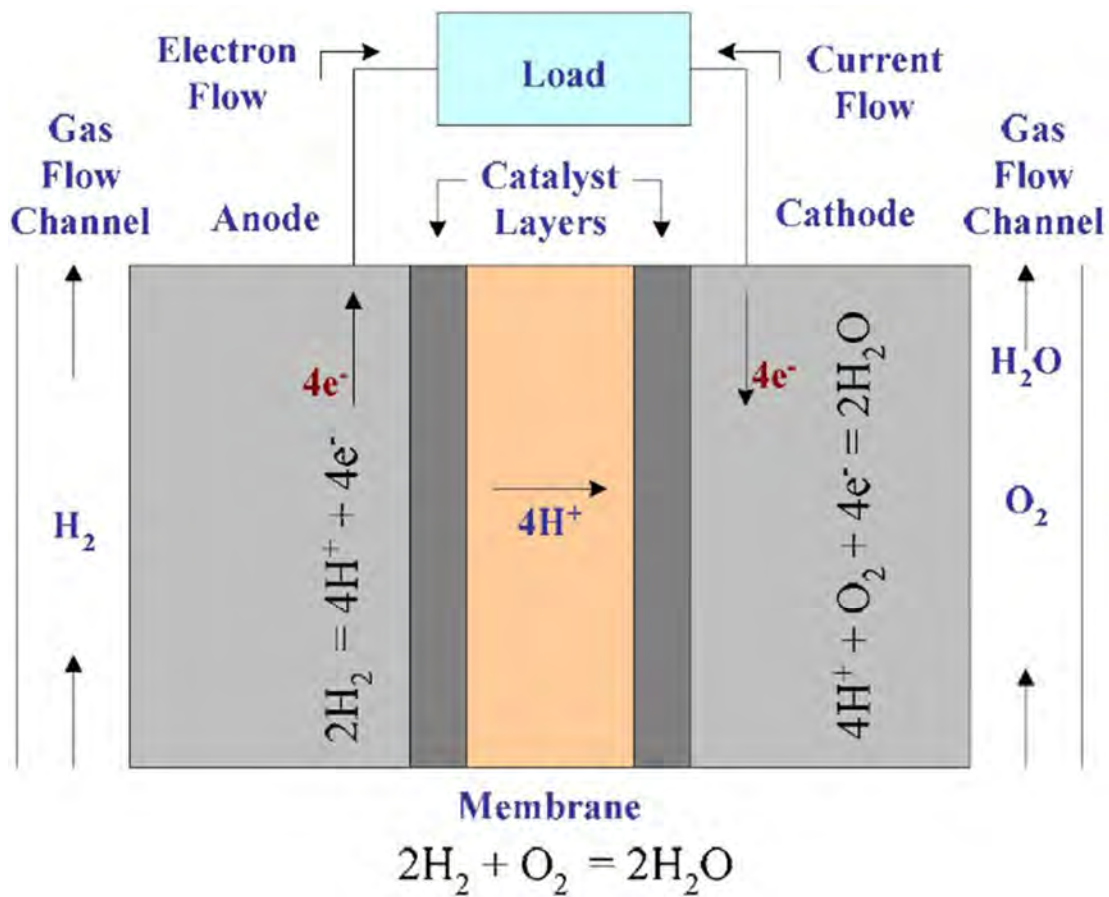
Εικόνα 2.10: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V για διαφορετικές τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας [10]

Παρόλο που τα ηλιακά πάνελ είναι η καρδιά ενός ΦΒ συστήματος υπάρχουν και άλλα στοιχεία απαραίτητα για την ορθή λειτουργία του. Τέτοια είναι οι μετατροπείς DC-DC και οι αντιστροφείς (inverters) AC-DC, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και η διάταξη εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος MPPT (Maximum Power Point Tracking).

2.3.3 Κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου (fuel cells) είναι ηλεκτροχημικές μονάδες μετατροπής ενέργειας, οι οποίες μετατρέπουν απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια την χημική ενέργεια του καυσίμου [12]. Χρησιμοποιούν συχνά το υδρογόνο ως καύσιμο καθώς η οξείδωση του (ένωση του υδρογόνου με O_2) κατά την καύση παράγει μια έντονα εξώθερμη αντίδραση, υποπροϊόν της οποίας είναι το νερό [3]. Αναλυτικότερα μια κυψέλη καυσίμου Εναλλαγής Μεμβράνης Πρωτονίων PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) έχει δομή τύπου «σάντουιτς», η οποία φαίνεται στην εικόνα 2.11. Ανάμεσα σε δύο πορώδη ηλεκτρόδια,

ένα θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος), βρίσκεται μια μεμβράνη σαν τεφλόν, η οποία ονομάζεται ηλεκτρολύτης και είναι άριστος αγωγός πρωτονίων και μονωτικό υλικό ηλεκτρονίων. Τα μόρια του υδρογόνου διασπώνται σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια υδρογόνου στην άνοδο με την βοήθεια ενός καταλύτη. Τα πρωτόνια υδρογόνου περνούν μέσω του ηλεκτρολύτη στην κάθοδο και συνδυάζονται με τα ηλεκτρόνια, τα οποία φτάνουν στην κάθοδο για να παράγουν μόρια νερού. Η χημική εξίσωση που περιγράφει αυτήν την διαδικασία είναι η εξής:



Εικόνα 2.11: Σχηματικό διάγραμμα κυψελών καυσίμου τύπου PEMFC [12]

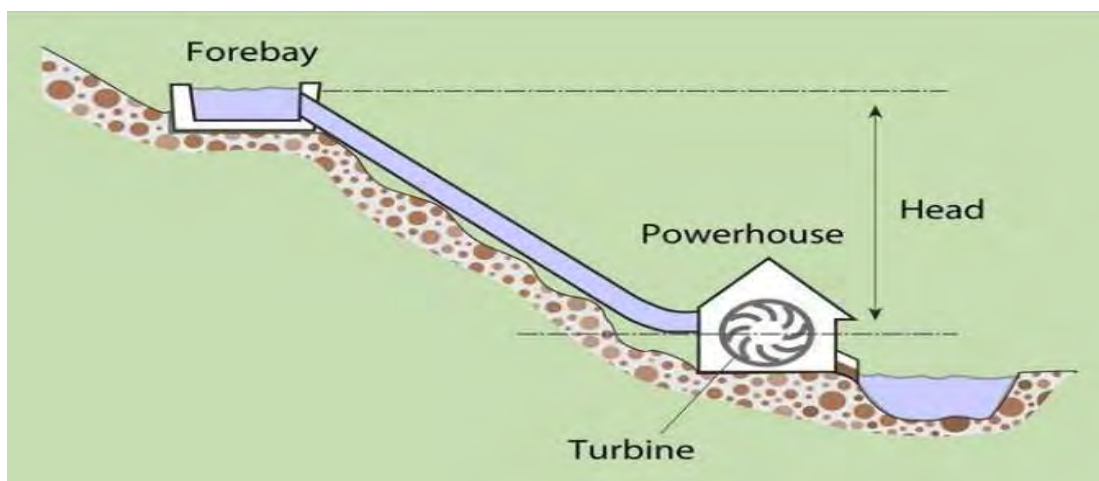
Ένα από τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι η μεγάλη πυκνότητα ισχύος και η υψηλή τους απόδοση (40-45%). Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να τοποθετηθούν σε στρατηγικές θέσεις στο δίκτυο διανομής, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία και την συνεχή

λειτουργία του. Απαραίτητο στοιχείο για την ενσωμάτωση τους είναι οι αντιστροφείς DC-AC, έτσι ώστε να διοχετεύεται η ενέργεια με ασφάλεια στο δίκτυο [12].

2.3.4 Υδροηλεκτρικά συστήματα

Η χρήση της κινητικής ενέργειας των υδατοπτώσεων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είναι γνωστή εδώ και αρκετά χρόνια. Αυτός είναι και ο λόγος της κατασκευής σημαντικού αριθμού υδροηλεκτρικών έργων τόσο στην χώρα μας όσο και στον υπόλοιπο κόσμο. Τα όρια της Μικρής Υδροηλεκτρικής Παραγωγής έχουν οριστεί στην Ελλάδα, για την αποφυγή των επιπτώσεων των μεγάλων φραγμάτων στα τοπικά οικοσυστήματα. Το όριο αυτό για την χώρα μας είναι τα 15 MW. Υπάρχουν μάλιστα υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ) με ισχύ μικρότερη του 1 MW, οι οποίοι ονομάζονται «mini» ΥΗΣ. Τα μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα λειτουργούν με την φυσική ροή του ρεύματος του νερού ή και με την βοήθεια μικρών φραγμάτων [3]. Οι συντελεστές απόδοσης των Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων (ΜΥΗΕ) φτάνουν και το 90% ενώ το προσδόκιμο ζωής τους ξεπερνά τα 100 χρόνια. Τα ΜΥΗΕ έχουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως [13]:

- Δυνατότητα άμεσης σύνδεσης και αποσύνδεσης από το δίκτυο ή και αυτόνομη λειτουργία.
- Άριστη απόδοση σε βάθος χρόνου και μεγάλο προσδόκιμο ζωής
- Μικρό κόστος συντήρησης.
- Ταυτόχρονα με την παραγωγή ενέργειας και τον μηδενικό αντίκτυπο στο περιβάλλον μπορούν να εξυπηρετήσουν ανάγκες όπως η ύδρευση και η άρδευση.

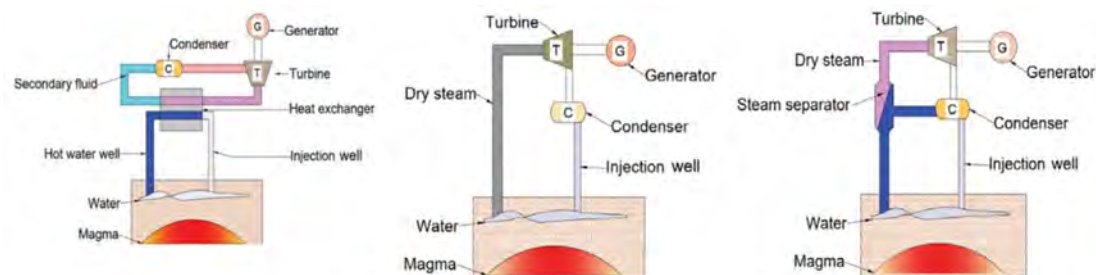


Εικόνα 2.12: Τυπική δομή μικρού υδροηλεκτρικού συστήματος [14]

2.3.5 Γεωθερμία

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια από τις πιο αξιόπιστες μορφές ΑΠΕ, με μεγάλη επιρροή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο. Σε αντίθεση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή, η γεωθερμία ανήκει στους αξιόπιστους και σταθερούς ενεργειακούς πόρους. Επομένως τα γεωθερμικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να λειτουργήσουν ως κύριες μονάδες παραγωγής. Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται κάτω από τον φλοιό της γης. Παράγεται συνεχώς από την φυσική αποσύνθεση ραδιενεργών υλικών, όπως το Ουράνιο. Υπολογίζεται πως τα αποθέματα θερμικής ενέργειας κάτω από τον φλοιό της γης είναι κατά 50.000 φορές μεγαλύτερα από τα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου μαζί [15].

Η βασική αρχή της παραγωγής ενέργειας μέσω της γεωθερμίας βασίζεται στην μετατροπή της θερμικής ενέργειας της γης σε ηλεκτρική ενέργεια. Νερό ή υδροθερμικό υγρό διοχετεύεται στη γη μέσω των πηγαδιών παραγωγής (injection wells). Η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται και διοχετεύεται για την παραγωγή πεπιεσμένου ατμού, ο οποίος κατευθύνεται στους στροβίλους του γεωθερμικού σταθμού. Εκεί η θερμική ενέργεια του ατμού μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Οι στροβίλοι συνδέονται με γεννήτριες οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια [15]. Η παραπάνω διαδικασία διαφέρει ανάλογα με την τεχνολογία γεωθερμικού σταθμού που χρησιμοποιείται. Υπάρχουν τρεις κύριες τεχνολογίες λειτουργίας γεωθερμικών σταθμών. Οι σταθμοί υγρού ατμού, ξηρού ατμού και οι γεωθερμικοί σταθμοί δυαδικού κύκλου.



Εικόνα 2.13: α) Γεωθερμικός σταθμός δυαδικού κύκλου β) Γεωθερμικός σταθμός ξηρού ατμού γ) Γεωθερμικός σταθμός υγρού ατμού [15]

2.4 Συστήματα αποθήκευσης

Σε αντίθεση με άλλα ζωτικής σημασίας αγαθά για την καθημερινή ζωή, η μαζική αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα λόγω τεχνολογικών αλλά και οι οικονομικών περιορισμών. Ωστόσο η στοχαστική συμπεριφορά μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής όπως είναι οι Α/Γ και τα ΦΒ συστήματα, δημιουργεί έναν παράγοντα αβεβαιότητας όσον αφορά την αξιοπιστία τους στην απόκριση ζήτησης. Αυτή η αβεβαιότητα αντισταθμίζεται πολλές φορές με την χρήση Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας (ΣΑΕ). Εντούτοις, μεταξύ άλλων, τα ΣΑΕ διευκολύνουν την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και προσφέρουν σταθερότητα στο δίκτυο με δύο τρόπους:

- Αποθηκεύοντας την περίσσεια παραγόμενης ενέργειας, όποτε αυτό συμβαίνει.
- Προσφέροντας την αποθηκευμένη ενέργεια στο δίκτυο στις ώρες αιχμής.

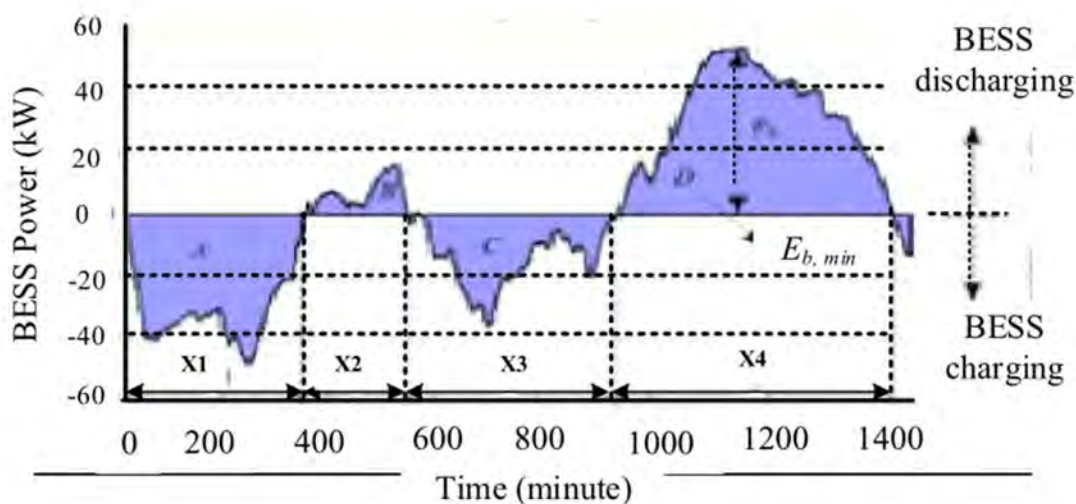
Ιδιαίτερα σε ένα μικροδίκτυο η επιλογή και η διαχείριση ΣΑΕ μειώνουν εξαιρετικά τις εμφανίσεις ανωμαλιών και σφαλμάτων. Τα συστήματα αυτά κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την μορφή ενέργειας που χρησιμοποιείται [16]. Έτσι, μπορούμε να έχουμε:

- Συστήματα αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας: Σε αυτήν την περίπτωση η ενέργεια αποθηκεύεται με την μορφή είτε κινητικής είτε δυναμικής ενέργειας. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει και το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους (Flywheel Energy Storage Systems-FESS).
- Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας: Η αποθήκευση της ενέργειας γίνεται με την χρήση ηλεκτρικών ή μαγνητικών πεδίων. Τέτοιου είδους είναι τα τυπικά συστήματα πυκνωτών και τα συστήματα με υπεραγώγιμα πηνία (Superconducting Magnetic Energy Storage System-SMESS).
- Συστήματα αποθήκευσης χημικής ενέργειας: Η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να επαναχρησιμοποιηθεί όταν χημικές ουσίες υπόκεινται σε ορισμένες χημικές αντιδράσεις. Για παράδειγμα τα συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου (Hydrogen Energy Storage Systems-H₂ESS) και τα συστήματα αποθήκευσης συνθετικού φυσικού αερίου (Synthetic Natural Gas-SNG).
- Ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας: Μπορούν να θεωρηθούν σαν μια υποκατηγορία των συστημάτων που λειτουργούν με χημική ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση η χημική ενέργεια των στοιχείων μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων οξείδωσης-αναγωγής (oxidation-reduction).
- Θερμικά συστήματα αποθήκευσης (Thermal Energy Storage System-TESS): Η θερμότητα είναι επίσης μια μορφή ενέργειας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με το εύρος των

θερμοκρασιών έχουμε τα συστήματα χαμηλών θερμοκρασιών, τα συστήματα υψηλών θερμοκρασιών και τα υβριδικά θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας [17].

2.4.1 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες

Τα ΣΑΕ με μπαταρίες (Battery Energy Storage Systems-BESS) χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο στην παραγωγή όσο και στην μεταφορά και την διανομή. Σημαντικός ρόλος της τεχνολογίας BESS είναι να ελέγχει την συχνότητα ενός μικροδικτύου. Στην εικόνα 2.14 φαίνεται η καμπύλη ισχύος για ένα ΣΑΕ με μπαταρίες. Οι θετικές τιμές ισχύος του διαγράμματος υποδεικνύουν τις αποφορτίσεις του συστήματος με σκοπό την ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου. Οι αρνητικές τιμές ισχύος μαρτυρούν πως το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης για την διατήρηση της συχνότητας του δικτύου σε φυσιολογικά πλαίσια [16].



Εικόνα 2.14: Τυπική ημερήσια καμπύλη προφίλ ισχύος για ΣΑΕ με μπαταρίες [16]

Βασικό χαρακτηριστικό ενός συστήματος αποθήκευσης με μπαταρίες είναι ο τύπος και η χωρητικότητα των μπαταριών.

2.4.1.1 Μπαταρίες μολύβδου οξέος (Lead-acid ή PbA)

Η πιο γνωστή τεχνολογία μπαταριών, με εφαρμογές σε πληθώρα πεδίων, σε διάφορα μεγέθη. Συγκριτικά με τις περισσότερες μπαταρίες ηλεκτρολυτών, οι μπαταρίες μολύβδου οξέος εμφανίζουν μεγάλη απόδοση (70-80%) και την μεγαλύτερη τάση κυψέλης

συσσωρευτή. Τα ηλεκτρόδια της καθόδου και της ανόδου φτιάχνονται από διοξείδιο του μολύβδου (PbO_2) και μόλυβδο (Pb) αντίστοιχα. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται θειικό οξύ. Το κόστος τους είναι χαμηλότερο από άλλες τεχνολογίες μπαταριών, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για μεγάλες εφαρμογές σε μικροδίκτυα. Επιπλέον έχουν άριστη διατήρηση φόρτισης και μικρούς χρόνους αντίδρασης. Οι παραδοσιακές τεχνολογίες μπαταριών μολύβδου-οξέος είχαν μικρή διάρκεια ζωής (500-2000 κύκλους φόρτισης). Παρόλα αυτά αναπτύχθηκαν νέες τεχνολογίες οι οποίες αύξησαν την διάρκεια ζωής των μπαταριών αυτών στα 5-15 έτη. Ένα μειονέκτημα της τεχνολογίας μολύβδου οξέος είναι πως η χρήση της δεν είναι φιλική προς το περιβάλλον, λόγω του μολύβδου που περιέχει, ωστόσο είναι εύκολα ανακυκλώσιμη [16].

2.4.1.2 Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-Ion)

Παρόλο που η τεχνολογία μπαταριών ιόντων λιθίου εμφανίστηκε στην αγορά την δεκαετία του '90, αποτελεί την ταχύτερα αναπτυσσόμενη τεχνολογία μπαταριών τα τελευταία χρόνια. Μια συσκευή αποθήκευσης τύπου ιόντων λιθίου μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια σε κλίμακα MW. Το ηλεκτρόδιο ανόδου είναι φτιαγμένο από έναν τύπο οξειδίου του λιθίου ($LiCoO_2$) και της καθόδου από γραφίτη. Κατά την περίοδο φόρτισης, ιόντα λιθίου περνούν από την κάθοδο στην άνοδο. Το αντίστροφο συμβαίνει κατά την εκφόρτιση. Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να σχηματιστεί από έναν οργανικό διαλύτη, με διαλυμένο κάποιο άλας του λιθίου. Οι μπαταρίες λιθίου χαρακτηρίζονται από την μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, υψηλή απόδοση (90-95%), μεγάλο συντελεστή ισχύος και διάρκεια ζωής μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 20 έτη. Μπορεί να αποτελούν μια εξαιρετική λύση για την διασφάλιση της ποιότητας ισχύος ενός μικροδικτύου ωστόσο το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό. Αυτό ωστόσο αναμένεται να αλλάξει με την παραγωγή της τεχνολογίας σε μεγάλη κλίμακα [16]].

2.4.1.3 Μπαταρίες νατρίου-θείου (NaS)

Μια μπαταρία νατρίου-θείου αποτελείται από τηγμένα ηλεκτρόδια νατρίου (Na) και θείου (S), και έναν μη υδατικό ηλεκτρολύτη βήτα-αλουμίνας. Το θείο χρησιμοποιείται στην κάθοδο και το νάτριο στην άνοδο. Κατά την περίοδο εκφόρτισης το νάτριο οξειδώνεται και δημιουργούνται ιόντα νατρίου όταν περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη. Το ιόν νατρίου (Na^+) ενώνεται με το θείο (S) της καθόδου και παράγεται πολυθειούχο νάτριο

(Na_2S_x). Η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει μεγάλους βαθμούς απόδοσης και πολυετή διάρκεια ζωής. Ωστόσο είναι απαραίτητο να λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (γύρω στους 350 βαθμούς Κελσίου), ώστε να εξασφαλίζεται η τήξη των ηλεκτροδίων νατρίου και θείου. Στον πίνακα 2.1 φαίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τύπων μπαταριών που περιεγράφηκαν όπως μερικών που δεν αναφέρθηκαν, με τις μπαταρίες λιθίου να ξεχωρίζουν για την απόδοσή τους [16].

Πίνακας 2.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά τυπικών τεχνολογιών ΣΑΕ με μπαταρίες [16]

Technologies	Name	Capacity (MWh)	Power (MW)	Response time	Discharge time	Life time (Years)	Efficiency (%)	Advantage	Disadvantage
Electrochemical	Lead-acid	0.25 – 50	≤ 100		≤ 4h	≤ 20	≤ 85	Highly recyclable and low-cost	Heavy, poor energy density
	Lithium-ion	0.25 – 25	≤ 100		≤ 1h	≤ 15	≤ 90	High storage capacity and long life cycle	
	NaS	≤ 300	≤ 50	millisecond	≤ 6h	≤ 15	≤ 80	High storage capacity and low cost	Works only when Na and S are liquid (290–390 °C)
	Vanadium Redox	≤ 250	≤ 50	≤ 10 min	≤ 8h	≤ 10	≤ 80	Possible to use in various renewable sources	

Κεφάλαιο 3 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

3.1 Εισαγωγή

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελείται από ένα δίκτυο εγκαταστάσεων παραγωγής και διανομής, σκοπός του οποίου είναι η αδιάκοπη λειτουργία και η αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές του. Τα ΣΗΕ, ανεξαρτήτως μεγέθους, αποτελούν συστήματα που χαρακτηρίζονται από μεγάλη πολυπλοκότητα. Και αυτό γιατί πρέπει να λειτουργούν πληρώντας πολύ αυστηρά κριτήρια, σε διάφορες κλίμακες, ικανοποιώντας απαιτήσεις όπως η ζήτηση και η ποιότητα ισχύος, η σταθερή τάση συχνότητα λειτουργίας και η ασφάλεια.

Η δομή ενός ΣΗΕ επηρεάζεται από διάφορες συνθήκες. Παράγοντες όπως γεωγραφικοί και οικονομικοί περιορισμοί, έχουν αντίκτυπο στον σχεδιασμό ενός δικτύου και τον τρόπο λειτουργίας του. Τα τελευταία χρόνια, η είσοδος εννοιών, όπως η αποκεντρωμένη παραγωγή και τα έξυπνα δίκτυα, έχει οδηγήσει στην μεταβολή του παραδοσιακού μοντέλου συγκεντρωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα με την χρήση σύγχρονων εργαλείων στην διαχείριση μεγάλου όγκου πληροφοριών, τον απομακρυσμένο έλεγχο και την ασφάλεια τροφοδοσίας, η λύσεις που προτείνουν τα αποκεντρωμένα μοντέλα κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος.

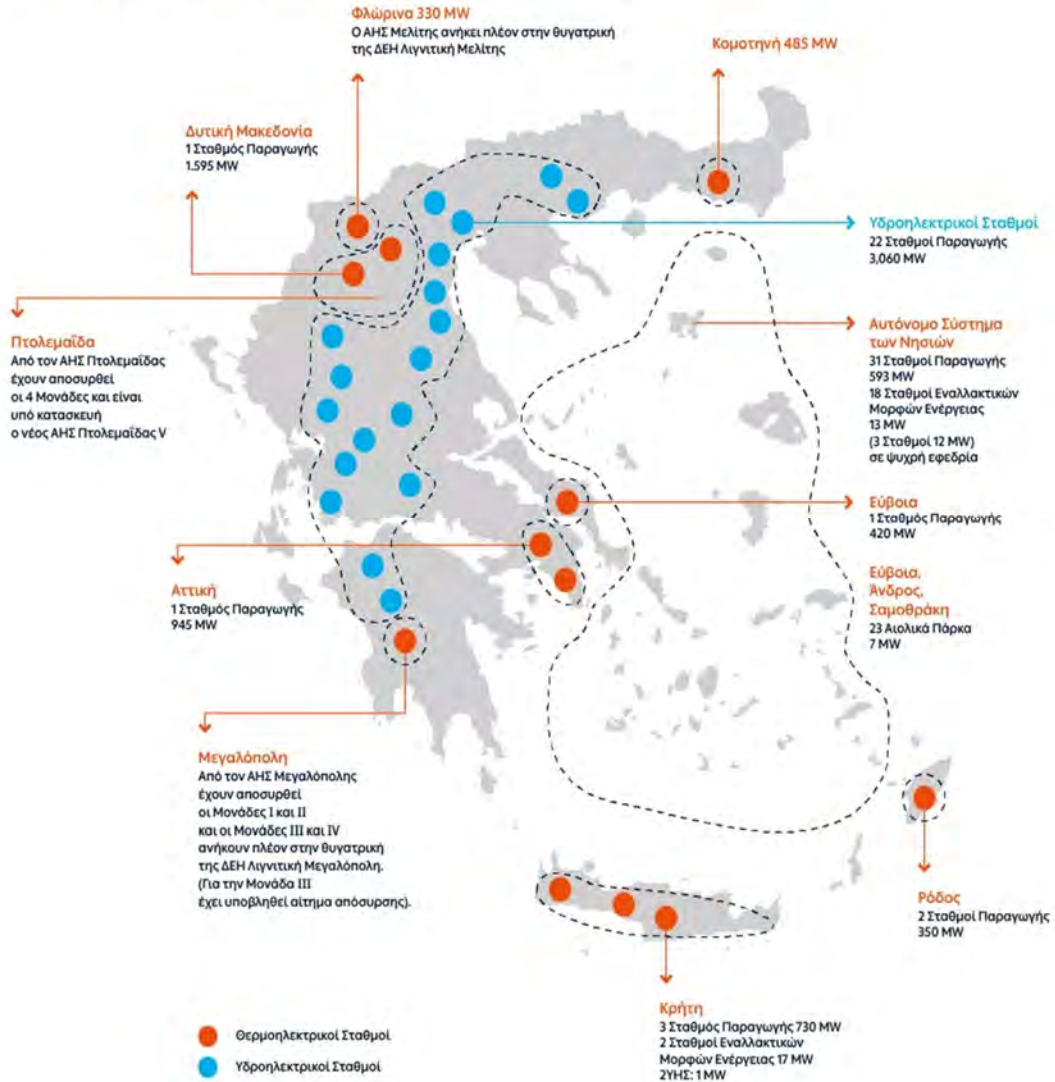
3.2 Κεντρική παραγωγή ενέργειας

Το παραδοσιακό μοντέλο παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας προτείνει μια πιο συγκεντρωμένη λύση, κατά την οποία η παραγωγή ενέργειας γίνεται απομακρυσμένα από την κατανάλωση. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στους σταθμούς παραγωγής και φτάνει στους καταναλωτές μέσω του δικτύου μεταφοράς. Οι σταθμοί παραγωγής χαρακτηρίζονται βάσει της πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιούν. Έτσι έχουμε π.χ. λιγνιτικές μονάδες, υδροηλεκτρικούς σταθμούς και πυρηνικούς σταθμούς.

Το σπουδαιότερο ενεργειακό κέντρο παραγωγής της Ελλάδας βρίσκεται στην δυτική Μακεδονία, όπου παράγεται το 70% της ενέργειας, το 65% της οποίας καταναλώνεται στις

περιοχές της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας [18]. Στην εικόνα 3.1 βλέπουμε τις κύριες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας:

Γεωγραφική κατανομή σταθμών παραγωγής



Εικόνα 3.1 : Γεωγραφική κατανομή σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [19]

Σημαντική λεπτομέρεια στην εικόνα 3.2 είναι η εξάπλωση των μεγαλύτερων κοιτασμάτων λιγνίτη στην Ελλάδα. Τα λιγνιτωρυχεία, κυρίως της ΔΕΗ αλλά και ιδιωτών, στις περιοχές της Κοζάνης και της Μεγαλόπολης εξασφάλισαν για μία μεγάλη περίοδο 65 ετών καύσιμο για τις μονάδες παραγωγής ενέργειας και έπαιξαν κεντρικό ρόλο στον εξηλεκτρισμό της

χώρας μας. Συγκρίνοντας τις εικόνες 3.1 και 3.2 διακρίνουμε εύκολα πως τα συστήματα παραγωγής ενέργειας είναι κατασκευασμένα κοντά στην πηγή πρωτογενούς ενέργειας τους.

Κοιτάσματα Λιγνίτη στην Ελλάδα



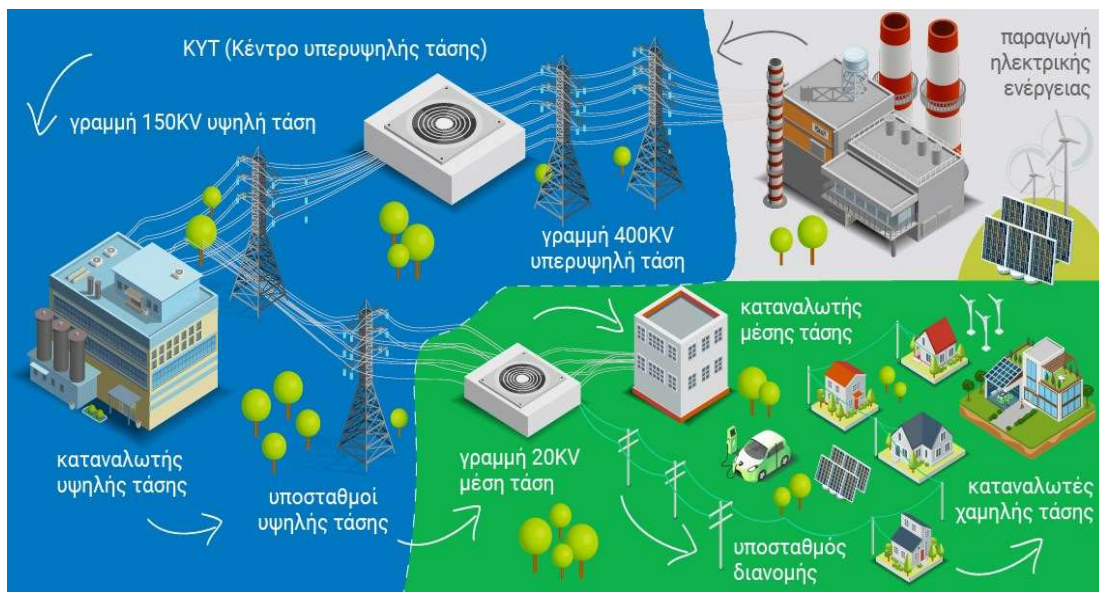
Εικόνα 3.2: Εξάπλωση κοιτασμάτων λιγνίτη στην Ελλάδα [19]

Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες, το δίκτυο μεταφοράς και το δίκτυο διανομής. Το δίκτυο μεταφοράς, χρησιμοποιώντας ανυψωτές τάσης, δέχεται μεγάλα ποσά ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής, τους οποίους συνδέει με όλα τα σημεία κατανάλωσης μέσω των γραμμών μεταφοράς. Μέσω

του δικτύου μεταφοράς τροφοδοτούνται κατά κύριο λόγο οι υποσταθμοί τροφοδοσίας, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα απευθείας τροφοδότησης καταναλωτών υψηλής τάσης. Τα βασικά στοιχεία του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας είναι [18]:

- Εναέριες γραμμές μεταφοράς 400kV, 150kV, 66kV
- Υπόγειες και υποβρύχιες γραμμές μεταφοράς 150kV και 400kV
- Υποσταθμοί 150/20kV
- Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (ΚΥΤ) 400/150kV

Το δίκτυο διανομής τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς διανομής και συμπεριλαμβάνει τα δίκτυα Μέσης Τάσης και Χαμηλής Τάσης και τους Μετασχηματιστές Τάσης. Μέσω των μετασχηματιστών τάσης γίνεται υποβίβαση της μέσης τάσης σε χαμηλή και καθίσταται δυνατή η τροφοδοσία των μικρών οικιακών καταναλωτών. Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται ,σχηματικά, δομή του δικτύου ηλεκτρισμού στην Ελλάδα.



Εικόνα 3.3: Σχηματική απεικόνιση τυπικής δομής του ελληνικού ΣΗΕ [20]

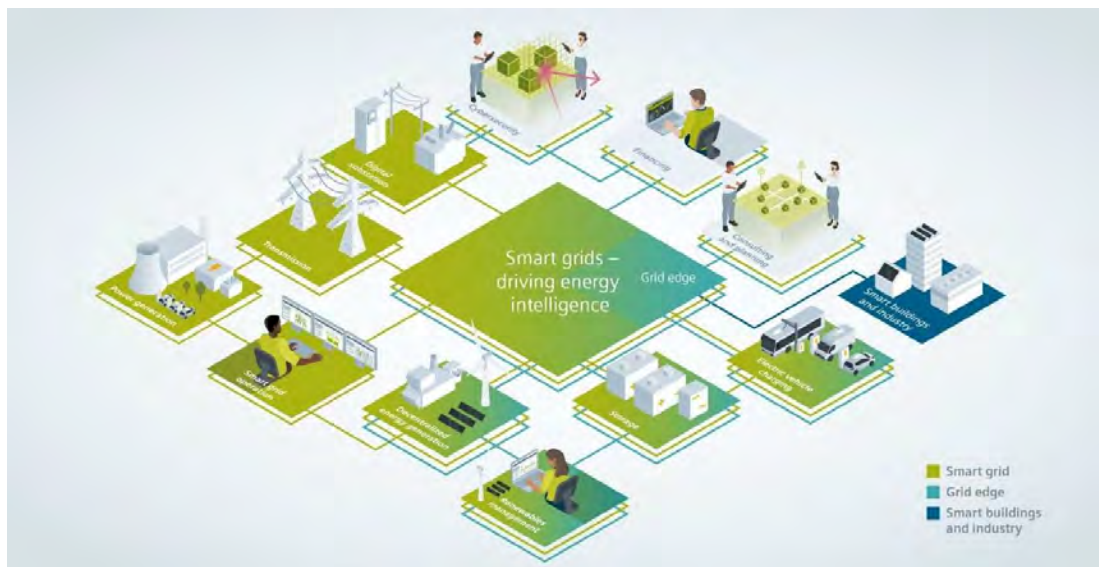
3.3 Ευφυή δίκτυα

Λόγω της ένταξης νέων συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης δεδομένων στην παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, το υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι αναπόφευκτο να αλλάξει. Σύγχρονα οικολογικά προβλήματα όπως η κλιματική αλλαγή και η ανάγκη για καθαρότερες μορφές ενέργειας, καθιστούν την χρήση ΑΠΕ πιο επιτακτική

από ποτέ. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη για εξέλιξη του υφιστάμενου δικτύου και ανάπτυξη νέων ειδών «έξυπνων» δικτύων τα οποία θα μπορούν να διαχειριστούν με αξιόπιστο, ασφαλή και αποδοτικό τρόπο καινοτόμες και ριζοσπαστικές λύσεις στον τομέα της ενέργειας.

Ως Ευφυή Ηλεκτρικά Δίκτυα χαρακτηρίζονται τα ηλεκτρικά δίκτυα εκείνα, τα οποία μπορούν να ενσωματώνουν έξυπνα όλους τους συνδεδεμένους χρήστες τους, παραγωγούς και καταναλωτές, με στόχο την αποτελεσματική παροχή αξιόπιστης, βιώσιμης και οικονομικής ενέργειας [21]. Χρησιμοποιώντας έξυπνους τρόπους επιτήρησης και διαχείρισης στο επίπεδο της παραγωγής και της μεταφοράς, μετατρέπουμε σταδιακά το παραδοσιακό «παθητικό» σύστημα με άξονα μια περισσότερο σύγχρονη και ενεργητική προσέγγιση. Μια τέτοια προσέγγιση είναι εφοδιασμένη για την επίλυση αντίστοιχα σύγχρονων ζητημάτων στον τομέα της ενέργειας όπως τα εξής:

- Ενσωμάτωση διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων και ΑΠΕ στο δίκτυο.
- Διαχείριση της ζήτησης σε τοπικό επίπεδο με την βοήθεια ευφύων μετρητικών διατάξεων.
- Η ανάγκη εφαρμογής τεχνικών δυναμικού ελέγχου για την αύξηση της ποιότητας ισχύος στο δίκτυο και την ενίσχυση λύσεων διεσπαρμένης παραγωγής.
- Η ασφαλής λειτουργία και η ικανοποίηση των αναγκών που δημιουργούνται από την ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο.

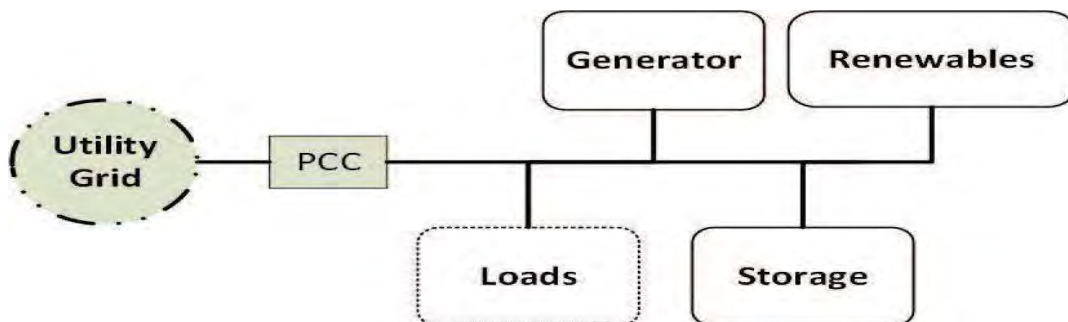


Εικόνα 3.4: Τυπική δομή ευφυούς δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας [22]

Χαρακτηριστική ιδιότητα ενός ενεργού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αποτελεσματική σύνδεση της παραγόμενης ισχύος με τις ανάγκες των καταναλωτών, ώστε να μπορούν τόσο οι παραγωγοί όσο και οι καταναλωτές, να καθορίζουν τον βέλτιστο τρόπο λειτουργίας τους σε πραγματικό χρόνο [23]. Στη εικόνα 3.4 φαίνεται η τυπική δομή ενός ΕΗΔ.

3.4 Μικροδίκτυα

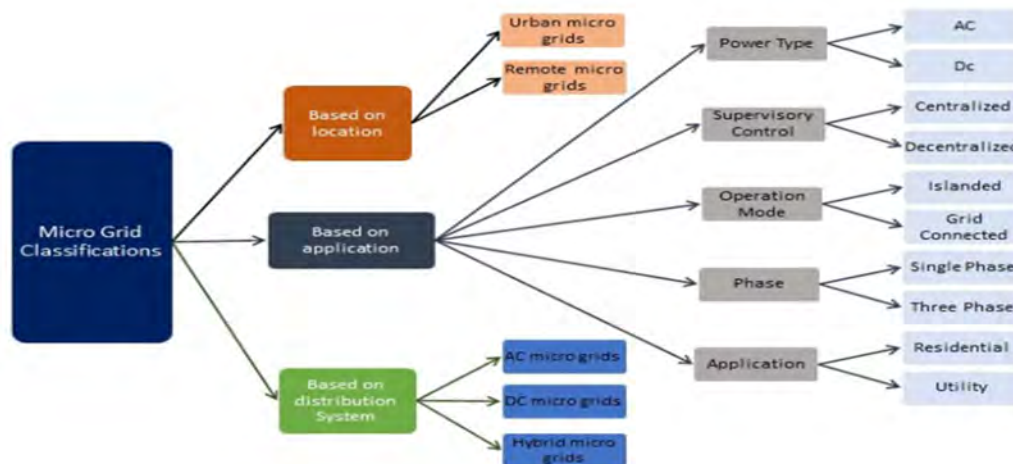
Η διαρκής εξέλιξη των παραδοσιακών ΣΗΕ και η ανάπτυξη ΕΗΔ δημιουργεί την ανάγκη εισαγωγής νέων όρων στον τομέα των συστημάτων ισχύος. Μια τέτοια περίπτωση αποτελούν και τα Μικροδίκτυα (ΜΔ). Το μικροδίκτυο αποτελεί δομικό στοιχείο ενός Ευφυούς Ηλεκτρικού Δικτύου και ορίζεται ως ένα σύνολο διασυνδεδεμένων φορτίων και διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει παράλληλα, ή και ανεξάρτητα, από το παραδοσιακό κεντρικό σύστημα παραγωγής ενέργειας. Προσπαθώντας να δώσουμε έναν πιο αυστηρό ορισμό της έννοιας του μικροδικτύου, πρόκειται για τεχνολογίες που περιλαμβάνουν συστήματα διανομής ΧΤ με διεσπαρμένη παραγωγή, σε συνδυασμό με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και ελεγχόμενα φορτία [23]. Στην εικόνα 3.5 φαίνεται η δομή ενός απλού ΜΔ. Η σύνδεση του ΜΔ με το κεντρικό δίκτυο γίνεται μέσω ενός σημείου κοινής σύνδεσης. Στο σημείο κοινής σύνδεσης (Point of Common Coupling), εγκαθίσταται μια συσκευή διαχωρισμού, η οποία επιτρέπει την ασφαλή αποσύνδεση και επανασύνδεση του ΜΔ στο κεντρικό δίκτυο. Με την διάταξη αυτή, διασφαλίζεται η συνεχής λειτουργία του ΜΔ ακόμα σε περιπτώσεις που το κεντρικό δίκτυο δεν μπορεί να παρέχει επαρκή ενέργεια. Επιπλέον καθίσταται δυνατό να αποφευχθούν βλάβες, οι οποίες μπορεί να προκληθούν λόγω διαταραχών.



Εικόνα 3.5: Απλουστευμένο διάγραμμα δομής ενός ΜΔ [24]

3.4.1 Κατηγορίες μικροδικτύων

Τα μικροδίκτυα χωρίζονται σε διάφορες υποκατηγορίες, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, όπως για παράδειγμα ο τύπος του συστήματος διανομής τους. Στην εικόνα 3.6 φαίνεται ένα παράδειγμα κατηγοριοποίησης μικροδικτύων.



Εικόνα 3.6: Τρόποι κατηγοριοποίησης μικροδικτύων [25]

Όπως εύκολα διακρίνουμε στην εικόνα 3.6 ένας τρόπος κατηγοριοποίησης μικροδικτύων είναι βάσει του τρόπου λειτουργίας τους (operation mode). Σύμφωνα με αυτόν τα μικροδίκτυα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, εκείνα που είναι διασυνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο (grid connected) και τα αυτόνομα μικροδίκτυα υπό νησιδοποίηση (islanded).

Τα ΜΔ λειτουργούν υπό νησιδοποίηση σε τρεις περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση αφορά την ακούσια λειτουργία νησιδοποίησης, η οποία συμβαίνει στο ενδεχόμενο κάποιου σφάλματος, όπως είναι για παράδειγμα η διακοπή τροφοδοσίας από κεντρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή το ΜΔ αποσυνδέεται μέσω του στατικού διακόπτη στο σημείο κοινής σύνδεσης, και η ζήτηση φορτίου καλύπτεται μέσω της παραγόμενης ενέργειας από τις μονάδες ΔΠ που περιλαμβάνει. Σε περίπτωση που η παραγόμενη ενέργεια από τις μονάδες ΔΠ του ΜΔ δεν είναι επαρκής για την κάλυψη του συνόλου της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου φροντίζουν ώστε να καλυφθούν, κατά προτεραιότητα, φορτία τα οποία έχουν χαρακτηριστεί ως κρίσιμα. Η αποκοπή των λιγότερο σημαντικών φορτίων (load shedding), εξασφαλίζει την απρόσκοπτη παροχή

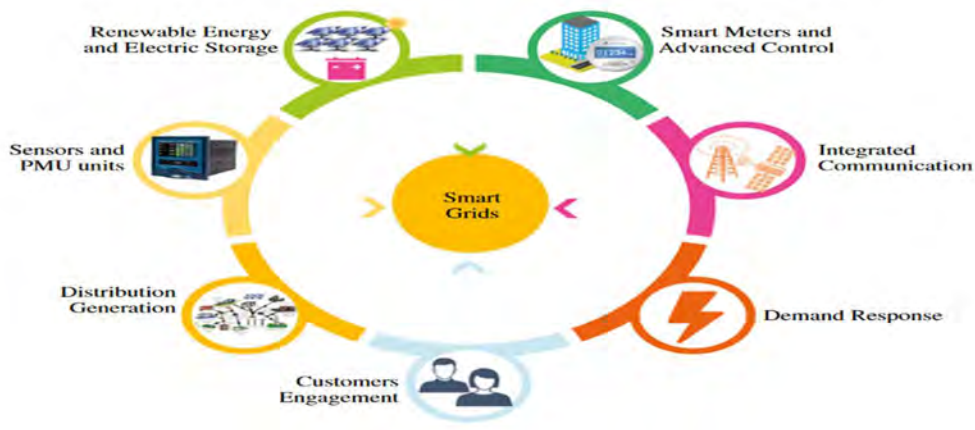
ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο τις λιγότερες επιπτώσεις στην καθημερινότητα και την ασφάλεια των καταναλωτών. Η δεύτερη περίπτωση αφορά την εκούσια αποσύνδεση του ΜΔ από το κεντρικό δίκτυο, αν για παράδειγμα χρειαστεί να γίνουν εργασίες συντήρησης ή επισκευής σε αυτό. Η τρίτη περίπτωση είναι αυτή, στην οποία το ΜΔ δεν συνδέεται καθόλου με το κεντρικό δίκτυο διανομής, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ΜΔΝ. Τα μικρά δίκτυα των νησιών χαρακτηρίζονται εγγενώς από τον συντονισμένο έλεγχο των πόρων τους. Έτσι, βάσει του μεγέθους τους, της ύπαρξης συστημάτων ελέγχου και του ποσοστού διείσδυσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που διαθέτουν, μπορούν να χαρακτηριστούν ως μικροδίκτυα υπό νησιδοποίηση [23].

Στην συνδεδεμένη λειτουργία, το ΜΔ συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο στο PCC. Στο σημείο αυτό έχει εγκατασταθεί ένας στατικός διακόπτης, ο οποίος εξασφαλίζει, με ασφαλή τρόπο, την σύνδεση ή την αποσύνδεση του ΜΔ από το κεντρικό δίκτυο διανομής ενέργειας. Το PCC είναι και το μόνο σημείο το οποίο υπάρχει ανταλλαγή ισχύος ανάμεσα στα δύο δίκτυα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα ενεργειακό ισοζύγιο το οποίο έχει τρεις ενδεχόμενες καταστάσεις. Η πρώτη κατάσταση είναι ο ροή ισχύος στο σημείο κοινής σύνδεσης να είναι μηδενική. Αυτό σημαίνει η παραγόμενη ισχύς από τις μονάδες διεσπαρμένες παραγωγής είναι ίση με την ζήτηση φορτίου. Η δεύτερη περίπτωση είναι να έχουμε πλεόνασμα παραγόμενης ισχύος από τις μονάδες του ΜΔ. Στην περίπτωση αυτή καλύπτεται το σύνολο της ζήτησης και το ΜΔ τροφοδοτεί το δίκτυο με την πλεονάζουσα ισχύ. Η τρίτη κατάσταση είναι αυτή στην οποία η παραγόμενη ισχύς από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγή του μικροδικτύου δεν καλύπτει την ζήτηση φορτίου σε αυτό. Έτσι κρίνεται απαραίτητη η μεταφορά ισχύος από το δίκτυο διανομής στο ΜΔ. Σημαντικό είναι να σημειώσουμε ότι όταν τα ΜΔ είναι συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο πρέπει να πληρούν ορισμένες προδιαγραφές, όπως η λειτουργία υπό την τάση και την συχνότητα που επιβάλλει το κεντρικό δίκτυο, διασφαλίζοντας έτσι την ομαλή λειτουργία του [23].

3.4.2 Συστατικά στοιχεία ΕΗΔ - Μικροδικτύων

Η αρχιτεκτονική των Ευφυών Ηλεκτρικών Δικτύων, συνεπώς και των ΜΔ, αποτελείται από τρεις βασικές κατηγορίες. Αυτές είναι τα συστήματα ισχύος, τα πληροφοριακά και τα επικοινωνιακά συστήματα. Η σχεδίαση και ανάλυση μελλοντικών έξυπνων δικτύων προϋποθέτει την εμβάθυνση στην τοπολογία δικτύων ισχύος και την ενσωμάτωση συστημάτων επιτήρησης και ελέγχου μέσω της μαζικής διαχείρισης μεγάλου όγκου

δεδομένων (Big Data). Επιπλέον πολύ σημαντική η βελτιστοποίηση των περίπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συστημάτων ισχύος και των επικοινωνιακών πρωτοκόλλων και των υπολογιστικών συστημάτων. Αντισταθμίζοντας λοιπόν πως η ύπαρξη αυτών των υποσυστημάτων δημιουργεί την ανάγκη ενός πολυεπίπεδου μοντέλου διαχείρισης του δικτύου. Η σύνθεση ενός ΕΗΔ επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό έξυπνων εφαρμογών και εξοπλισμού, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή, διανομή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστατικά στοιχεία λοιπόν ενός έξυπνου δικτύου μπορούν να ταξινομηθούν σε επτά σημαντικές τεχνολογικές κατηγορίες τις οποίες βλέπουμε στην εικόνα 3.7. Οι κατηγορίες αυτές είναι η διεσπαρμένη παραγωγή, η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, οι έξυπνοι μετρητές, ο ευφυής έλεγχος, οι ενσωματωμένες τεχνολογίες επικοινωνίας, οι τεχνολογίες ανίχνευσης και η απόκριση ζήτησης βάσει της ενεργής συμμετοχής των καταναλωτών. Από τις προαναφερθείσες κατηγορίες θα αναλύσουμε αυτές της διαχείρισης ζήτησης και του ευφυούς ελέγχου [21].



Εικόνα 3.7: Κατηγορίες βασικών τεχνολογιών ΕΗΔ [21]

3.4.2.1 Απόκριση Ζήτησης

Η έννοια της διαχείρισης της ζήτησης, προήλθε από την ανάγκη των διαχειριστών και των ρυθμιστικών αρχών των δικτύων διανομής, να αντιμετωπίσουν τα φορτία αιχμής όπου η καμπύλη ζήτησης παίρνει τις μέγιστες τιμές της . Αυτό αρχικά γινόταν μέσω ρυθμιστικών μέτρων που λάμβαναν οι διαχειριστές ώστε να περιορίσουν την ζήτηση ενέργειας στις ώρες αιχμής. Μια απλή τεχνική παθητικής διαχείρισης είναι η δυναμική τιμολόγηση της ενέργειας κατά την διάρκεια της ημέρας. Αυτού του είδους οι μέθοδοι, όπως η αποκοπή

αιχμών και η χρονική μετατόπιση των φορτίων, προϋποθέτουν συστηματικό σχεδιασμό από τους διαχειριστές του δικτύου [26].

Η χρήση έξυπνων μετρητών και η αμφίδρομη επικοινωνία σε ένα μικροδίκτυο, δίνουν την ευκαιρία στην τεχνολογία να συμμετέχει στην βελτίωση της αγοράς ενέργειας. Σε συνδυασμό με την ανάγκη διαχείρισης της ενέργειας συντέλεσαν στην δημιουργία δυναμικών μοντέλων διαχείρισης της ζήτησης και την ανάπτυξη της έννοιας της Απόκρισης Ζήτησης. Ειδικότερα οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μπορούν να θεωρηθούν η πλέον επιτυχημένη λύση σε περιπτώσεις που ζήτηση ενέργειας παίρνει τις μέγιστες τιμές της καμπύλης ζήτησης (peak load). Με αυτόν τον τρόπο ανοίγει ο δρόμος για την εμπλοκή των πελατών-παραγωγών στην χονδρική αγορά ενέργειας. Ένας μεγαλύτερος αριθμός παραγωγών μπορεί να επηρεάσει την δυνατότητα απόκρισης ζήτησης του δικτύου παρέχοντας επικουρικές υπηρεσίες σε αυτό, μεταβάλλοντας την επίπεδα παραγωγής ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου [21].

3.4.2.2 Ευφυής Έλεγχος

Θεμελιώδη στοιχεία ενός ΕΗΔ είναι τα αισθητήρια συλλογής δεδομένων, οι έξυπνες μετρητικές διατάξεις και οι ευφυείς ελεγκτές. Τα στοιχεία αυτά επιτηρούν την κατάσταση τόσο του δικτύου όσο και του εξοπλισμού, ο οποίος είναι σημαντικός για την ορθή λειτουργία και την διατήρηση της αξιοπιστίας του δικτύου. Η ύπαρξη τέτοιου είδους πληροφοριών είναι χρήσιμη για τους παραγωγούς, τους διαχειριστές και τους καταναλωτές. Για παράδειγμα παρέχεται η δυνατότητα στους καταναλωτές να επιβλέπουν τα επίπεδα κατανάλωσης και να εξοικονομούν ενέργεια όταν το κρίνουν αναγκαίο. Στην κατηγορία των αισθητηρίων περιλαμβάνονται μονάδες μέτρησης φάσης και εξελιγμένες μετρητικές διατάξεις. Ειδικότερα οι μονάδες μέτρησης φάσης, αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο το οποίο παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα ισχύος σε συγκεκριμένες στιγμές και κατ' επέκταση έναν δείκτη προσδιορισμού της υγείας του δικτύου.

Οι έξυπνοι μετρητές λειτουργούν ψηφιακά και επιτρέπουν την αυτόματη ανταλλαγή πολύπλοκων δεδομένων μεταξύ εξοπλισμού και καταναλωτών. Για ύπαρξη ενός ασφαλούς ευφυούς δικτύου είναι ζωτικής σημασίας η ανάπτυξη εφαρμογών, αλγορίθμων αντιμετώπισης σφαλμάτων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η χρήση Έξυπνων

Μετρητικών Διατάξεων παρέχει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων στους χρήστες του δικτύου όπως είναι οι εξής [21]:

- Έγκαιρη αναγνώριση περιπτώσεων κλοπής ηλεκτρικού ρεύματος.
- Άμεση πληροφόρηση σχετικά την τοποθεσία και τον βαθμό σοβαρότητας σφαλμάτων του δικτύου.
- Συλλογή, αποθήκευση και διαχείριση των δεδομένων ενεργειακής κατανάλωσης των χρηστών.
- Δυνατότητα απομακρυσμένης σύνδεσης ή αποσύνδεσης
- Άμεση απόκτηση πληροφοριών τιμολόγησης, ανάλογα με τους χρόνους κατανάλωσης.

3.4.3 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις

Είναι βέβαιο πως τα ΕΗΔ και κατ' επέκταση τα μικροδίκτυα θα επιφέρουν ριζικές αλλαγές στον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και θα παίξουν καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη των στόχων στον τομέα της ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την υιοθέτηση του ευφυούς μοντέλου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τα άμεσα και τα έμμεσα. Στα άμεσα οφέλη περιλαμβάνονται τα παρακάτω:

- Προωθείται η ενεργή συμμετοχή του καταναλωτή, το οποίο αλλάζει το πρότυπο του συγκεντρωτικού ελέγχου του υφιστάμενου δικτύου, προτείνοντας μια περισσότερο αποκεντρωμένη λύση.
- Βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου.
- Ελαχιστοποίηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
- Μείωση των απωλειών στο δίκτυο μεταφοράς ενέργειας.
- Δυνατότητα έγκαιρης πρόληψης και δυναμικής αντιμετώπισης των σφαλμάτων.
- Επιτρέπεται η διείσδυση ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας σε μεγαλύτερα ποσοστά.
- Διευκολύνει την ενσωμάτωση και ασφαλή λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα έμμεσα οφέλη αφορούν τον τομέα της οικονομίας στον τομέα της ενέργειας και των κατασκευών. Για παράδειγμα η διαρκής αύξηση της ζήτησης, απαιτεί την δημιουργία νέων εργαλείων για την κάλυψη της. Η ευφυής διαχείριση της παραγωγής και της ζήτησης ενέργειας, θα βοηθήσει να μειωθεί η ανάγκη για κατασκευή νέων κεντρικών μονάδων παραγωγής, ελαχιστοποιώντας μακροπρόθεσμα το κόστος κεφαλαίου στον τομέα αυτό.

Ωστόσο, εκτός από οφέλη η ανάπτυξη και ενσωμάτωση των ΜΔ συναντάει και δυνατές προκλήσεις. Αυτές μπορεί να αφορούν περιορισμούς στην διαθέσιμη τεχνολογία, αλλά

και οικονομικούς περιορισμούς. Η ύπαρξη μεγάλου πλήθους πηγών ενέργειας, η έξυπνες συσκευές και η αμφίδρομη επικοινωνία αυξάνουν την πολυπλοκότητα του δικτύου σε μεγάλο βαθμό. Επιπλέον αντιλαμβανόμαστε ότι η ελεύθερη αγορά προσδίδει ένα χαρακτηριστικό αβεβαιότητας όσον αφορά το κόστος επενδύσεων σε μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και ευφυών δικτύων. Μερικές σημαντικές κατηγορίες προκλήσεων είναι και οι παρακάτω:

- Προσβασιμότητα και αποδοχή από τους καταναλωτές. Η έννοια του ενεργού καταναλωτή παίζει σημαντικό ρόλο στην ιδέα ενός ΕΗΔ.
- Η συνύπαρξη πολλών ενεργών μελών στο δίκτυο, δημιουργεί την ανάγκη ανάπτυξης ενός μοντέλου κατανομής ευθυνών, το οποίο θα δημιουργεί ένα αίσθημα ασφάλειας στους πελάτες.
- Ο μεγάλος αριθμός συστημάτων ελέγχου και επιτήρησης δημιουργεί και την ανάλογη πρόκληση για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος και τον απαραίτητο συντονισμό του.
- Διαλειτουργικότητα. Ο ορισμός της IEEE για την διαλειτουργικότητα είναι «η ικανότητα δύο ή περισσότερων συστημάτων ή στοιχείων, να ανταλλάσσουν πληροφορία και να την αξιοποιούν με αποτελεσματικό τρόπο» [21].

Κεφάλαιο 4 Ευφυής έλεγχος και Ασαφής Λογική

4.1 Εισαγωγή στην ασαφή λογική

Όσον αφορά το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η μέθοδος που έχει επιλεχθεί για την διαχείριση ενέργειας του ΜΔ που θα μελετηθεί, είναι ο ευφυής έλεγχος και η αξιοποίηση της ασαφούς λογικής. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει την προσέγγιση ενός προβλήματος βασιζόμενο στην γνώση και την εμπειρία του χειριστή. Είναι δηλαδή μία τεχνική άνευ προτύπου (model free). Κάποια βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ασαφούς λογικής είναι τα παρακάτω [27]:

- Στην ασαφή λογική όλα είναι θέμα βαθμού συμμετοχής.
- Κάθε λογικό σύστημα μπορεί να ασαφοποιηθεί.
- Για την ασαφή λογική, η ακριβολογία θεωρείται περιοριστικός παράγοντας της κατά προσέγγιση λογικής.
- Στην ασαφή λογική η γνώση ερμηνεύεται ως μια συλλογή ελαστικών μεταβλητών
- Η εξαγωγή συμπερασμάτων είναι μια διαδικασία διάδοσης ελαστικών περιορισμών.

4.2 Βασικοί όροι

4.2.1 Ασαφή Σύνολα

Η κεντρική ιδέα που προτείνει η Ασαφής Λογική είναι πως το περιβάλλον αποτελείται από αντικείμενα των οποίων οι ιδιότητες ανήκουν σε περισσότερα του ενός σύνολα, με διαφορετικό βαθμό συμμετοχής στο καθένα [27].

Ως κλασσικό ορίζεται ένα σύνολο, το οποίο αποτελείται από πεπερασμένα ή άπειρα διακριτά στοιχεία. Τα στοιχεία που ανήκουν σε ένα σύνολο καλούνται συνήθως μέλη του συνόλου και μπορούμε μέσω της απαρίθμησης των στοιχείων αυτών να αναπαραστήσουμε το σύνολο στο οποίο ανήκουν. Τα στοιχεία όλων των συνόλων ανήκουν σε ένα μεγαλύτερο σύνολο το οποίο ονομάζουμε υπερσύνολο αναφοράς Ω . Τα στοιχεία του συνόλου αναφοράς Ω μπορούν να ανήκουν ή να μην ανήκουν σε ένα κλασσικό σύνολο A . Σύμφωνα με τα παραπάνω ένα κλασσικό σύνολο A μπορεί να εκφραστεί από την συνάρτηση Boole [28]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \in A' \end{cases} \quad (4.1)$$

Ένα σύνολο ορίζεται ως ασαφές, όταν τα μέλη του έχουν διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής σε αυτό. Οι βαθμοί συμμετοχής των μελών του ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$ και εκφράζεται ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών. Ανάλογα με περίπτωση συνεχών ή διακριτών μεταβλητών, ένα ασαφές σύνολο αναπαρίσταται ως εξής [28]:

$$A = \int \{\mu_A(x)/x\}, \text{ για } x \in X \text{ ή } A = \Sigma\{\mu_A(x)/x\}, \text{ για } x \in X \quad (4.2)$$

4.2.2 Συναρτήσεις συμμετοχής

Όπως ορίσαμε στο κεφάλαιο 4.2.1 (σχέσεις 4.2), ένα ασαφές σύνολο ορίζεται ως ένα σύνολο ζευγών. Το σύνολο X είναι το υπερσύνολο αναφοράς στο οποίο περιέχονται όλα τα αντικείμενα. Η συνάρτηση $\mu_A(x)$ ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής και μας δείχνει τον βαθμό συσχέτισης του συνόλου X με το σύνολο A και παίρνει τιμές στο κλειστό διάστημα $[0,1]$ όπως φαίνεται παρακάτω [28]:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (4.3)$$

Σε αντίθεση με τα ασαφή σύνολα, εάν αναφερόμασταν στα κλασσικά σύνολα η συνάρτηση συμμετοχής στην σχέση (4.3) θα έπαιρνε μόνο τις τιμές 0 ή 1. Δηλαδή ένα στοιχείο x είτε θα ανήκει στο σύνολο A είτε όχι. Αυτή είναι και η ειδοποιός διαφορά ενός κλασσικού και ενός ασαφούς συνόλου.

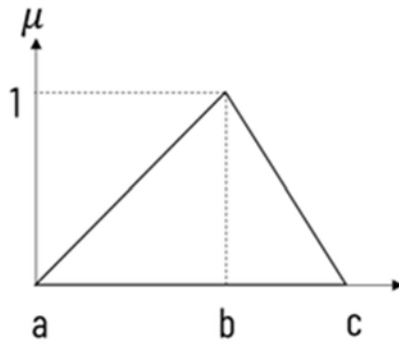
Υπάρχουν διάφορα πρότυπα συναρτήσεων συμμετοχής για την αναπαράσταση ασαφών συνόλων. Οι πιο διαδεδομένες από αυτές είναι οι εξής:

Τριγωνική

Η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής, όπως φαίνεται την εικόνα 4.1, εκφράζεται μέσω 3 παραμέτρων a, b και c . Ανήκει στην κατηγορία των απλών συναρτήσεων καθώς ορίζεται από ευθείες γραμμές. Η μαθηματική σχέση που την εκφράζει είναι η εξής:

$$\mu_{triangle}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & x \in (a, b) \\ \frac{c-x}{c-b}, & x \in (b, c) \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (4.4)$$

Στην εικόνα 4.1 φαίνεται η γραφική παράσταση της σχέσης 4.4.

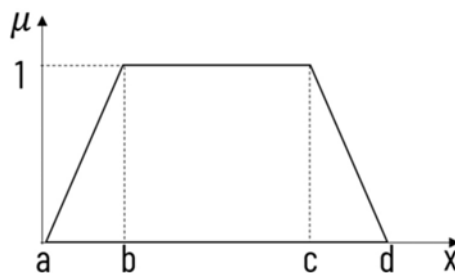


Εικόνα 4.1: Γραφική παράσταση τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής [29]

Τραπεζοειδής

Στις απλές συναρτήσεις συμμετοχής ανήκει και η τραπεζοειδής. Η διαφορά της με την τριγωνική είναι πως ορίζεται από τέσσερις παραμέτρους και η σχέση που την εκφράζει είναι η παρακάτω:

$$\mu_{trapezoidal}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & x \in [a, b] \\ 1, & x \in (b, c) \\ \frac{d-x}{d-c}, & x \in [c, d] \\ 0, & d \leq a \end{cases} \quad (4.5)$$



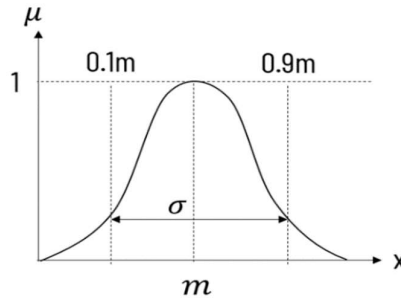
Εικόνα 4.2: Γραφική παράσταση τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής [29]

Γκαουσιανή (Gaussian)

Η γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής βασίζεται στην μορφή της κατανομής Gauss. Το συγκεκριμένο πρότυπο συνάρτησης συμμετοχής, λόγω της ομαλής κατανομής του,

χρησιμοποιείται ευρέως στην θεωρία της ασαφούς λογικής. Καθορίζεται από δύο παραμέτρους την m και την c . Η παράμετρος « σ » καθορίζει το πλάτος την καμπύλης ενώ η « m » είναι το κέντρο της. Η μαθηματική σχέση από την οποία ορίζεται είναι η:

$$\mu_{gaussian}(x) = e^{-\left(\frac{x-m}{2\sigma}\right)^2} \quad (4.5)$$

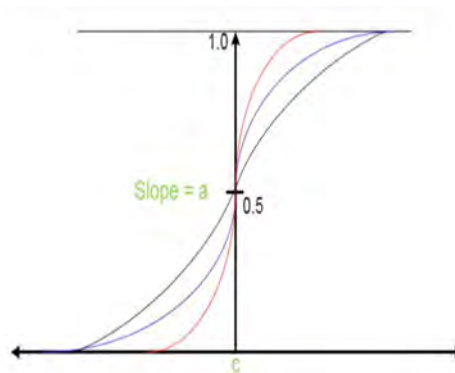


Εικόνα 4.3 Γραφική παράσταση γκαουσιανής συνάρτησης συμμετοχής [29]

Σιγμοειδής

Αν και η γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής έχει ομαλή διακύμανση, υπάρχουν φυσικά προβλήματα τα οποία χρειάζονται ασύμμετρες συναρτήσεις για την περιγραφή τους. Έτσι ορίστηκε η σιγμοειδής συνάρτηση. καθορίζεται οι παράμετροι a , c και περιγράφεται από την μαθηματική σχέση:

$$\mu_{sigmoid}(x) = \frac{1}{1+e^{-a(x-c)}} \quad (4.6)$$



Εικόνα 4.4: Γραφική παράσταση σιγμοειδούς συνάρτησης συμμετοχής [29]

4.2.3 Ιδιότητες ασαφών συνόλων

Όπως ισχύει και στα κλασικά σύνολα έτσι και τα ασαφή έχουν κανόνες που διέπουν τις πράξεις μεταξύ τους και τις ιδιότητες τους. Έχουμε λοιπόν την δυνατότητα να ορίσουμε βασικές ιδιότητες μεταξύ συνόλων όπως οι παρακάτω:

Υποσύνολο

Ένα ασαφές σύνολο A είναι υποσύνολο ενός ασαφούς συνόλου B ($A \subseteq B$), όταν τιμή της συνάρτησης συμμετοχής του A είναι μικρότερη ή ίση από την συνάρτηση συμμετοχής του B για κάθε x :

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x), \forall x \in X \quad (4.7)$$

Κανονικό υποσύνολο

Ένα ασαφές σύνολο A του χώρου αναφοράς X , ονομάζεται κανονικό, αν υπάρχει τουλάχιστον ένα στοιχείο x , για το οποίο η συνάρτηση συμμετοχής του παίρνει την τιμή 1.

$$\text{Αν } \exists x_i \in X: \mu_A(x_i) = 1 \leftrightarrow A = \text{κανονικό υποσύνολο του } X \quad (4.8)$$

Κενό ασαφές σύνολο

Ως κενό ασαφές σύνολο ορίζεται ένα σύνολο A του X , η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής του οποίου είναι παντού 0.

$$\mu_A(x) = 0 \forall x \in X \rightarrow A = \emptyset \quad (4.9)$$

Ισότητα ασαφών συνόλων

Αντίστοιχα, δύο ασαφή σύνολα A και B που ανήκουν στον X , θεωρούνται ίσα όταν η τιμή τιμές των συναρτήσεων συμμετοχής τους είναι ίσες για κάθε x .

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \forall x \in X \leftrightarrow A = B \quad (4.10)$$

4.2.4 Πράξεις με ασαφή σύνολα

Για την καλύτερη κατανόηση των πράξεων μεταξύ ασαφών συνόλων, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε του τελεστές ασαφούς λογικής. Οι τελεστές \min και \max δύο συνόλων A και B , δίνουν ως αποτέλεσμα δύο νέα σύνολα Γ και Δ :

$$\Gamma = A \wedge B = \{\min(a, b)\} \forall a \in A, b \in B \quad (4.11)$$

$$\Gamma = A \vee B = \{\max(a, b)\} \forall a \in A, b \in B \quad (4.12)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως όταν οι τελεστές χρησιμοποιούνται ενιαία, εννοούνται το ελάχιστο (infimum) και το μέγιστο (supremum) όλων των στοιχείων ενός συνόλου.

$$\gamma = \wedge A = \inf(A), a \in A \quad (4.13)$$

$$\gamma = \vee B = \sup(B), a \in B \quad (4.14)$$

Ένωση

Η ένωση δύο συνόλων A και B στο υπερσύνολο αναφοράς X ορίζεται ως:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \forall x \in X \quad (4.15)$$

Τομή

Η τομή δύο συνόλων A και B που ανήκουν στο σύνολο αναφοράς X ορίζεται ως:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \forall x \in X \quad (4.16)$$

Γινόμενο

Το γινόμενο δύο ασαφών συνόλων A και B που ανήκουν στο σύνολο X ορίζεται ως:

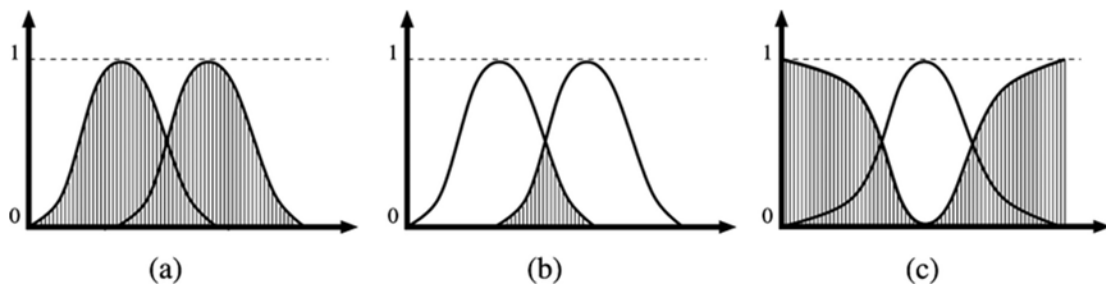
$$\mu_{A \times B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x) \forall x \in X \quad (4.17)$$

Συμπλήρωμα

Το συμπλήρωμα δύο ασαφών συνόλων που ανήκουν στο X ορίζεται ως:

$$\mu_{A'} = 1 - \mu_A(x) \forall x \in X \quad (4.18)$$

Στην εικόνα 4.5 βλέπουμε την γραφική αναπαράσταση της ένωσης, της τομής και του συμπληρώματος δύο ασαφών συνόλων [30].



Εικόνα 4.5: Γραφικές αναπαραστάσεις της ένωσης (a), τομής (b) συμπληρώματος (c) [30]

4.3 Λεκτικοί τελεστές

Στην ασαφή λογική, οι λεκτικοί τελεστές είναι λέξεις ή φράσεις που καθορίζουν τον βαθμό συμμετοχής σε ένα ασαφές σύνολο. Μπορούμε λοιπόν σε μια λεκτική τιμή όπως είναι το «ψηλός» η οποία εκφράζει ένα συνεχές ασαφές σύνολο, να προσθέσουμε τον τροποποιητή «πολύ» ή «λίγο» ώστε να μεταβάλουμε το πεδίο τιμών της (το οποίο είναι ο βαθμός συμμετοχής της). Για παράδειγμα αν έχουμε έναν λεκτικό όρο A και $\mu_A(x)$ την συνάρτηση συμμετοχής του. Με την βοήθεια λεκτικών τελεστών μπορούμε να παράγουμε τους παρακάτω όρους οι οποίοι θα έχουν και τις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής:

- Πολύ λίγο $A \rightarrow \mu_{\text{πολύ λίγο},A}(x) = [\mu_A(x)]^{1,3}$
- Λίγο $A \rightarrow \mu_{\text{λίγο},A}(x) = [\mu_A(x)]^{1,7}$
- Περίπου $A \rightarrow \mu_{\text{περίπου},A}(x) = [\mu_A(x)]^{1,7}$
- Πολύ $A \rightarrow \mu_{\text{πολύ},A}(x) = [\mu_A(x)]^3$
- Πάρα πολύ $A \rightarrow \mu_{\text{πάρα πολύ},A}(x) = [\mu_A(x)]^4$

Οι λεκτικοί τροποποιητές χρησιμοποιούνται για να παρέχουν περισσότερο ακριβείς και φυσικές γλωσσικές εκφράσεις όταν δουλεύουμε με ασαφή σύνολα. Η χρήση τους είναι ευρέως διαδεδομένη σε πεδία μελέτης όπως η γλωσσική επεξεργασία, η επεξεργασία εικόνας και ήχου, τα συστήματα ελέγχου και τα συστήματα λήψης αποφάσεων [28].

4.4 Ασαφείς κανόνες και συνεπαγωγές

Το κλασικό μοντέλο διατύπωσης και επεξεργασίας της γνώσης είναι η Αριστοτέλεια λογική, η οποία εξελίχθηκε στην προτασιακή λογική. Στη προτασιακή λογική βασίζονται και τα σύνολα κανόνων ασαφούς λογικής. Αποτελούνται από ομάδες εκφράσεων υπό συνθήκη (conditional rules) και είναι μια προσπάθεια ορισμού ενός μηχανισμού, βασισμένου στην ανθρώπινη εμπειρία. Όπως φαίνεται παρακάτω η διατύπωση ενός ασαφή κανόνα αποτελείται από δύο μέρη, την υπόθεση και την απόφαση. Στην σχέση αυτή τα A, B, C, D είναι ασαφή σύνολα, x και ψ οι μεταβλητές εισόδου και z και w η έξοδος του συστήματος σύμφωνα με τον κανόνα και τον τρόπο «αποσαφοποίησης» [30]:

$$\text{If } x_1 \text{ is } A \text{ and } x_2 \text{ is } B \text{ then } y_1 \text{ is } C \text{ and } y_2 \text{ is } D \quad (4.19)$$

Η ομαδοποίηση ενός αριθμού τέτοιων προτάσεων μιας δίνουν ένα σύνολο κανόνων ασαφούς λογικής (fuzzy rule set).

Η ασαφής συνεπαγωγή (fuzzy inference) είναι η διαδικασία που χρησιμοποιεί ένα σύνολο ασαφών κανόνων για την διαχείριση ασαφούς πληροφορίας και μπορεί να χωριστεί σε δύο στάδια:

- τον υπολογισμό των συναρτήσεων συμμετοχής βάσει της αξιολόγησης των κανόνων (rule evaluation).
- το άθροισμα των τιμών των συναρτήσεων συμμετοχής που προκύπτουν από την προτασιακή λογική τους (rule aggregation).

Οι πιο διαδεδομένοι τύποι ασαφούς συνεπαγωγής είναι οι Larsen, Mamdani.

Mamdani

Η συνεπαγωγή Mamdani είναι μια απλούστευση της συνεπαγωγής Zadeh στην οποία χρησιμοποιούνται τελεστές *min* και *max*. Η Mamdani χρησιμοποιεί μόνο το τελεστή *min* και ορίζεται ως εξής [30]:

$$R_{Mamdani} = A \times B \quad (4.20)$$

$$\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (4.21)$$

Ο συνδυασμός N εξαρτημένων σχέσεων γίνεται με το συνδετικό *OR* (\vee):

$$R^N = \vee_k R^k, k = 1, 2, \dots, N \quad (4.22)$$

$$\mu_R^N(x, y) = \vee_k (\mu_A^k(x) \wedge \mu_B^k(y)) \quad (4.23)$$

Αυτό είναι το παλαιότερο και απλούστερο FRBM (Fuzzy Rule Based System). Η απλότητα του καθιστά την εφαρμογή του σε υπολογιστικά συστήματα εξαιρετικά εύκολη και με χαμηλό κόστος. Αυτός είναι και ο λόγος που είναι η χρήση του είναι δημοφιλής σε ευρεία κλίμακα. Από οικιακές συσκευές όπως πλυντήρια, μέχρι τεράστια βιομηχανικά μηχανήματα όπως γερανοί και αυτόματοι οδηγοί τρένων. Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε ως βάση της παρούσας διπλωματικής.

Larsen

Ευρείας αποδοχής λόγω της απλότητας της χαίρει και η συνεπαγωγή Larsen, η οποία χρησιμοποιεί το αριθμητικό γινόμενο κατά τον υπολογισμό του καρτεσιανού γινομένου και ορίζεται ως [28]:

$$R_{Larsen} = A \times B \quad (4.24)$$

$$\mu_R(x, y) = (\mu_A(x) * \mu_B(y)) \quad (4.25)$$

Ο συνδυασμός N εξαρτημένων σχέσεων γίνεται και εδώ με το συνδυαστικό OR (\vee):

$$R^N = \vee_k R^k, k = 1, 2, \dots, N \quad (4.26)$$

$$\mu_R^N(x, y) = \vee_k (\mu_A^k(x) \cdot \mu_B^k(y)) \quad (4.27)$$

4.5 Αποσαφοποίηση (Defuzzification)

Το αποτέλεσμα (output) ενός συστήματος ασαφούς συνεπαγωγής είναι ένα ασαφές σύνολο (fuzzy output set). Ωστόσο σε κάθε έξοδο ενός τέτοιου συστήματος υπονοείται η ύπαρξη μιας αριθμητικής τιμής (crisp value). Η διαδικασία, κατά την οποία μια ασαφής έξοδος μεταφράζεται σε μια αριθμητική τιμή, ονομάζεται αποσαφοποίηση.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αποσαφοποίησης, όμως η αριθμητική τιμή της εξόδου (crisp value) υπολογίζεται συνήθως σύμφωνα με την κεντροειδή μέθοδο (Center Of Area). Η μαθηματική σχέση που την ορίζει είναι η:

$$u_c(x_k, y_k) = \frac{\sum_i u_i \cdot \mu_u(x_k, y_k, u_i)}{\sum_i \mu_u(x_k, y_k, u_i)} \quad (4.28)$$

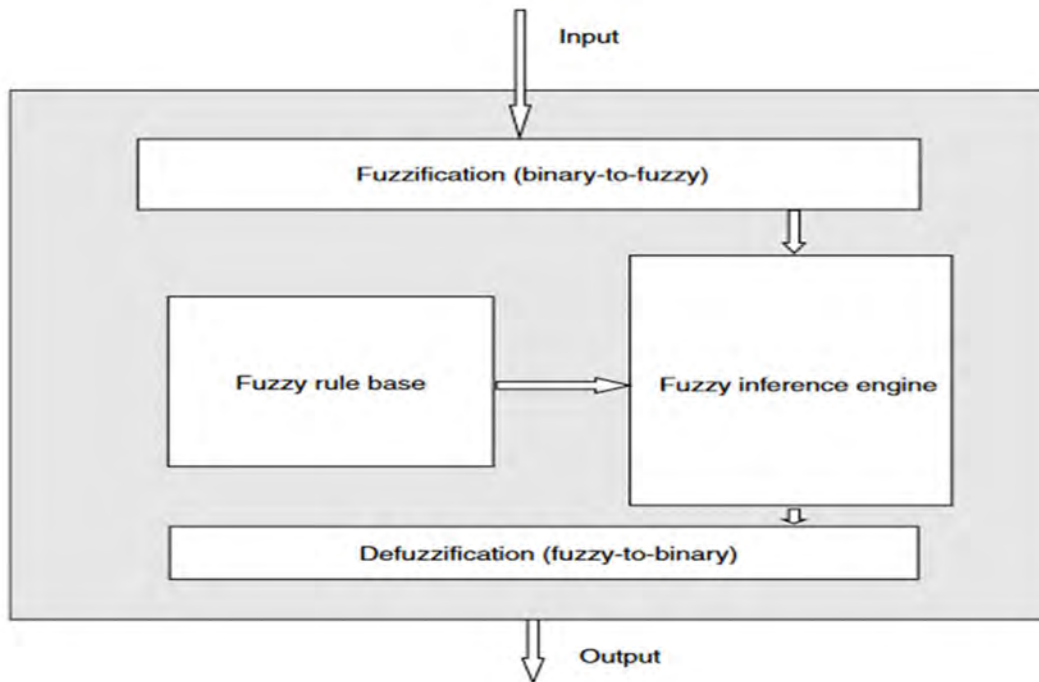
Όπου u_c αριθμητική τιμή της εξόδου του ασαφούς ελεγκτή, u_i είναι ένα διακριτό στοιχείο μιας εξόδου που εκφράζεται ως ασαφές σύνολο (fuzzy output set) και $\mu_u(x_k, y_k, u_i)$ η συνάρτηση συμμετοχής του. Η σχέση (4.28) είναι η διακριτή μορφή της κεντροειδούς μεθόδου. Εάν έχουμε συνεχείς μεταβλητές στο πρόβλημά μας τότε στην αντικαθιστούμε τα αθροίσματα της εξίσωσης με ολοκληρώματα [31].

4.6 Ασαφείς ελεγκτές

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, απαραίτητα συστατικά στοιχεία ενός μικροδικτύου είναι τα όργανα ευφυούς ελέγχου. Σε αυτήν την κατηγορία κατατάσσονται και οι Ασαφείς Ελεγκτές (fuzzy controllers). Το είδος της δομής ενός ασαφούς ελεγκτή εξαρτάται κυρίως από την μορφή και τις απαιτήσεις της διαδικασίας ελέγχου. Δεδομένου ότι τα πεδία εφαρμογής τους ποικίλουν, είναι αναμενόμενο η δομή ενός ασαφούς ελεγκτή να πραγματοποιείται με αντίστοιχα πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος δύο ασαφείς ελεγκτές μπορεί να διαφέρουν στον αριθμό εισόδων και εξόδων τους, στο μέγεθος και την διατύπωση του συνόλου των κανόνων τους,

το είδος ασαφούς συνεπαγωγής και την μέθοδο αποσαφοποίησης που χρησιμοποιούν. Η μεγάλη αυτή ποικιλία επιλογών είναι στην διάθεση του σχεδιαστή, ώστε να αποφασίσει την βέλτιστη υλοποίηση του συστήματος. Η τυπική δομή ενός ασαφούς ελεγκτή αποτελείται από τα εξής στοιχεία [31]:

- Ασαφοποιητής εισόδου (input fuzzification): Στο στάδιο αυτό οι φυσικές μεταβλητές μετατρέπονται στην γλώσσα των ασαφών συνόλων. Παρόλο που υπάρχουν αναλογικοί ασαφείς ελεγκτές στην αγορά, η πλειοψηφία των υλοποιήσεων που χρησιμοποιούνται είναι ψηφιακές.
- Βάση κανόνων (Fuzzy rule base): Αποτελείται από το σύνολο των ασαφών κανόνων και αντανακλά την συλλογική γνώση σχετικά με τον τρόπο αντιμετώπισης ενός προβλήματος. Ονομάζεται και βάση γνώσης και είναι η καρδιά του ασαφούς ελεγκτή.
- Μηχανισμός συμπερασμού (Inference engine): Περιλαμβάνει την μέθοδο ασαφούς συνεπαγωγής.
- Αποσαφοποιητής εξόδου (Output defuzzification) : Οι έξοδοι του συστήματος ως ασαφή σύνολα μεταφράζονται σε αριθμητικές τιμές μέσω της διαδικασίας αποσαφοποίησης. Αυτές οι τιμές είναι χρήσιμες για τον χειριστή του και έτοιμα για επεξεργασία από τα διάφορα εργαλεία ελέγχου και επιτήρησης του δικτύου. Η τυπική μορφή ενός ασαφούς ελεγκτή φαίνεται στην εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.6 Τυπική δομή ενός ασαφούς ελεγκτή [31]

Κεφάλαιο 5 Σίφνος: Ανάλυση της υπό μελέτη περιοχής

5.1 Εισαγωγή

Η τοποθεσία που επιλέχθηκε για την παρούσα εργασία είναι το νησί της Σίφνου. Η Σίφνος, για όσους δεν γνωρίζουν, βρίσκεται στις δυτικές Κυκλάδες ανάμεσα στην Σέριφο και την Κίμωλο. Σύμφωνα με την απογραφή του 2011 έχει μόνιμο πληθυσμό 2.625 κατοίκους. Όπως και σε πολλά άλλα νησιά του Αιγαίου η οικονομία της Σίφνου στηρίζεται κατά 90% στον τουρισμό. Στην εικόνα 5.1 φαίνεται ο χάρτης της Σίφνου.



Εικόνα 5.1: Χάρτης της Σίφνου [32]

5.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

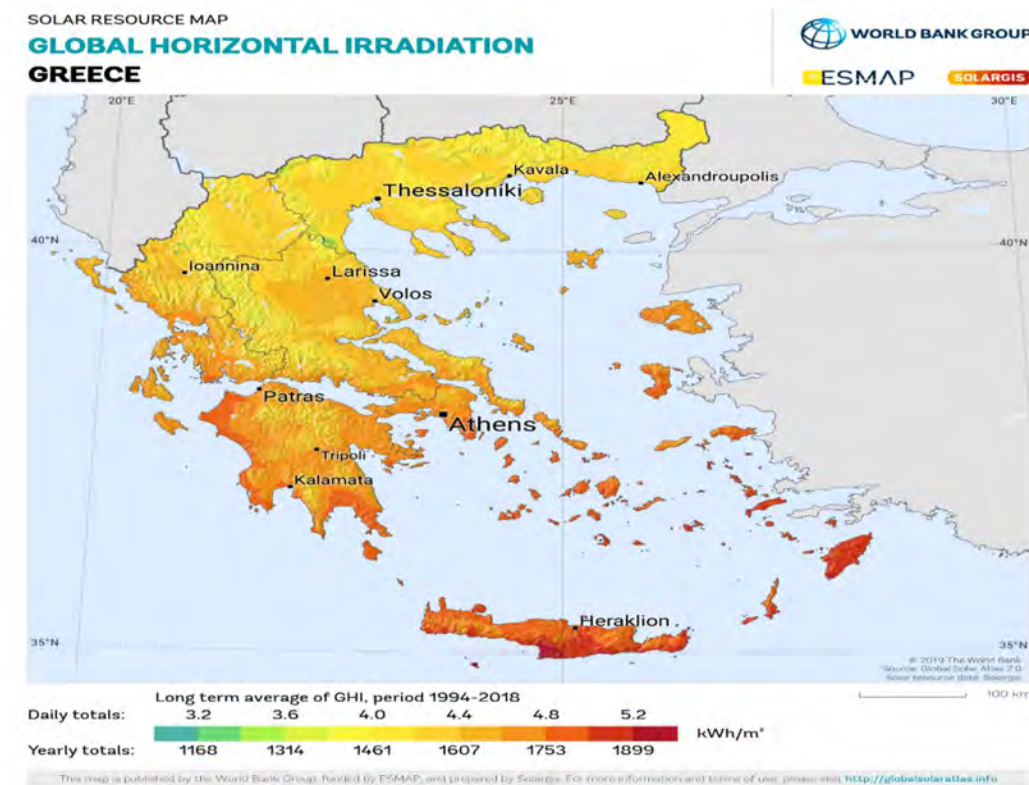
5.2.1 Ηλιακό δυναμικό

Η Ελλάδα ανήκει στις χώρες που παρουσιάζουν έντονη ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια του χρόνου, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες αλλά και τη χειμερινή περίοδο. Ο κυκλαδικός

χώρος στον οποίο βρίσκεται η Σίφνος δεν αποτελεί εξαίρεση. Στην εικόνα 5.2 φαίνεται ο χάρτης της μέσης ετήσιας και μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (Global Horizontal Irradiance) για την περίοδο 1994-2018. Η Global Horizontal Irradiance είναι η μονάδα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια μονάδα οριζόντιας επιφάνειας, μετριέται σε W/m^2 και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδα ΦΒ πάνελ. Ο μαθηματικός τύπος που την εκφράζει είναι ο παρακάτω:

$$GHI = DHI + DNI \times \cos(Z) \quad (6.1)$$

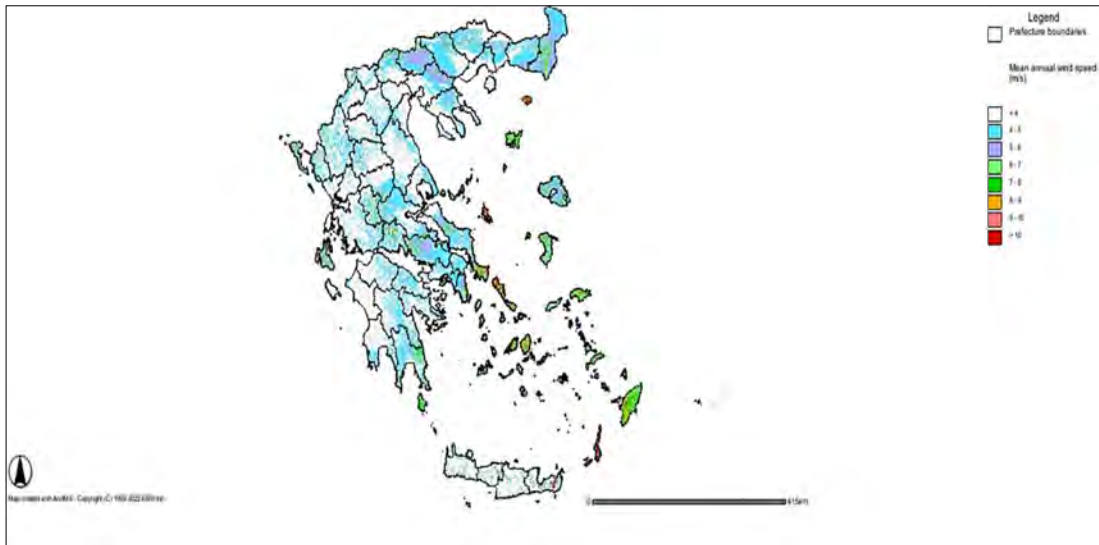
όπου DNI (Direct Normal Irradiance) είναι η άμεση ακτινοβολία, DHI (Diffuse Horizontal Irradiance) διάχυτη ακτινοβολία και Z η ηλιακή γωνία ζενίθ. Η γενική μορφή της εξίσωσης (6.1) περιλαμβάνει και την ανακλώμενη ακτινοβολία. Ωστόσο επειδή τα επίπεδα ανακλώμενης ακτινοβολίας είναι αμελητέα σε σχέση με την διάχυτη και την άμεση, χρησιμοποιείται η προαναφερθείσα μορφή για πρακτικούς [33].



Εικόνα 5.2: Χάρτης της μέσης ημερήσιας και μέσης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα (Global Horizontal Irradiance) [33] [34]

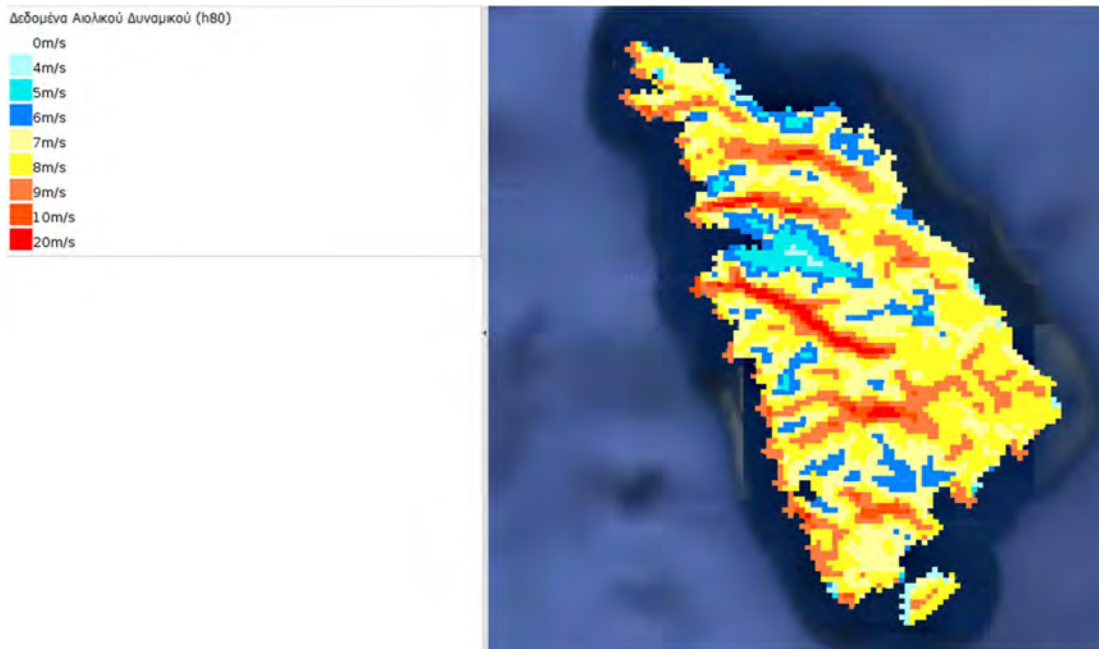
5.2.2 Αιολικό δυναμικό

Η Σίφνος, όπως και γενικότερα η Ελλάδα, παρουσιάζει σημαντικό αιολικό δυναμικό. Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3 η μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας του ανέμου για το μεγαλύτερο κομμάτι της χώρας μας είναι άνω των 4 m/s, ενώ υπάρχουν περιοχές στις οποίες οι άνεμοι μπορούν να αγγίξουν αλλά και να ξεπεράσουν την ταχύτητα των 10 m/s.



Εικόνα 5.3: Χάρτης αιολικού δυναμικού της Ελλάδας [34]

Συγκεκριμένα για την Σίφνος διακρίνουμε στον χάρτη της εικόνας 5.4 τις μέσες ετήσιες τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 80 μέτρων. Η χαμηλότερη τιμή που παρατηρούμε στο νησί είναι τα 4 m/s ενώ η πλειονότητα των περιοχών παρουσιάζουν τιμές άνω των 8 m/s, δεδομένα που καθιστούν το αιολικό δυναμικό της περιοχής επαρκές για αξιοποίηση στις ανεμογεννήτριες των αιολικών πάρκων. Αντίστοιχες μετρήσεις σε μεγαλύτερα υψόμετρα, όπως στα εκατό και τα διακόσια μέτρα δίνουν ακόμα μεγαλύτερες μέσες τιμές. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν πως η Σίφνος έχει πολλές δυνατότητες εκμετάλλευσης των φυσικών του ενεργειακών πόρων. Οι δυνατότητες αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν στο έπακρο από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής σε συνδυασμό με τα μεγάλα ποσοστά διεύθυνσης, που υπόσχεται ένα έξυπνο μοντέλο διαχείρισης της ενέργειας του νησιού. Άλλωστε και σε μεγάλες ενεργειακές προτάσεις, όπως θα αναφερθεί στο κεφάλαιο 5.3, η αιολική ενέργεια παίζει κομβικό ρόλο στην αυτονομία και την κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί.



Εικόνα 5.4 Χάρτης αιολικού δυναμικού Σίφνου [35]

5.3 Υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του νησιού γίνεται κυρίως από τον θερμοηλεκτρικό σταθμό, στον οποίο έχουν εγκατασταθεί 9 γεννήτριες ονομαστικής ισχύος 1,1 MW η κάθε μία, και οι οποίες καταναλώνουν ελαφρύ καύσιμο (ντίζελ). Επιπλέον έχουν εγκατασταθεί 335 kW αποκεντρωμένων ΦΒ σταθμών καθώς και ένα αιολικό πάρκο με ονομαστική ισχύ 1,26 MW, τα οποία συνεισφέρουν στην παραγωγή ενέργειας με ποσοστά διείσδυσης 2,5% και 16,7% αντίστοιχα [36].

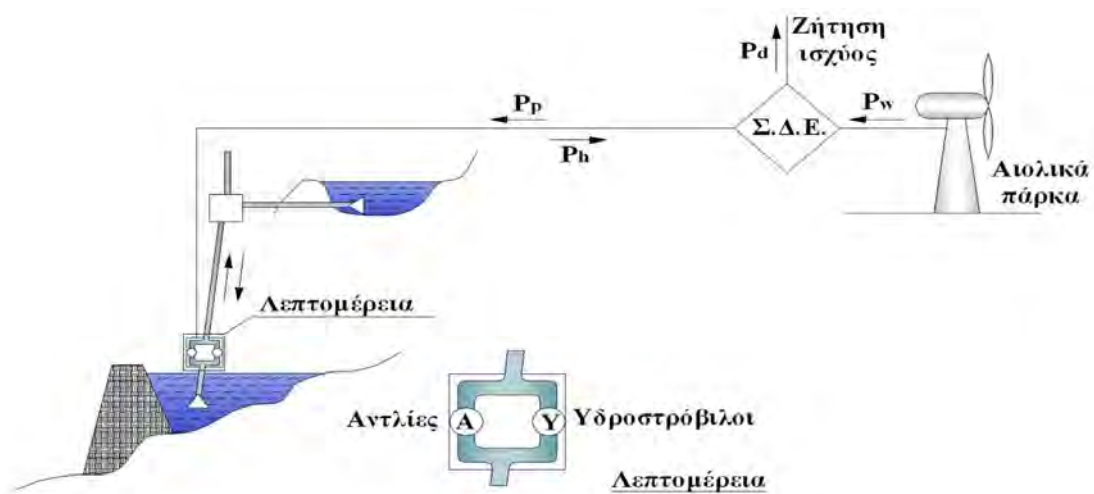
Η Σίφος ανήκει στα μη διασυνδεδεμένα νησιά του του ελληνικού ΣΗΕ. Ως Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά, σύμφωνα με την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, «χαρακτηρίζονται τα νησιά της Ελληνικής Επικράτειας, των οποίων το Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας δεν συνδέεται με το Σύστημα Μεταφοράς ή το Δίκτυο Διανομής της ηπειρωτικής χώρας». Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας των ΜΔΝ περιλαμβάνει 29 αυτόνομα συστήματα ορισμένα εκ των οποίων αποτελούνται από συμπλέγματα νησιών και το και μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος τους:

- Μικρά αυτόνομα συστήματα: Πρόκειται για συστήματα των οποίων η αιχμή ζήτησης δεν ξεπερνάει τα 10 MW. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται 19 αυτόνομα συστήματα.

- Συστήματα μεσαίου μεγέθους: Σε αυτήν την κατηγορία βρίσκονται συνολικά 8 συστήματα με αιχμή ζήτηση από 10 MW και μικρότερη των 100 MW.
- Μεγάλα αυτόνομα συστήματα: Αυτά δεν είναι τα συστήματα της Κρήτης και της Ρόδου, των οποίων η αιχμή ζήτησης ξεπερνά τα 100 MW.

Με την Α΄ Φάσης Διασύνδεσης των Κυκλάδων τον Μάρτιο του 2018, κατά την οποία συνδέθηκαν στο Ηπειρωτικό Σύστημα, η Σύρος, η Μύκονος, η Πάρος και η Νάξος μεταβλήθηκε ουσιαστικά σε ο τρόπος ηλεκτροδότησης των ΜΔΝ στην χώρα μας. Την έναρξη του σχεδίου διασύνδεσης ακολούθησε η Β΄ και η Γ΄ φάση, ενώ τώρα βρισκόμαστε στην Δ΄ φάση. Ωστόσο ο μεγάλος αριθμός ΜΔΝ παραμένει. Τα συστήματα των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών τροφοδοτούνται από τοπικούς σταθμούς παραγωγής της ΔΕΗ, οι οποίοι λειτουργούν με καύσιμο πετρέλαιο. Σημαντική είναι η ύπαρξη ΑΠΕ, κυρίως αιολικών αλλά και φωτοβολταϊκών πάρκων, η διεύθυνση των οποίων όμως κινείται σε χαμηλά ποσοστά. Στον πίνακα 5.1 διακρίνουμε τα ηλεκτρικά συστήματα των ΜΔΝ στην Ελλάδα, όπως αυτά δίνονται από τον ΔΕΔΔΗΕ για τον Ιούλιο του 2018 [20].

Το 2021 εκπονήθηκε μια μελέτη, από μέλη του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου Κρήτης και μέλη της Συνεταιριστικής Εταιρείας Σίφνου, η οποία παρουσιάζει την οικονομική βιωσιμότητα και τις αναπτυξιακές προοπτικές ενός υβριδικού σταθμού στο νησί. Χάρη στην ιδέα για έναν τέτοιο σταθμό, η Σίφος επιλέχθηκε ως ένα από τα 6 πρώτα νησιά, για το πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης «Καθαρή Ενέργεια για τα νησιά της Ευρωπαϊκής Ένωσης». Στην εικόνα 5.5 φαίνεται μια σχηματική απεικόνιση του σταθμού.



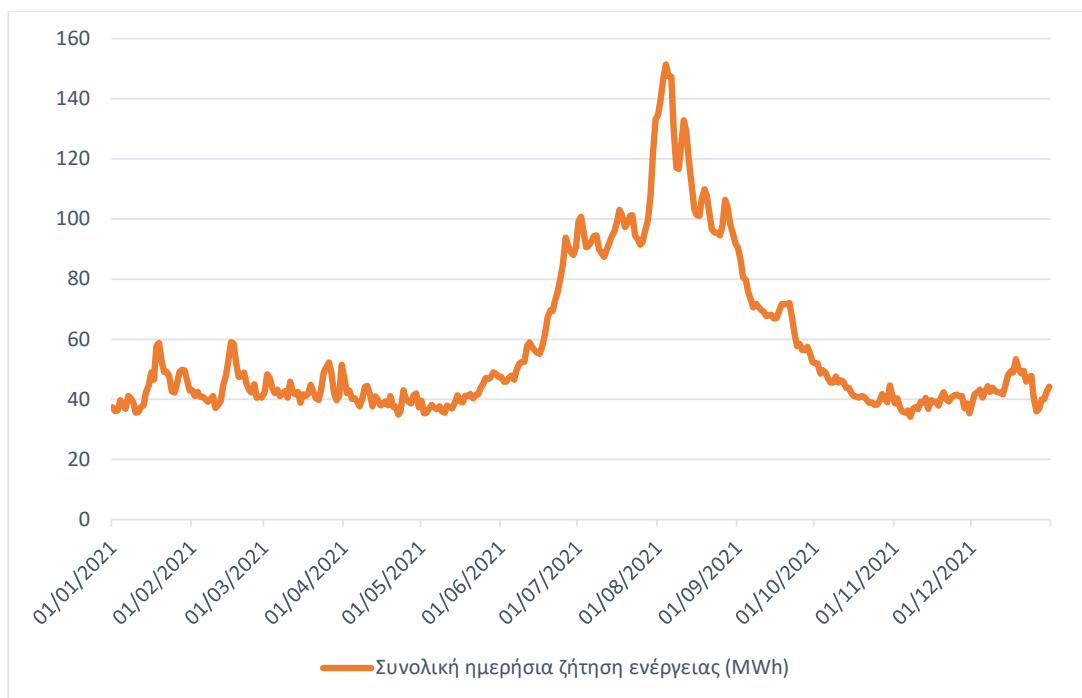
Εικόνα 5.5: Λειτουργική δομή υβριδικού σταθμού Σίφνου εγγυημένης ισχύος 8 MW [11]

Πίνακας 5.1 Ηλεκτρικά συστήματα ΜΔΝ [20]

α/α	Ηλεκτρικό	Νησί
1	ΑΓ.ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ	ΑΓ.ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ
2	ΑΓΑΘΟΝΗΣΙ	ΑΓΑΘΟΝΗΣΙ
3	ΑΜΟΡΓΟΣ	ΑΜΟΡΓΟΣ
4	ΑΝΑΦΗ	ΑΝΑΦΗ
5	ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΑ	ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΑ
6	ΑΡΚΙΟΙ	ΑΡΚΙΟΙ
		ΜΑΡΑΘΙ
7	ΑΣΤΥΠΑΛΛΑΙΑ	ΑΣΤΥΠΑΛΛΑΙΑ
8	ΓΑΥΔΟΣ	ΓΑΥΔΟΣ
9	ΔΟΝΟΥΣΑ	ΔΟΝΟΥΣΑ
10	ΕΡΕΙΚΟΥΣΑ	ΕΡΕΙΚΟΥΣΣΑ
11	ΘΗΡΑ	ΘΗΡΑ
		ΘΗΡΑΣΙΑ
12	ΙΚΑΡΙΑ	ΙΚΑΡΙΑ
13	ΚΑΡΠΑΘΟΣ	ΚΑΡΠΑΘΟΣ
		ΚΑΣΟΣ
14	ΚΡΗΤΗ	ΚΡΗΤΗ
15	ΚΥΘΝΟΣ	ΚΥΘΝΟΣ
16	ΚΩΣ - ΚΑΛΥΜΝΟΣ	ΚΩΣ
		ΨΕΡΙΜΟΣ
		ΓΥΑΛΙ
		ΚΑΛΥΜΝΟΣ
		ΛΕΡΟΣ
		ΛΕΙΨΟΙ
		ΤΕΛΕΝΔΟΣ
		ΝΙΣΥΡΟΣ
ΤΗΛΟΣ		
17	ΛΕΣΒΟΣ	ΛΕΣΒΟΣ
		ΜΕΓΑΛΟΝΗΣΙ
18	ΛΗΜΝΟΣ	ΛΗΜΝΟΣ
19	ΜΕΓΙΣΤΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ
20	ΜΗΛΟΣ	ΜΗΛΟΣ
		ΚΙΜΩΛΟΣ
21	ΟΘΩΝΟΙ	ΟΘΩΝΟΙ
22	ΠΑΤΜΟΣ	ΠΑΤΜΟΣ
23	ΡΟΔΟΣ	ΡΟΔΟΣ
		ΧΑΛΚΗ
24	ΣΑΜΟΣ	ΣΑΜΟΣ
		ΦΟΥΡΝΟΙ
		ΘΥΜΑΙΝΑ
25	ΣΕΡΙΦΟΣ	ΣΕΡΙΦΟΣ
26	ΣΙΦΝΟΣ	ΣΙΦΝΟΣ
27	ΣΚΥΡΟΣ	ΣΚΥΡΟΣ
28	ΣΥΜΗ	ΣΥΜΗ
29	ΧΙΟΣ	ΧΙΟΣ
		ΟΙΝΟΥΣΣΕΣ
		ΨΑΡΑ

5.4 Ζήτηση ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 5.1, η Σίφνος είναι ένα νησί μεσαίας έκτασης με μόνιμο πληθυσμό 2.625 κατοίκους. Ως εκ τούτου η απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών του νησιού είναι σχετικά χαμηλή. Η εξάρτηση του νησιού από τον τουριστικό τομέα διαμορφώνει και την διακύμανση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί, η αιχμή της οποίας παρατηρείται να είναι υψηλότερη τους καλοκαιρινούς μήνες. Αντλώνοντας πληροφορίες, για τις ημερήσιες τιμές της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος από τα στοιχεία Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού για τα ΜΔΝ δημιουργήθηκε το διάγραμμα της εικόνας 5.6., στο οποίο απεικονίζεται η καμπύλη συνολικής ημερήσιας ζήτησης φορτίου του νησιού [20].



Εικόνα 5.6: Συνολική ημερήσια ζήτηση φορτίου στο νησί της Σίφνου για το έτος 2021 [20]

Οι ημέρες του χρόνου με την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της ημερήσιας ζήτησης είναι η 4^η Αυγούστου και η 7^η Νοεμβρίου, όπου τα επίπεδα ζήτησης διαμορφώνονται στις 151.45 και MWh 34.18 MWh αντίστοιχα. Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως σε σχέση με την χειμερινή περίοδο η ζήτηση ενέργειας του καλοκαιρινούς μήνες είναι μεγαλύτερη κατά 46%.

Κεφάλαιο 6 Το μοντέλο της προσομοίωσης

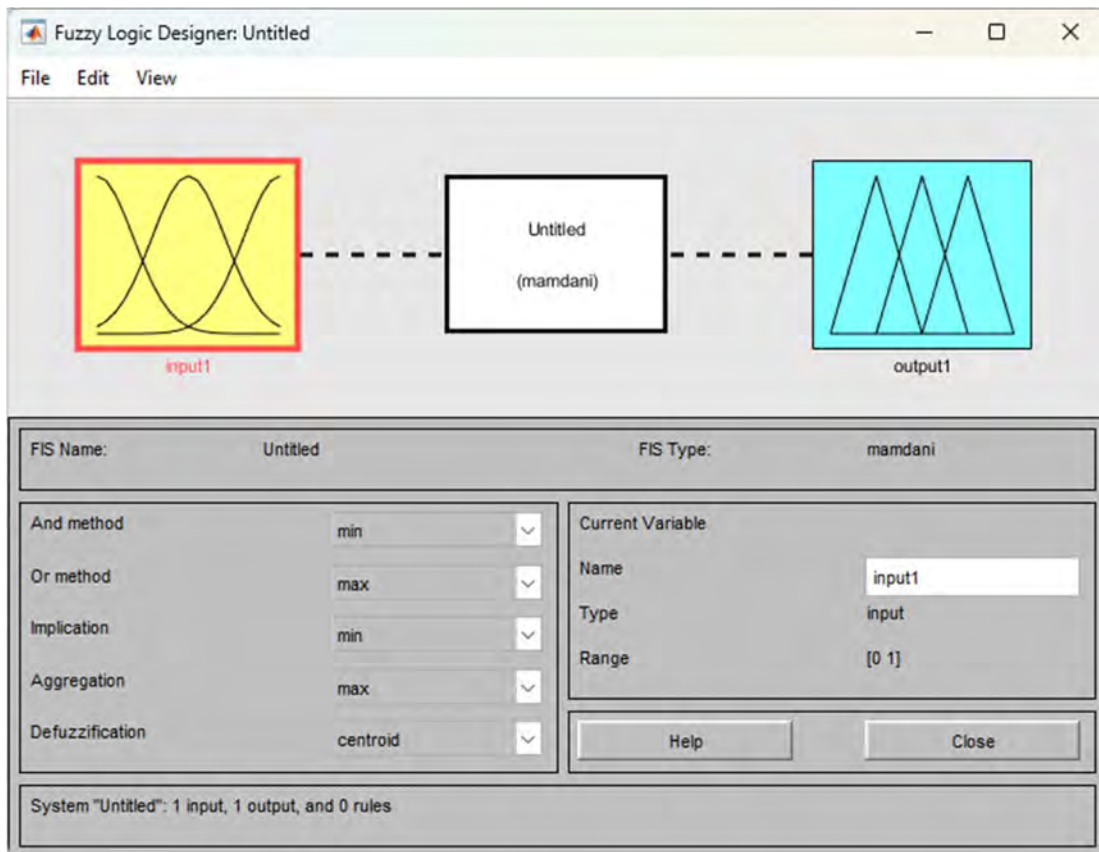
6.1 Εισαγωγή

Η πλειονότητα των ελληνικών νησιών διαθέτει πλούσιο αιολικό και ηλιακό δυναμικό και συνεπώς το ενδιαφέρον για επενδύσεις στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι συνεχώς αυξανόμενο. Υπάρχουν ωστόσο εμπόδια στην ενσωμάτωση τους στο δίκτυο διανομής ενέργειας. Ιδιαίτερα στην περίπτωση των αιολικών πάρκων όπου η παραγόμενη ισχύς μπορεί να παράγεται ώρες που δεν μπορεί να απορροφήθει από το δίκτυο ή να μην είναι διαθέσιμη τις ώρες αιχμής. Αυτός είναι και ένας λόγος που τίθενται περικοπές αιολικής ισχύος ανάλογα με το προφίλ ενεργειακής ζήτησης και το μέγεθος εγκατεστημένης ισχύος. Συνεπώς η ανάγκη για σωστή πρόβλεψη και έξυπνη διαχείριση είναι πιο αναγκαία από ποτέ [37].

Το σύστημα μας λειτουργεί αυτόνομα χωρίς σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο ενέργειας καθώς η Σίφνος ανήκει στα ΜΔΝ και αποτελείται από:

- Ένα (1) φωτοβολταϊκό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 335kW.
- Ένα (1) αιολικό πάρκο ονομαστικής ισχύος 3.2 MW.
- Δύο (2) συστήματα αποθήκευσης ενέργειας 2MWh, εκ των οποίων το ένα είναι εφεδρικό.
- Εννέα (9) διαθέσιμες μονάδες ΣΗΘ (CHP).

Η συμπεριφορά του συστήματος βάσει των καιρικών συνθηκών και της ζήτησης φορτίου, θα μελετηθεί με την βοήθεια του λογισμικού MATLAB και συγκεκριμένα με το εργαλείο Fuzzy Logix Toolbox. Όπως θα αναλυθεί παρακάτω θα σχεδιαστούν δύο ασαφείς ελεγκτές. Ο πρώτος ελεγκτής θα λαμβάνει ως εισόδους τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η παραγωγή ισχύος από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και θα υπολογίζει μέσω του συστήματος ασαφούς συμπερασμού την εκτιμώμενη παραγόμενη ενέργεια. Ο δεύτερος ελεγκτής θα έχει ως εισόδους τα εκτιμώμενα επίπεδα παραγωγής ισχύος από τις ΑΠΕ και θα ελέγχει την κάλυψη της ζήτησης από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Για την χρήση του Fuzzy Logic Toolbox είναι απαραίτητη η πρόσβαση στο πρόγραμμα MATLAB. Εκτελώντας την εντολή «fuzzy» ανοίγει ένα νέο παράθυρο το οποίο ανήκει στο Fuzzy Logic Toolbox και απεικονίζει ένα Σύστημα Ασαφούς Συμπερασμού όπως φαίνεται στην εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1: Αρχική οθόνη Fuzzy Logic Toolbox στο λογισμικό MATLAB

Για την απόκτηση των δεδομένων στα οποία θα βασιστούν οι τιμές των εισόδων, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα POWER (Prediction of Worldwide Energy Resource) της NASA [38]. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως, επειδή το υφιστάμενο αιολικό πάρκο και το υφιστάμενο ΦΒ πάρκο βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία του νησιού, οι συντεταγμένες βάσει των οποίων αποκτήθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα για το ΦΒ πάρκο (Γεωγραφικό πλάτος: 36.9500° και Γεωγραφικό μήκος: 24.7503°) είναι διαφορετικές από αυτές του αιολικού πάρκου (Γεωγραφικό πλάτος: 37.0340° και Γεωγραφικό μήκος: 24.6592°).

6.2 Υλοποίηση ελεγκτή για την παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ

Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη του μοντέλου είναι η δημιουργία ενός ασαφούς ελεγκτή, ο οποίος θα έχει έξι εισόδους, βάσει των οποίων καθορίζονται η παραγωγή ενέργειας από την Α/Γ και τα ΦΒ στοιχεία. Οι δύο έξοδοι του ελεγκτή θα είναι τα επίπεδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το αιολικό πάρκο και την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Στην

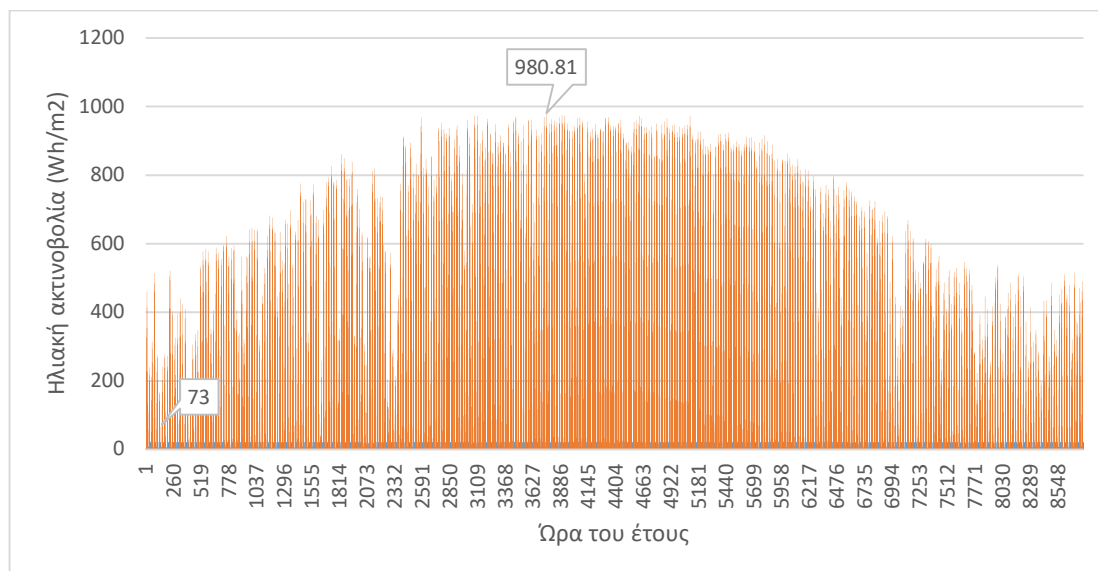
συνέχεια θα αναλυθούν οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου και θα οριστούν συναρτήσεις συμμετοχής για κάθε μία από αυτές.

6.2.1 Μεταβλητές εισόδου

Όπως αναλύεται στη συνέχεια, η παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών στοιχείων εξαρτάται από πέντε παραμέτρους. Τα ποσοστά της ηλιακής ακτινοβολίας, την θερμοκρασία των ηλιακών κελιών, την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος εγκατάστασης και φυσικά τις συνθήκες σκίασης των πάνελ. Η παραγωγή ενέργειας των ανεμογεννητριών επηρεάζεται από τις υπόλοιπες δύο παραμέτρους, οι οποίες είναι η ταχύτητα του ανέμου σε μεγαλύτερο ύψος και η γωνία του πτερυγίου.

Ηλιακή ακτινοβολία (Solar radiation)

Όπως αναφέρθηκε στα κεφάλαια 2 και 5, η παραγωγή ενέργειας ενός ΦΒ επηρεάζεται άμεσα από την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, για σταθερή θερμοκρασία.. Αντλώντας δεδομένα από το πρόγραμμα POWER, δημιουργήθηκε το διάγραμμα της εικόνας 6.2. Στο διάγραμμα αυτό διακρίνουμε τις ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας για το έτος 2020, με την μέγιστη τιμή 980 Wh/m^2 να παρουσιάζεται τον μήνα Ιούνιο.



Εικόνα 6.2: Μέσες ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (Solar Irradiance) για το έτος 2020

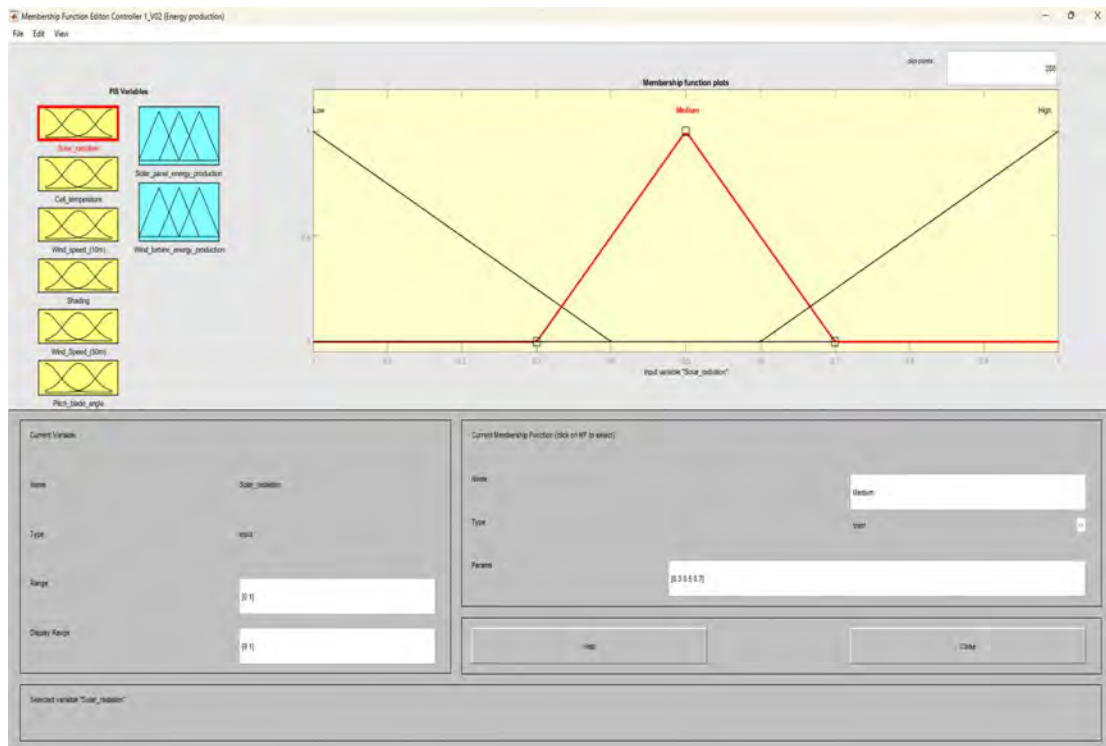
[38]

Τα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες. Χαμηλά, μέτρια και υψηλά. Επίπεδα μικρότερα των 0.325 kW/m^2 θεωρούνται χαμηλά, ενώ μεγαλύτερα από 0.5 kW/m^2 αξιολογούνται ως αρκετά υψηλά [39]. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω σχηματίστηκαν τα επίπεδα των συναρτήσεων συμμετοχής του πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής για την ηλιακή ακτινοβολία

Λεκτικοί Τελεστές	Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής
Χαμηλή (Low)	0.0-0.4
Μέτρια (Medium)	0.3-0.7
Υψηλή (High)	0.6-1.0

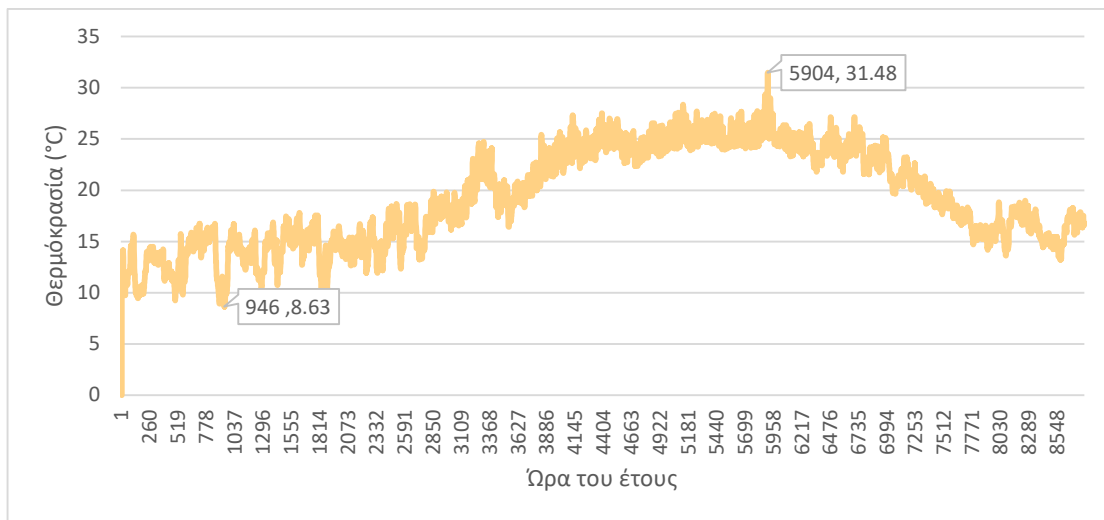
Ο βέλτιστος τύπος συνάρτησης συμμετοχής (membership function) για την ηλιακή ακτινοβολία είναι η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής. Αξίζει να προσθέσουμε ότι η και η τραπεζοειδής θα έδινε εξίσου αξιόπιστα αποτελέσματα [40].



Εικόνα 6.3: Είσοδος 1^{ου} ελεγκτή: Ηλιακή ακτινοβολία (Solar radiation)

Θερμοκρασία κελιού (Cell temperature)

Η θερμοκρασία κελιού είναι ακόμη ένας παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2 ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο παρουσιάζει μειωμένη απόδοση όταν λειτουργεί σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες από εκείνες των προδιαγραφών λειτουργίας του. Με τη βοήθεια του προγράμματος POWER σχηματίστηκε το διάγραμμα της εικόνας 6.4 στο οποίο φαίνονται οι μέσες ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας στην Σίφνο για το έτος 2020. Η μέγιστη και η ελάχιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία είναι 31,48°C και 8,63°C αντίστοιχα.



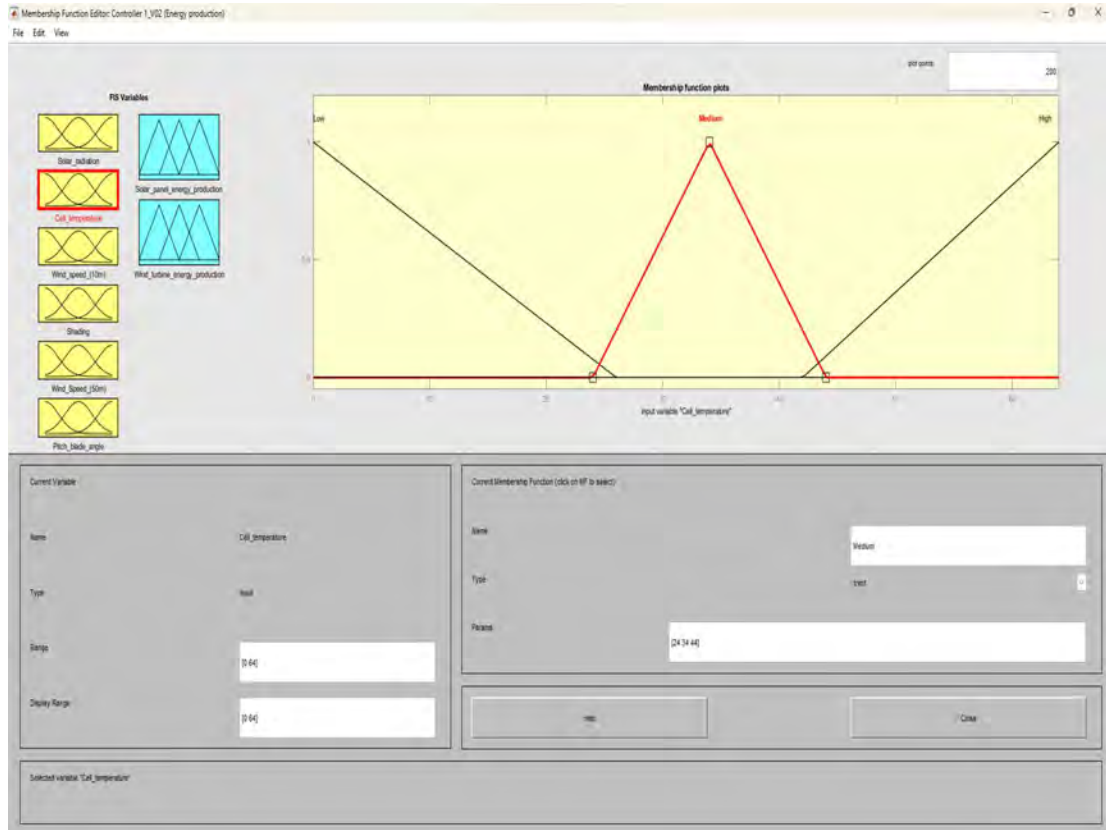
Εικόνα 6.4: Μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας στην Σίφνο για το έτος 2020 [38]

Η επιφάνεια ενός ΦΒ στοιχείου, κατά την έκθεση του στην ηλιακή ακτινοβολία, εμφανίζει μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η μέση θερμοκρασία ενός κελιού μπορεί να είναι έως και 30 βαθμούς μεγαλύτερη από την θερμοκρασία πρότυπων συνθηκών του (Standard Test Conditions-STC). Έτσι επιλέχθηκαν τα δεδομένα του πίνακα 6.2 [41] [42].

Πίνακας 6.2: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής για την θερμοκρασία κελιού

Λεκτικοί Τελεστές	Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής
Χαμηλή (Low)	0-26
Μέτρια (Medium)	24-44
Υψηλή (High)	42-64

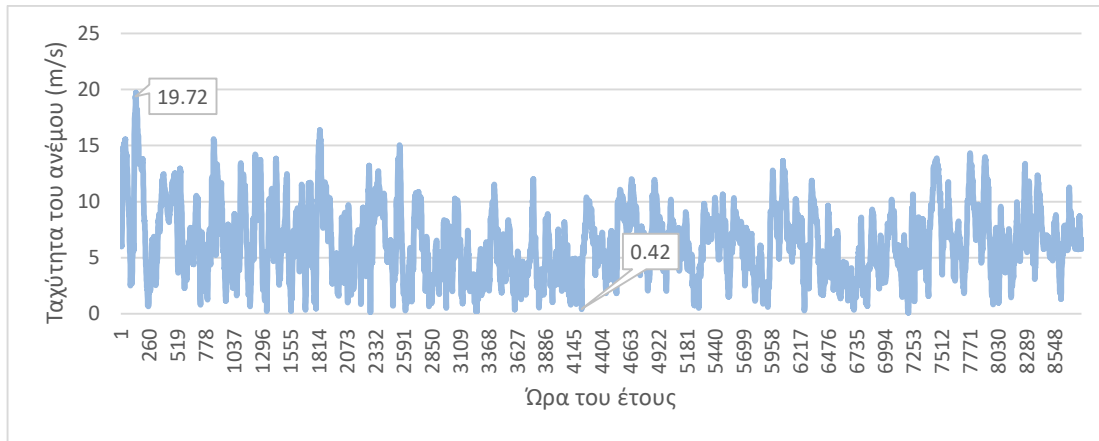
Όπως και με την ηλιακή ακτινοβολία, η χρήση της τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής δίνει τα περισσότερα αξιόπιστα αποτελέσματα για την θερμοκρασία κελιού [40].



Εικόνα 6.5: Είσοδος 1^{ου} ελεγκτή: Θερμοκρασία κελιού (Cell temperature)

Ταχύτητα ανέμου στα 10 μέτρα (Wind speed at 10m)

Η ταχύτητα του ανέμου παίζει έμμεσα ρόλο στην παραγωγή ενέργειας ενός ΦΒ στοιχείου. Μεγάλες ταχύτητες ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες, όπου, όπως προαναφέραμε, η λειτουργία του ΦΒ έχει μεγαλύτερη απόδοση. Αξιοποιώντας τα δεδομένα του προγράμματος POWER σχεδιάστηκε η καμπύλη της εικόνας 6.6, η οποία αντιπροσωπεύει τις μέσες ημερήσιες τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε m/s, μετρημένες σε ύψος 10m. Επιλέχθηκαν οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου στα 10 μέτρα, για να λάβουμε πιο ακριβή αποτελέσματα για την επίδραση του στην θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου των ηλιακών πάνελ, των οποίων το ύψος τοποθέτησης είναι σχετικά χαμηλό. Ταχύτητες ανέμου σε μεγαλύτερα υψόμετρα, όπως για παράδειγμα τα 50 μέτρα επηρεάζουν λιγότερο την παραγωγή ενέργειας στο φωτοβολταϊκό πάρκο.

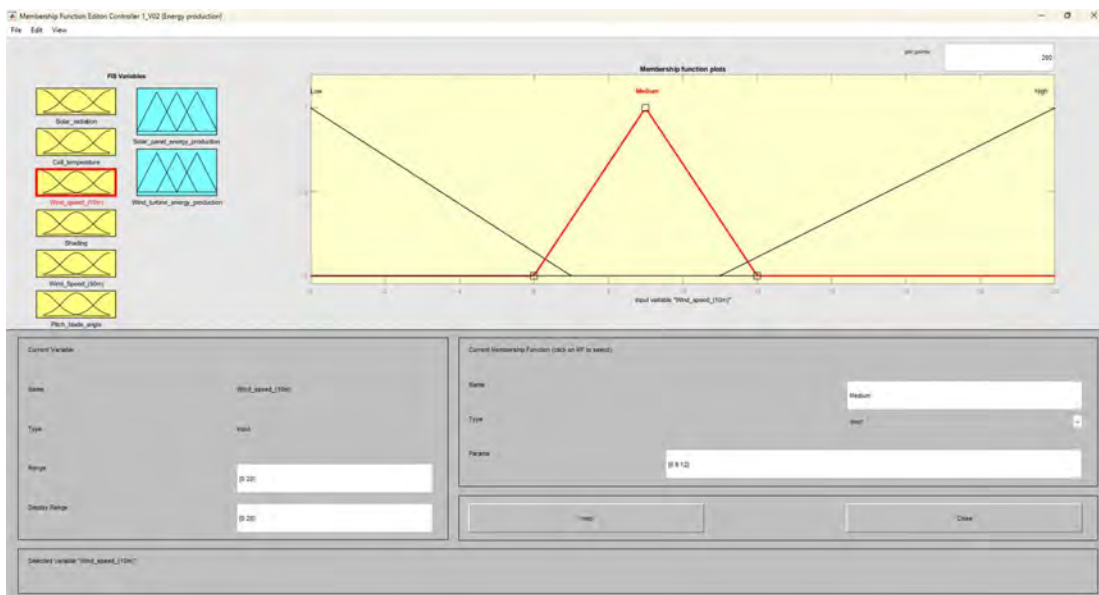


Εικόνα 6.6: Μέσες ωριαίες τιμές ταχύτητας ανέμου σε ύψος 10 μέτρων για το 2020 [38]

Όπως διακρίνουμε στο διάγραμμα της εικόνας 6.6 η μέγιστη ωριαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι τα 19.72 m/s ενώ ο μέσος όρος της υπολογίζεται στα 15.95m/s. Βάσει του διαγράμματος διαμορφώθηκαν τα επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής του πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής της ταχύτητας ανέμου σε ύψος 10 m

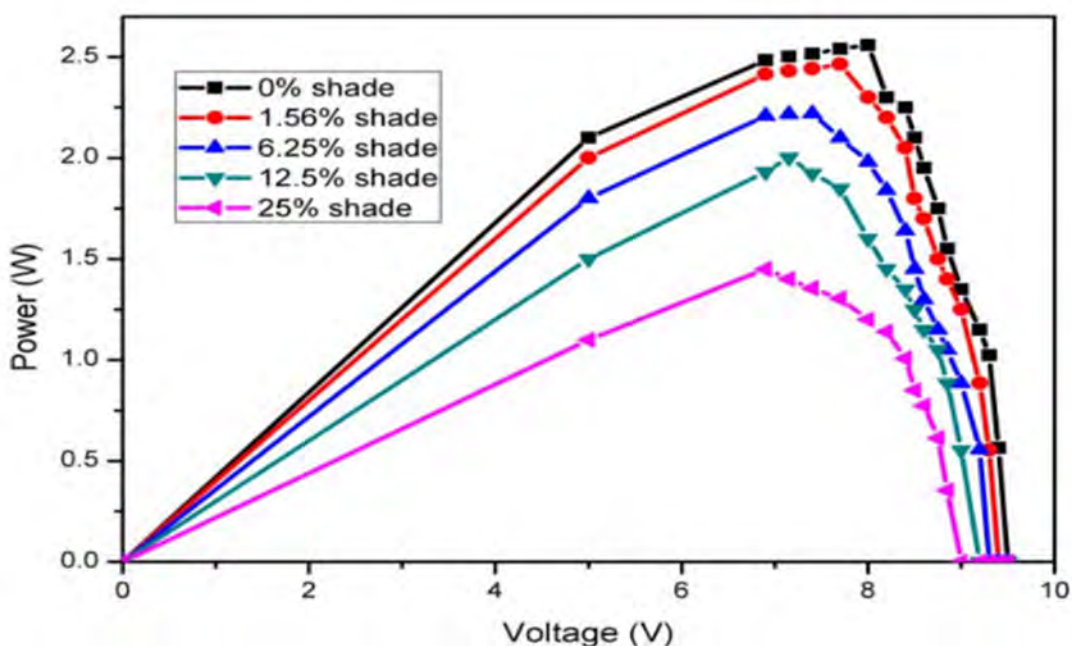
Λεκτικοί Τελεστές	Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής
Χαμηλή (Low)	0-7 m/s
Μέτρια (Medium)	6-12 m/s
Υψηλή (High)	11-20 m/s



Εικόνα 6.7: Είσοδος 1^{ου} ελεγκτή: ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 μέτρων

Σκίαση

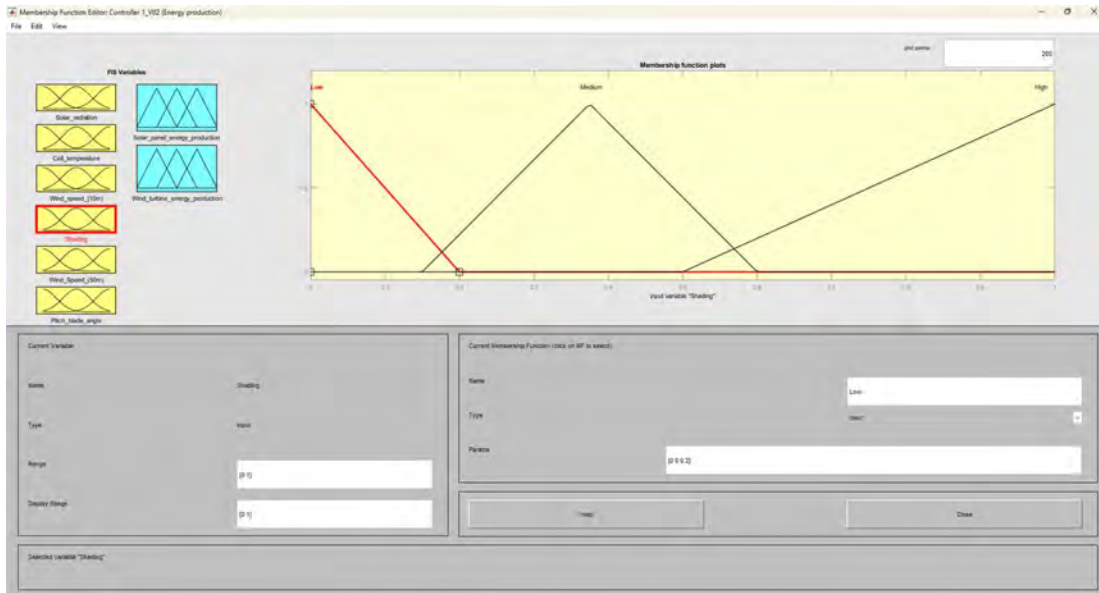
Η εξάρτηση της παραγωγής ενός ΦΒ στοιχείου από την ηλιακή ακτινοβολία, το καθιστά άμεσα εξαρτώμενο και από έναν δεύτερο παράγοντα, τις συνθήκες σκίασης. Η σκίαση επηρεάζει την ποσότητα της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πάνελ και συνεπώς μειώνει την παραγόμενη ισχύ. Σε ένα μονοκρυσταλλικό ΦΒ πλαίσιο η σκίαση κατά 25% μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της παραγόμενης ισχύος κατά 41,4% [41]. Η σκίαση ενός ΦΒ συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί υπό διάφορες συνθήκες. Φυσικά εμπόδια, όπως κτίρια και δέντρα, αλλά και καιρικά φαινόμενα όπως χιονοπτώσεις και σκόνη συμβάλουν σημαντικά στην μείωση της απόδοσης ενός πάνελ. Με δεδομένα τα παραπάνω διαμορφώνονται τα στοιχεία του πίνακα 6.4.



Εικόνα 6.8: Χαρακτηριστική καμπύλη P-V μονοκρυσταλλικού ΦΒ πάνελ για διαφορετικές συνθήκες σκίασης [41]

Πίνακας 6.4: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής για την σκίαση

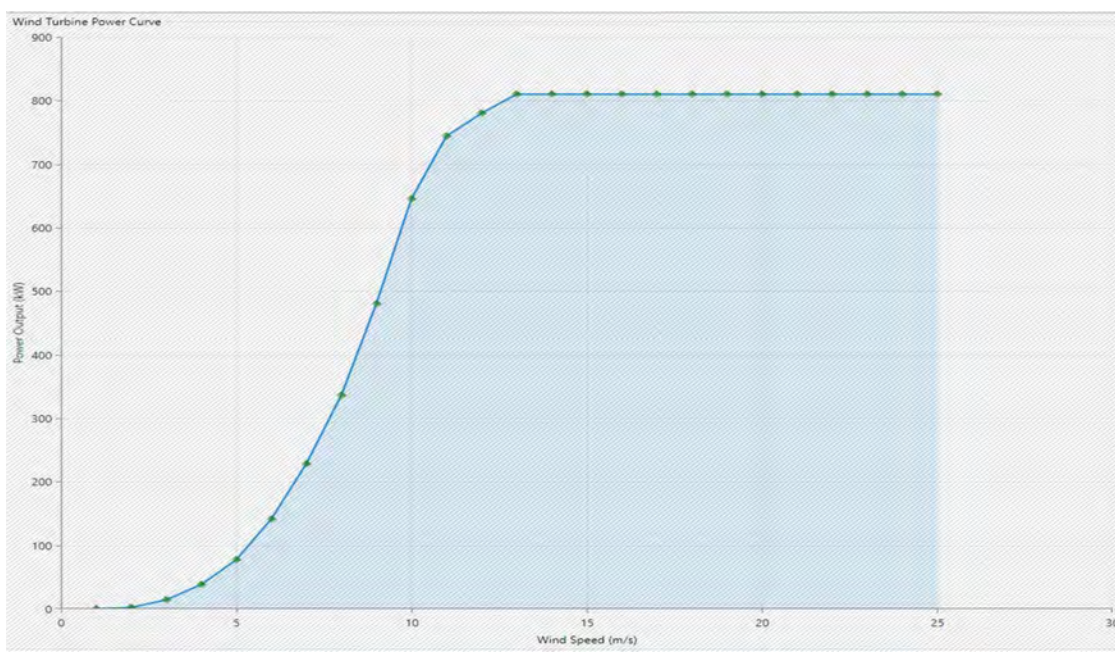
Λεκτικοί Τελεστές	Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής
Χαμηλή (Low)	0-0.2
Μέτρια (Medium)	0.15-0.6
Υψηλή (High)	0.5-1



Εικόνα 6.9: Είσοδος 1^{ου} ελεγκτή: Σκίαση

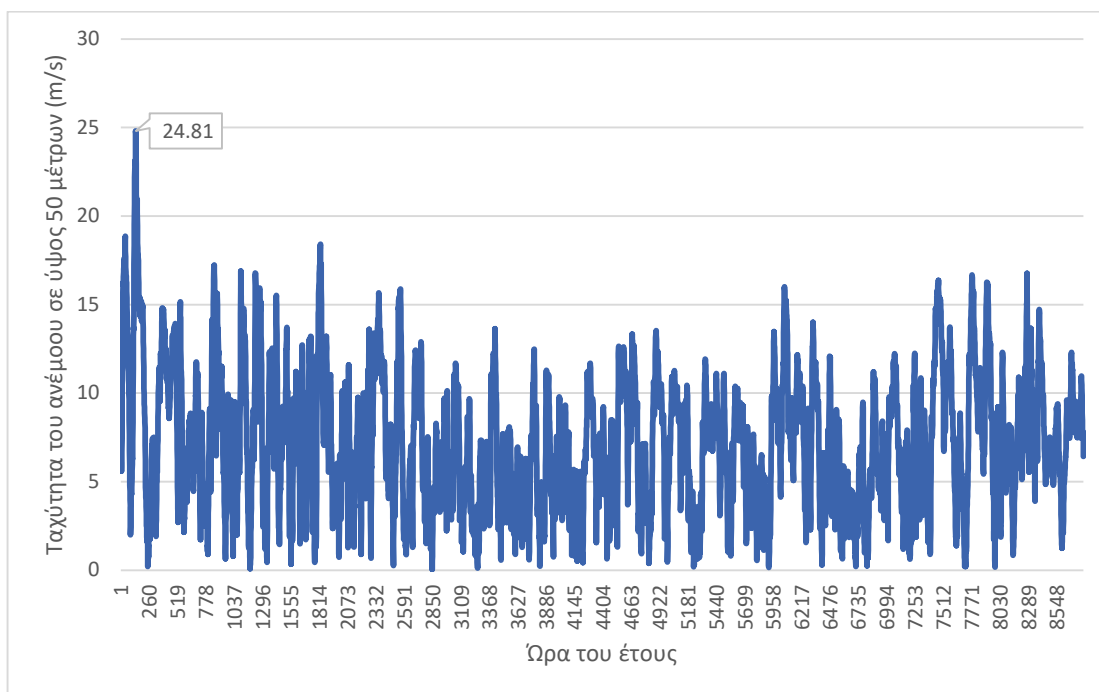
Ταχύτητα ανέμου στα 50 μέτρα (Wind speed at 50 m)

Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 2, ο βασικός παράγοντας για την παραγωγή ενέργειας σε μια Α/Γ είναι η ταχύτητα του ανέμου. Στην εικόνα 6.10 βλέπουμε την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας Enercon E-53 [800kW] όπως αυτή δίνεται στο λογισμικό Homer Pro.



Εικόνα 6.10: Καμπύλη ισχύος Α/Γ

Οι μέσες ωριαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου για το έτος 2020 στο νησί της Σίφνου αποτυπώνονται στο διάγραμμα της εικόνας 6.11 το οποίο σχηματίστηκε με στοιχεία που αποκτήθηκαν από το πρόγραμμα POWER. Η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου όπως διακρίνουμε είναι τα 24 m/s τιμή μικρότερη της ταχύτητας αποκοπής όπως αυτή φαίνεται στην καμπύλη ισχύος. Η μέση εμφανιζόμενη ταχύτητα κυμαίνεται στα 7,16 m/s γεγονός που την καθιστά επαρκή για αξιοποίηση στις ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου.

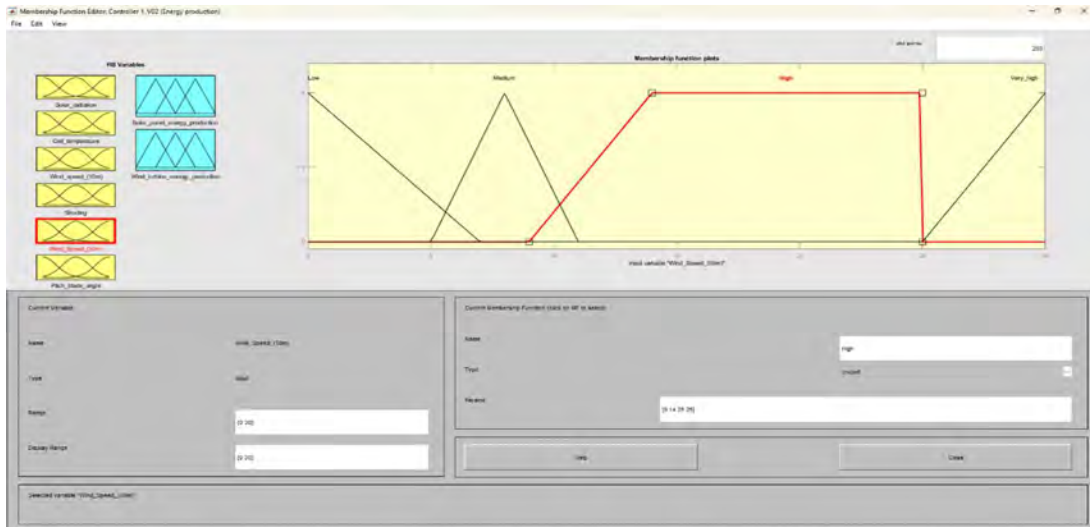


Εικόνα 6.11: Μέσες ωριαίες τιμές ταχύτητας ανέμου σε ύψος 10 μέτρων για το έτος 2020

Βάσει των στοιχείων των εικόνων 6.10 και 6.11 διαμορφώνονται και τα δεδομένα του πίνακα 6.5. Ο λεκτικός τελεστής «Πολύ υψηλή» προστέθηκε για την περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου ξεπερνάει την μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (cut-off speed).

Πίνακας 6.5: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 50 m

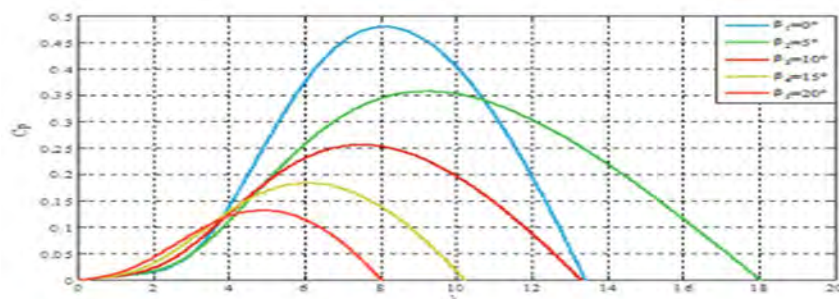
Λεκτικοί Τελεστές	Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής
Χαμηλή (Low)	0-7 m/s
Μέτρια (Medium)	5-11 m/s
Υψηλή (High)	9-25 m/s
Πολύ υψηλή	25-30 m/s



Εικόνα 6.12: Είσοδος 1^{ου} ελεγκτή: Ταχύτητα ανέμου σε ύψος 50m

Γωνία πτερυγίου Α/Γ (Pitch blade angle)

Ο έλεγχος τις γωνίας του πτερυγίου χρησιμοποιείται συνήθως για την διατήρηση τις παραγωγής ισχύος, για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες τις ονομαστικής. Μέσω του ελέγχου του βήματος πτερυγίου μπορεί να εξομαλυνθούν οι απότομες αλλαγές των καιρικών συνθηκών επομένως και να μειώσει τις απώλειες περίσσειας ενέργειας. Έτσι μπορεί να αντικαταστήσει ή και να συλλειτουργήσει με ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Ο συντελεστής ισχύος της μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε μηχανική εξαρτάται άμεσα και από την γωνία πτερυγίου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 6.13, όπου C_p ο συντελεστής ισχύος, λ ο λόγος της ταχύτητας στην αιχμή του πτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου και β η γωνία του πτερυγίου.

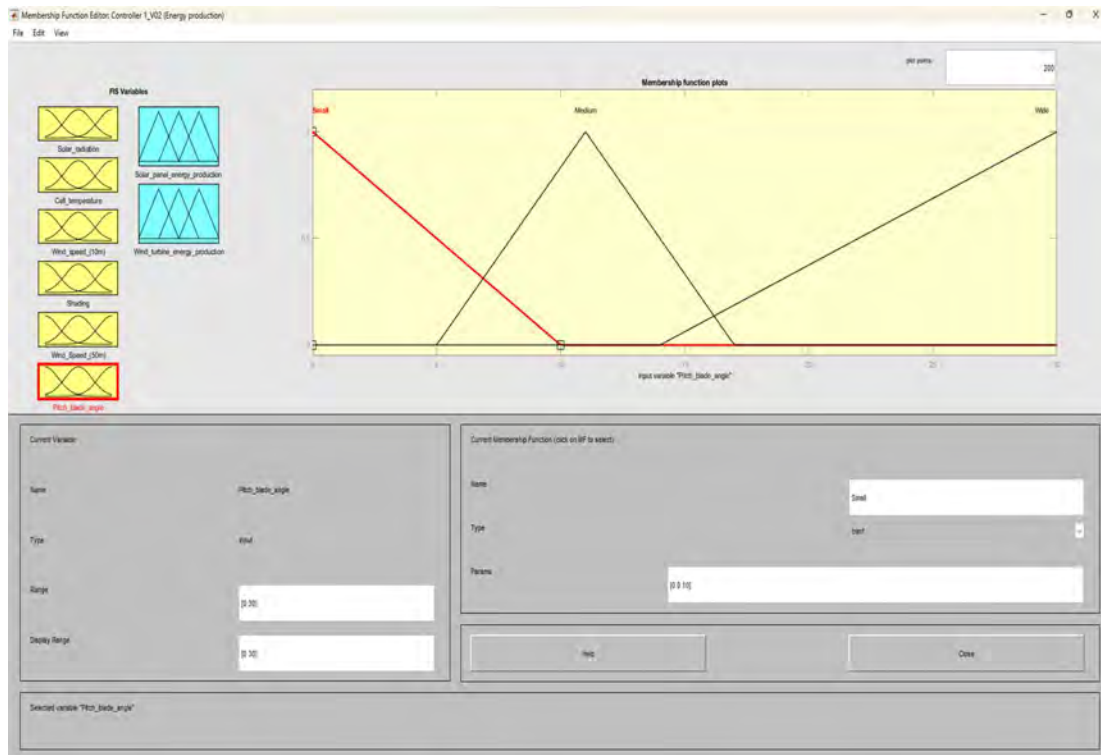


Εικόνα 6.13: Διάγραμμα εξάρτησης συντελεστή ισχύος ανεμογεννήτριας από την ταχύτητα στην αιχμή του πτερυγίου και την γωνία του πτερυγίου [43]

Με βάση τις πληροφορίες του διαγράμματος δημιουργήθηκαν τα στοιχεία του πίνακα 6.6 για τα επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής, αναφορικά με το βήμα πτερυγίου.

Πίνακας 6.6: Διαμόρφωση επιπέδων συναρτήσεων συμμετοχής για το βήμα πτερυγίου

Λεκτικοί Τελεστές	Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής
Μικρή (Small)	0-10°
Μέτρια (Medium)	5-17°
Μεγάλη (Wide)	14-30°



Εικόνα 6.14: Είσοδος 1^{ου} ελεγκτή: Γωνία πτερυγίου

6.2.2 Μεταβλητές εξόδου

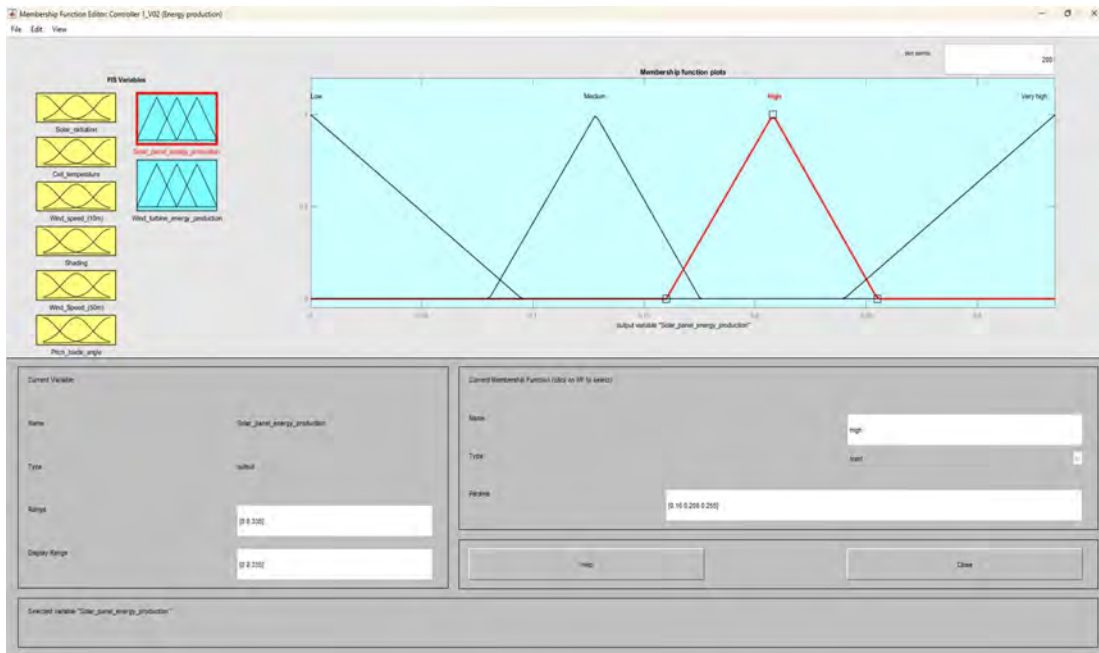
Οι μεταβλητές εξόδου είναι τα επίπεδα παραγωγής ισχύος από τις ανεμογεννήτριες και τα ηλιακά πάνελ, όπως αυτές επηρεάζονται από τις αντίστοιχες εισόδους τους.

Παραγωγή ενέργειας ΦΒ

Το φωτοβολταϊκό πάρκο είναι εγκατεστημένης ισχύος 335 kW. Τα επίπεδα των συναρτήσεων συμμετοχής της παραγωγής ενέργειας σε αυτό διαμορφώνονται στον πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7: Διαμόρφωση επιπέδων συναρτήσεων συμμετοχής για την παραγωγή ενέργειας των ΦΒ

Λεκτικοί Τελεστές	Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής
Χαμηλή (Low)	0.010-0.095 MWh
Μέτρια (Medium)	0.080-0.175 MWh
Μεγάλη (High)	0.160-0.255 MWh
Πολύ μεγάλη (Very high)	0.240-0.335 MWh



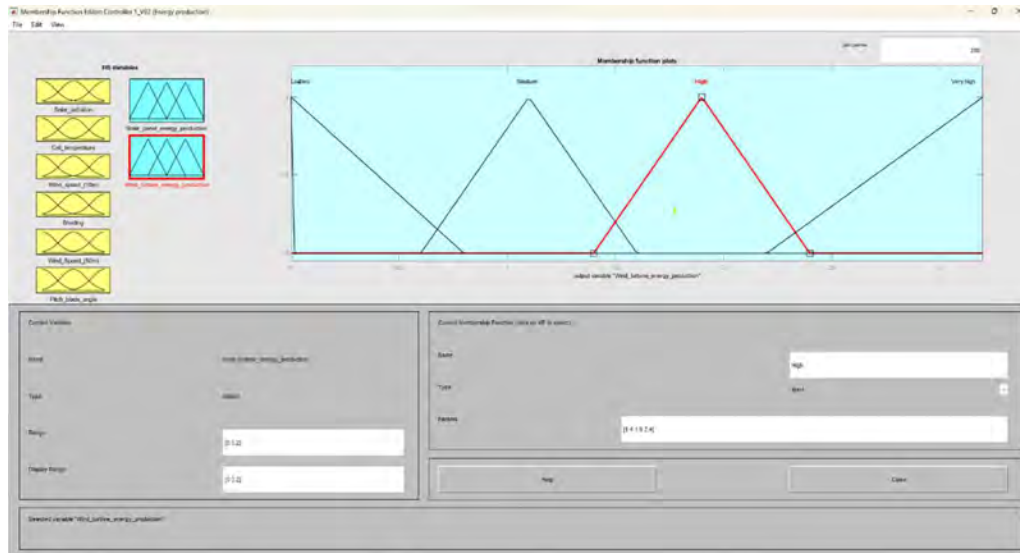
Εικόνα 6.15: Έξοδος 1^{ου} ελεγκτή: Παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά

Παραγωγή Ενέργειας Α/Γ

Το αιολικό πάρκο έχει ονομαστική ισχύ 3.2 MW. Τα επίπεδα των συναρτήσεων συμμετοχής της μεταβλητής εξόδου διαμορφώνονται όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.8: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής παραγωγής ενέργειας στις Α/Γ

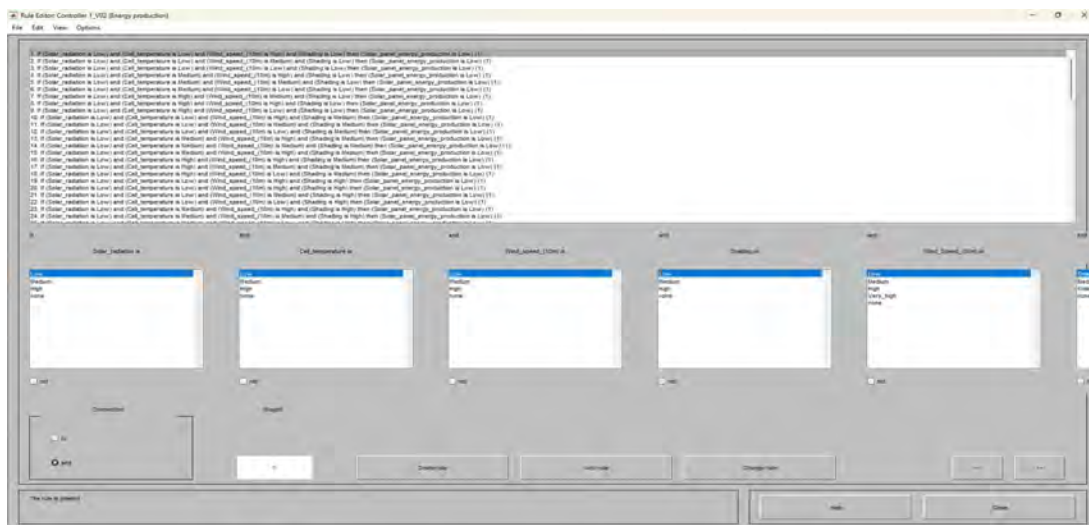
Λεκτικοί Τελεστές	Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής
Μηδενική (Zero)	0
Χαμηλή (Low)	0.005-0.8 MWh
Μέτρια (Medium)	0.6-1.6 MWh
Μεγάλη (High)	1.4-2.4 MWh
Πολύ μεγάλη (Very high)	2.2-3.2 MWh



Εικόνα 6.16: Έξοδος 1^{ου} ελεγκτή: Παραγωγή ενέργειας από Α/Γ

6.2.3 Διαμόρφωση συνόλου κανόνων 1^{ου} συστήματος ασαφούς συμπερασμού

Η διαμόρφωση του συνόλου των κανόνων που θα διέπει τον πρώτο ελεγκτή γίνεται στον Rule editor του Fuzzy Logic Toolbox, στον οποίο έχουμε πρόσβαση μέσω της επιλογής «Rules» της καρτέλας «Edit». Όπως αναφέραμε, το σύνολο ασαφών κανόνων, είναι ομάδες εκφράσεων προτασιακής λογικής τύπου «*If x_1 is A and x_2 is B then y_1 is C*». Το σύνολο των κανόνων που χρησιμοποιήθηκε για τον 1^ο ελεγκτή απεικονίζεται στις εικόνες 6.18, 6.19, 6.20 και 6.21.



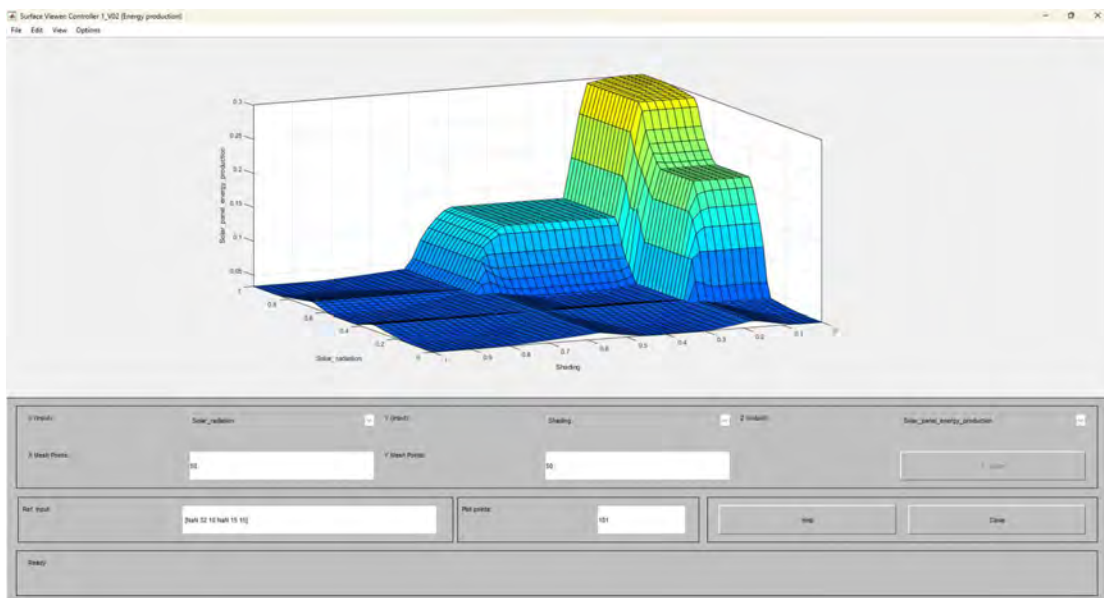
Εικόνα 6.17: Rule Editor συστήματος ασαφούς συμπερασμού (FIS)

73. If (Solar_radiation is High) and (Cell_temperature is High) and (Wind_speed_(10m) is High) and (Shading is Medium) then (Solar_panel_energy_production is Medium) (1)
 74. If (Solar_radiation is High) and (Cell_temperature is Low) and (Wind_speed_(10m) is Low) and (Shading is High) then (Solar_panel_energy_production is Low) (1)
 75. If (Solar_radiation is High) and (Cell_temperature is Low) and (Wind_speed_(10m) is Medium) and (Shading is High) then (Solar_panel_energy_production is Low) (1)
 76. If (Solar_radiation is High) and (Cell_temperature is Low) and (Wind_speed_(10m) is High) and (Shading is High) then (Solar_panel_energy_production is Low) (1)
 77. If (Solar_radiation is High) and (Cell_temperature is Medium) and (Wind_speed_(10m) is Low) and (Shading is High) then (Solar_panel_energy_production is Low) (1)
 78. If (Solar_radiation is High) and (Cell_temperature is Medium) and (Wind_speed_(10m) is Medium) and (Shading is High) then (Solar_panel_energy_production is Low) (1)
 79. If (Solar_radiation is High) and (Cell_temperature is Medium) and (Wind_speed_(10m) is High) and (Shading is High) then (Solar_panel_energy_production is Low) (1)
 80. If (Solar_radiation is High) and (Cell_temperature is High) and (Wind_speed_(10m) is Low) and (Shading is High) then (Solar_panel_energy_production is Low) (1)
 81. If (Solar_radiation is High) and (Cell_temperature is High) and (Wind_speed_(10m) is Medium) and (Shading is High) then (Solar_panel_energy_production is Low) (1)
 82. If (Solar_radiation is High) and (Cell_temperature is High) and (Wind_speed_(10m) is High) and (Shading is High) then (Solar_panel_energy_production is Low) (1)
 83. If (Wind_Speed_(50m) is Low) and (Pitch_blade_angle is Small) then (Wind_turbine_energy_production is Low) (1)
 84. If (Wind_Speed_(50m) is Low) and (Pitch_blade_angle is Medium) then (Wind_turbine_energy_production is Low) (1)
 85. If (Wind_Speed_(50m) is Low) and (Pitch_blade_angle is Wide) then (Wind_turbine_energy_production is Low) (1)
 86. If (Wind_Speed_(50m) is Medium) and (Pitch_blade_angle is Small) then (Wind_turbine_energy_production is High) (1)
 87. If (Wind_Speed_(50m) is Medium) and (Pitch_blade_angle is Medium) then (Wind_turbine_energy_production is Medium) (1)
 88. If (Wind_Speed_(50m) is Medium) and (Pitch_blade_angle is Wide) then (Wind_turbine_energy_production is Low) (1)
 89. If (Wind_Speed_(50m) is High) and (Pitch_blade_angle is Small) then (Wind_turbine_energy_production is Very high) (1)
 90. If (Wind_Speed_(50m) is High) and (Pitch_blade_angle is Medium) then (Wind_turbine_energy_production is High) (1)
 91. If (Wind_Speed_(50m) is High) and (Pitch_blade_angle is Wide) then (Wind_turbine_energy_production is Medium) (1)
 92. If (Wind_Speed_(50m) is Very_high) then (Wind_turbine_energy_production is Zero) (1)

Εικόνα 6.21: Βάση κανόνων ασαφούς λογικής 1^{ου} ελεγκτή (73-92)

6.2.4 Αποτελέσματα συστήματος ασαφούς συμπερασμού για τον 1^ο ελεγκτή

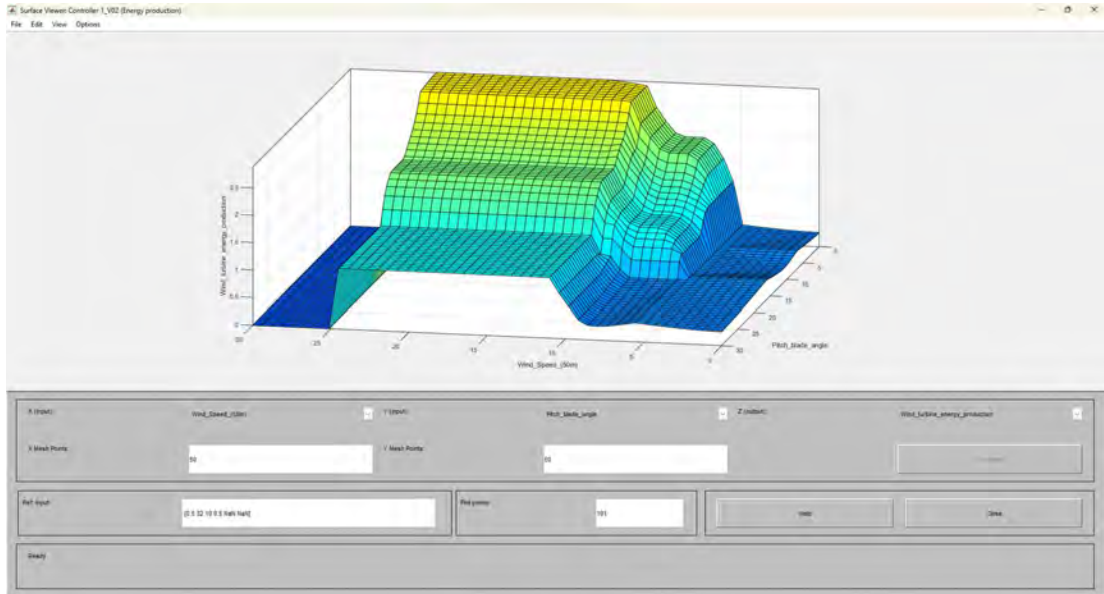
Υπάρχουν δύο τρόποι για την εκτύπωση των αποτελεσμάτων στο περιβάλλον του Fuzzy Logic Toolbox. Ο πρώτος τρόπος είναι η γραφική απεικόνιση της επιφάνειας των τιμών της μεταβλητής εξόδου, σε σχέση με τις μεταβλητές εισόδου της επιλογής μας. Επιλέγουμε την καρτέλα «View» και έπειτα την επιλογή Surface και ανοίγουμε τον Surface Viewer.



Εικόνα 6.22: Απεικόνιση αποτελεσμάτων της εξόδου «Solar energy production» στον Surface Viewer

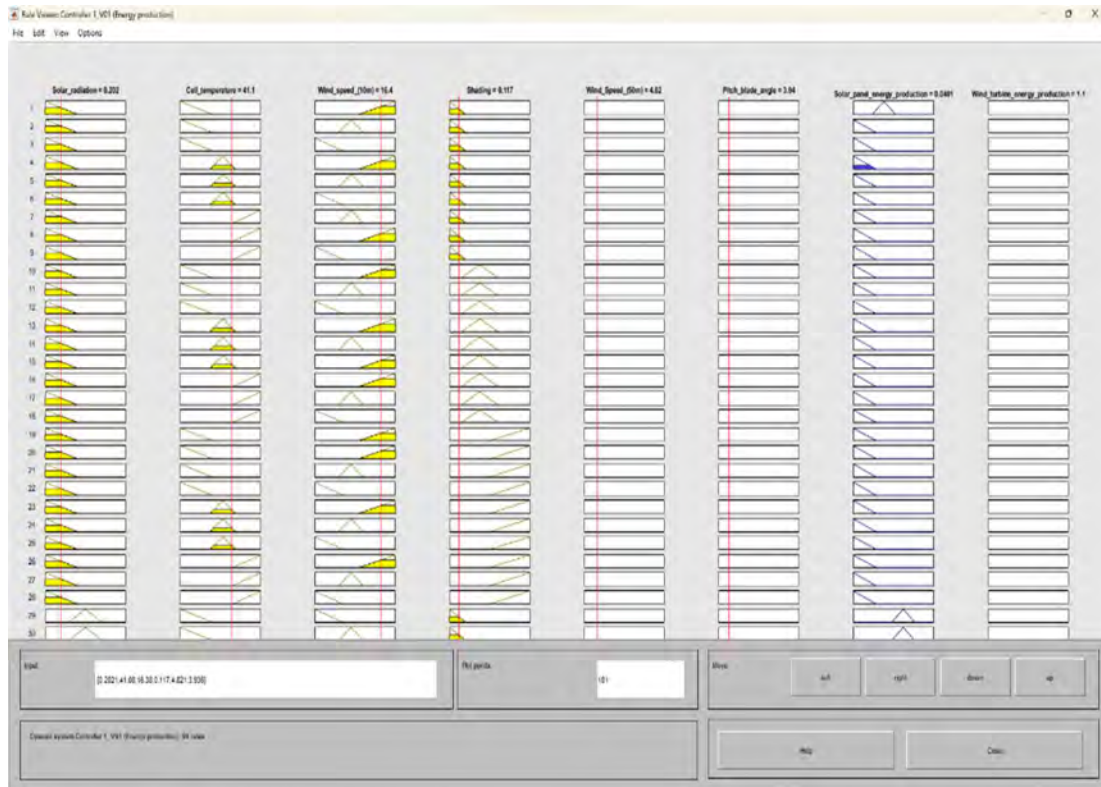
Στο τρισδιάστατο διάγραμμα της εικόνας 6.22 παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές των μεταβλητών «Ηλιακή ακτινοβολία (Solar radiation)» και «Σκίαση (Shading)» αντίστοιχα

μικρές είναι και οι τιμές της παραγόμενης ενέργειας στα ΦΒ πλαίσια. Αντίστοιχα δεδομένα για την παραγωγή ενέργειας στις ανεμογεννήτριες, συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου και της γωνίας πτερυγίου, παρατηρούμε στην εικόνα 6.23. Για μεγάλες τιμές της ταχύτητας του ανέμου και μικρή γωνία πτερυγίου μεγιστοποιείται η παραγωγή ενέργειας των Α/Γ. Χαρακτηριστική είναι και η διακοπή της παραγωγής για ταχύτητες άνω των 25m/s.



Εικόνα 6.23: Απεικόνιση αποτελεσμάτων της εξόδου «Wind turbine energy production» στον Surface Viewer

Ο δεύτερος και πιο αναλυτικός τρόπος αποτύπωσης των αποτελεσμάτων του συστήματος ασαφούς συμπερασμού είναι μέσω του Rule Viewer, ο οποίος βρίσκεται επίσης στην καρτέλα «View». Όπως βλέπουμε στην εικόνα 6.24 στην κορυφή κάθε μεταβλητής εισόδου και εξόδου έχουμε την αριθμητική τιμή της. Μεταβάλλοντας με τον κέρσορα την κόκκινη γραμμή των μεταβλητών εισόδου λαμβάνουμε νέες τιμές για τις μεταβλητές εξόδου. Κάτι παρόμοιο μπορεί να γίνει και στο κάτω μέρος του παραθύρου, στο κομμάτι «Input», όπου μπορούμε να εισάγουμε με ακρίβεια τις επιθυμητές τιμές των μεταβλητών εισόδου και να λάβουμε τις αντίστοιχες εξόδους. Ενδιαφέρον έχει και το γεγονός ότι για κάθε τιμή μιας μεταβλητής, βλέπουμε και το ποσοστό συμμετοχής της στην συνάρτηση συμμετοχής αλλά και τους κανόνες που την επηρεάζουν, μέσω των κίτρινων και μπλε επιφανειών.



Εικόνα 6.24: Απεικόνιση των τιμών των μεταβλητών του συστήματος στον Rule Viewer

6.2.5 Παραδείγματα υπολογισμών μέσω συστήματος ασαφούς συμπερασμού του 1^{ου} ελεγκτή

Για την δοκιμή του συστήματος θα εκτελεστούν υπολογισμοί για δύο σενάρια. Εισάγοντας τις τιμές εισόδου του πίνακα 6.9 στον Rule Viewer, υπολογίζονται οι τιμές εξόδου για το συγκεκριμένο σενάριο συνθηκών λειτουργίας. Εδώ πρέπει να σημειωθεί, πως ο ελεγκτής δεν έχει να σχεδιαστεί για υπολογισμούς σε συνθήκες χωρίς ηλιοφάνεια ή ολικής σκίασης, καθώς τότε δεν έχει και νόημα η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Πίνακας 6.9: Παράδειγμα υπολογισμού παραγόμενης ενέργειας στον 1^ο ελεγκτή

Είσοδος	Τιμή εισόδου	Έξοδος	Τιμή εξόδου (MWh)
Ηλιακή ακτινοβολία	0.7	Παραγωγή ενέργειας ΦΒ	0.294
Θερμοκρασία κελιού	35		
Ταχύτητα ανέμου (10m)	7		
Σκίαση	0.1	Παραγωγή ενέργειας Α/Γ	2.52
Ταχύτητα ανέμου (50m)	12		
Γωνία πτερυγίου	6		
Σύνολο παραγόμενης ενέργειας			2.814

Το σύνολο των ασαφών κανόνων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του πρώτου παραδείγματος είναι οι εξής:

- Κανόνας No60: *if (Solar radiation is High) and (Cell temperature is Medium) and (Wind speed at 10m is Medium) and (Shading is Low) then (Solar panel energy production is Very High).*
- Κανόνας No89: *if (Wind speed is High) and (Pitch blade angle is Small) then (Wind turbine energy production is Very high).*
- Κανόνας No90: *if (Wind speed is High) and (Pitch blade angle is Medium) then (Wind turbine energy production is High).*

Για το δεύτερο παράδειγμα θα εισαχθούν δυσμενέστερες τιμές μεταβλητών εισόδου στον Rule Viewer. Τα στοιχεία των εισόδων και εξόδων του συστήματος ασαφούς συμπερασμού παρατίθενται στον πίνακα 6.10.

Πίνακας 6.10: Παράδειγμα υπολογισμού παραγόμενης ενέργειας στον 1^ο ελεγκτή

Είσοδος	Τιμή εισόδου	Έξοδος	Τιμή εξόδου (MWh)
Ηλιακή ακτινοβολία	0.52	Παραγωγή ενέργειας ΦΒ	0.0407
Θερμοκρασία κελιού	41		
Ταχύτητα ανέμου (10m)	2.3		
Σκίαση	0.54		
Ταχύτητα ανέμου (50m)	7	Παραγωγή ενέργειας Α/Γ	1.1
Γωνία πτερυγίου	14		
Σύνολο παραγόμενης ενέργειας			1.1407

Οι ασαφείς κανόνες που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του δεύτερου παραδείγματος είναι οι εξής:

- Κανόνας No41: *if (Solar radiation is Medium) and (Cell temperature is Medium) and (Wind speed at 10m is Low) and (Shading is Medium) then (Solar panel energy production is Low).*
- Κανόνας No50: *if (Solar radiation is Medium) and (Cell temperature is Medium) and (Wind speed at 10m is Low) and (Shading is High) then (Solar panel energy production is Low).*
- Κανόνας No87: *if (Wind speed at 50m is Medium) and (Pitch blade angle is Medium) then (Wind turbine energy production is Medium).*

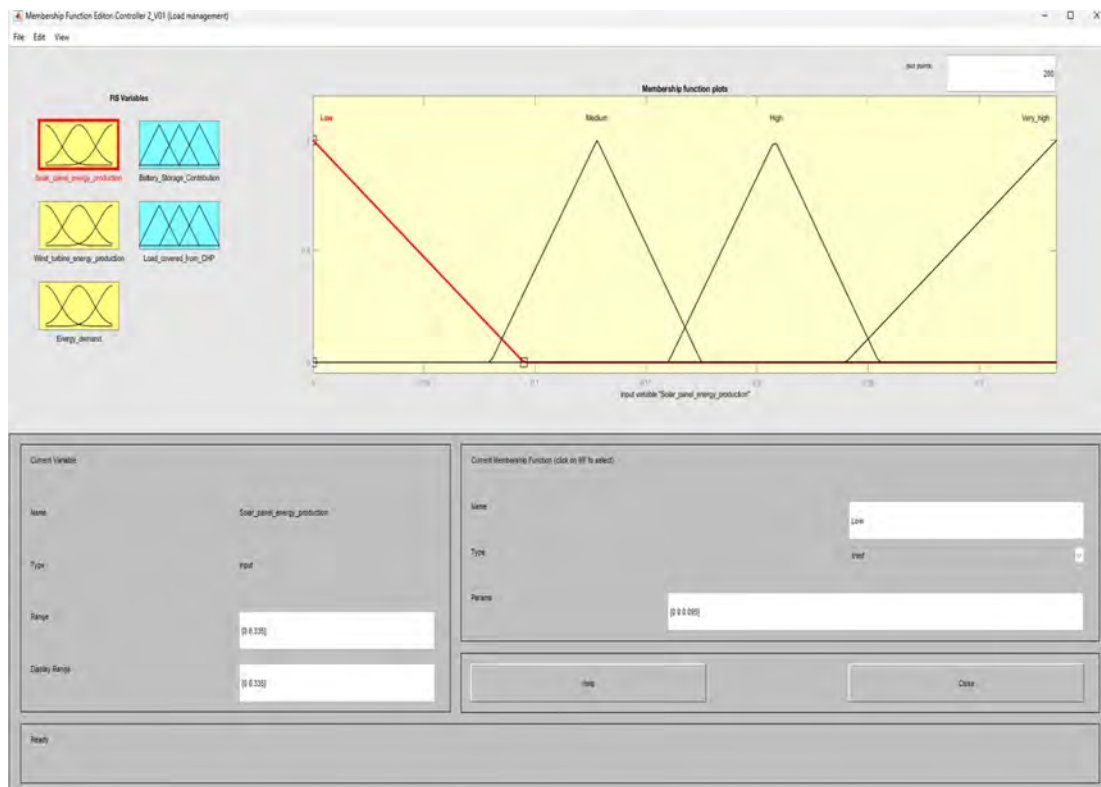
6.3 Υλοποίηση ελεγκτή για την κάλυψη της ζήτησης φορτίου στο ΜΔ

Ο δεύτερος ασαφής ελεγκτής έχει τρεις εισόδους και δύο εξόδους. Οι δύο εκ των τριών εισόδων είναι η παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και των ανεμογεννητριών ενώ η τρίτη αναφέρεται στην ζήτηση. Συνεπώς οι υπολογισμοί του δεύτερου ελεγκτή προϋποθέτουν την διαθεσιμότητα των αποτελεσμάτων του πρώτου. Στόχος του σχεδιασμού του δεύτερου ελεγκτή είναι ο έλεγχος της επάρκειας της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο και η διαχείριση των πόρων.

6.3.1 Μεταβλητές εισόδου

Παραγωγή Φ/Β (Solar panel energy production)

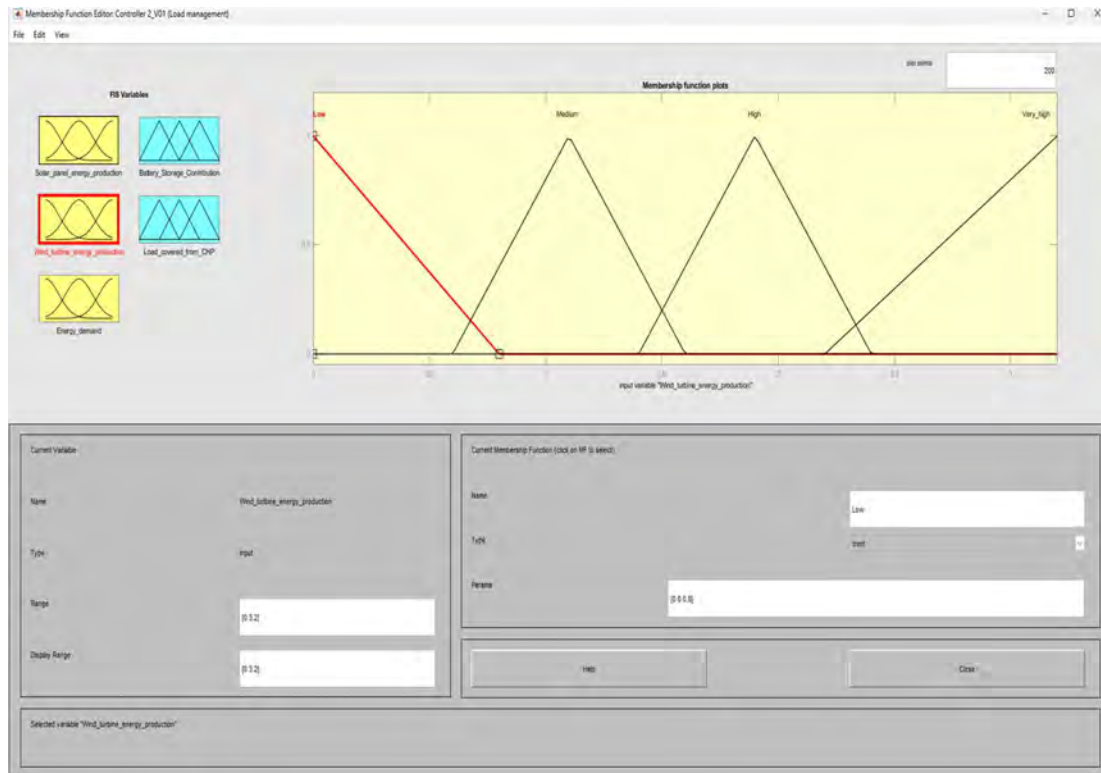
Τα επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής για την παραγωγή ενέργειας στα ΦΒ ορίστηκαν στον πίνακα 6.7. Σύμφωνα με αυτές τις τιμές θα δημιουργηθεί η πρώτη είσοδος, όπως αυτή φαίνεται στην εικόνα 6.25.



Εικόνα 6.25: Είσοδος 2^{ου} ελεγκτή: Παραγωγή ενέργειας από ΦΒ

Παραγωγή Α/Γ (Wind turbine energy production)

Ομοίως για την δεύτερη είσοδο θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα, όπως αυτά ορίστηκαν για τον 1^ο ελεγκτή στον πίνακα 6.8.

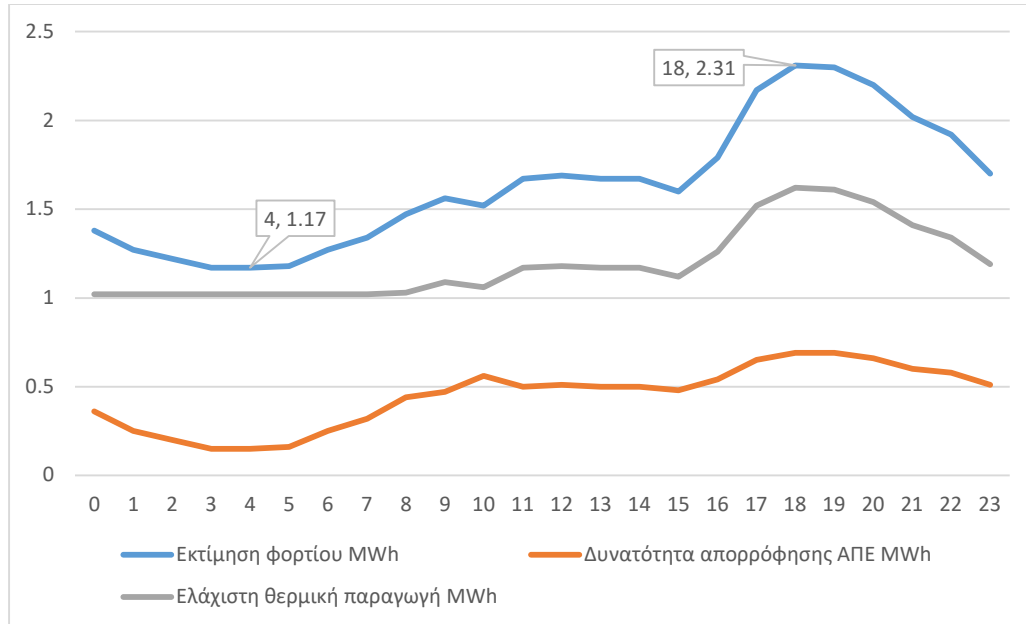


Εικόνα 6.26: Είσοδος 2^{ου} ελεγκτή: Παραγωγή ενέργειας Α/Γ

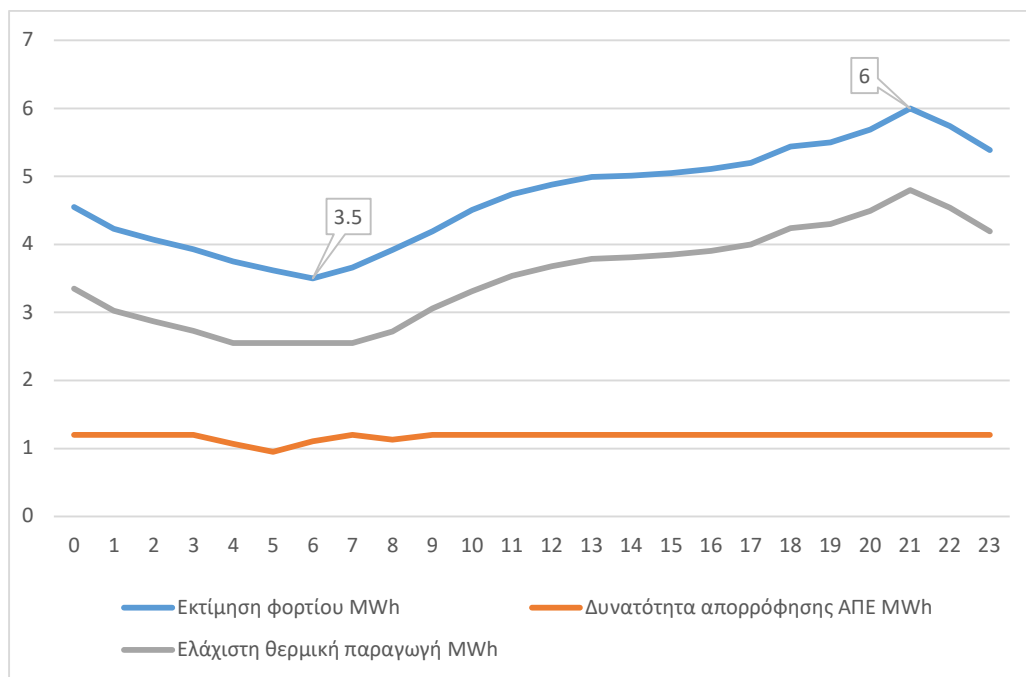
Ζήτηση φορτίου (Energy demand)

Οι τιμές της ζήτησης φορτίου είναι απαραίτητες, ώστε αν γνωρίζουμε εάν η κάλυψη του φορτίου θα γίνει από την ενέργειας που παράγεται από τις ΑΠΕ, την συστοιχία μπαταριών ή αν θα χρειαστεί να συνδράμουν οι μονάδες ΣΗΘ (Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού Θερμότητας-ΤCΡ). Στην εικόνα 5.6 του πέμπτου κεφαλαίου παρουσιάστηκε ένα διάγραμμα της μέσης ημερήσιας ζήτησης φορτίου της Σίφνου, μέσω των τιμών των απολογιστικών στοιχείων που αναρτά ο ΔΕΔΔΗΕ. Στο διάγραμμα αυτό διακρίνουμε πως η ζήτηση ενέργειας τις μέρες του χρόνου εκτός του καλοκαιριού κυμαίνεται σε σχετικά σταθερά επίπεδα. Το καλοκαίρι λόγω έναρξης της τουριστικής σεζόν οι καταναλώσεις είναι εμφανώς μεγαλύτερες. Γι' αυτόν τον λόγο επιλέχθηκαν δύο μέρες του χρόνου, μία ενδεικτική για τον χειμώνα και μία για το καλοκαίρι, για τις οποίες δημιουργήθηκαν

διαγράμματα ωριαίας ζήτησης. Τα δεδομένα των διαγραμμάτων αποκτήθηκαν από τα αρχεία εκτίμησης ζήτησης για τα ΜΔΝ για το έτος 2020, που έχει αναρτήσει ο ΔΕΔΔΗΕ.



Εικόνα 6.27: Γράφημα ωριαίας ζήτησης ενέργειας 15/01/2020 στην Σίφνο

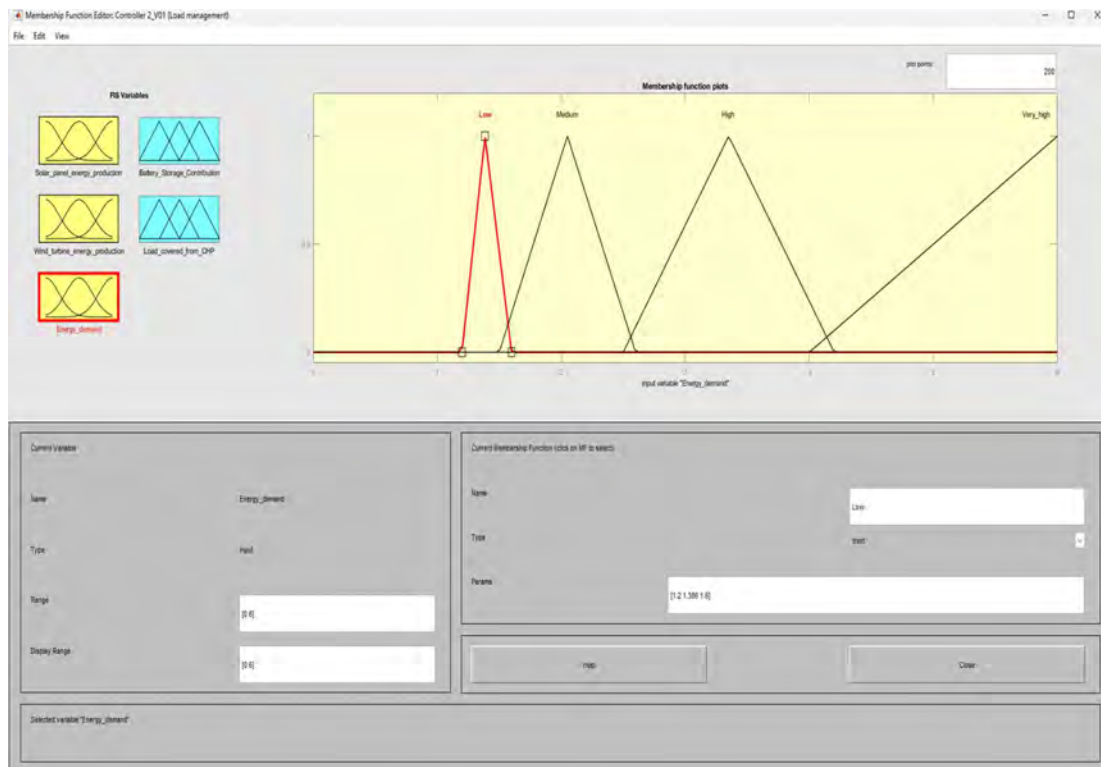


Εικόνα 6.28: Γράφημα ωριαίας ζήτησης ενέργειας 1/08/2020 στην Σίφνο

Με βάση τα δεδομένα των γραφημάτων των εικόνων 6.27 και 6.28 τα επίπεδα των συναρτήσεων συμμετοχής για την ζήτηση ενέργειας διαμορφώνονται ως εξής:

Πίνακας 6.11: : Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής ζήτησης ενέργειας

Λεκτικοί Τελεστές	Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής
Χαμηλή (Low)	1.2-1.6 MWh
Μέτρια (Medium)	1.5-2.6 MWh
Μεγάλη (High)	2.5-4.2 MWh
Πολύ μεγάλη (Very high)	4-6 MWh



Εικόνα 6.29: Είσοδος 2^{ου} ελεγκτή: Ζήτηση φορτίου

6.3.2 Μεταβλητές εξόδου

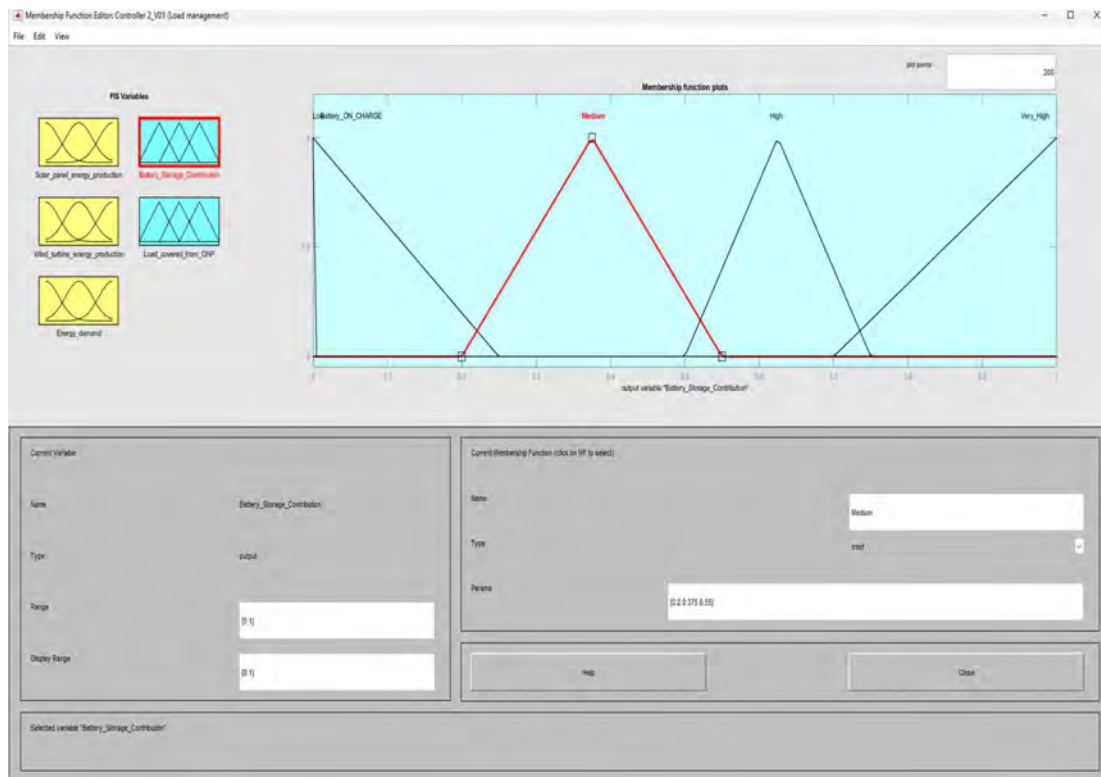
Διείσδυση Συστήματος Μπαταριών (Battery Storage Contribution)

Το μικροδίκτυο διαθέτει δύο συστήματα μπαταριών, με το ένα από αυτά να λειτουργεί ως εφεδρικό. Υποθέτουμε πως και οι δύο συστοιχίες είναι πάντα φορτισμένες. Η συστοιχία που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να τροφοδοτήσει το δίκτυο με 1 MWh. Σε περίπτωση εξάντλησης της ενέργειας μιας μπαταρίας, την κάλυψη του φορτίου αναλαμβάνει μια γεννήτρια ντίζελ ΣΗΘ. Οι συσσωρευτές θα λειτουργούν επικουρικά στο δίκτυο και όχι σαν

κύριες μονάδες κάλυψης φορτίου. Τα επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής συσσωρευτών είναι τα εξής:

Πίνακας 6.12: Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής ενέργειας συσσωρευτών

Λεκτικοί Τελεστές	Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής
Χαμηλή (Low)	0.0-0.25 MWh
Μέτρια (Medium)	0.20-0.55 MWh
Μεγάλη (High)	0.50-0.75 MWh
Πολύ μεγάλη (Very high)	0.70-1.0 MWh



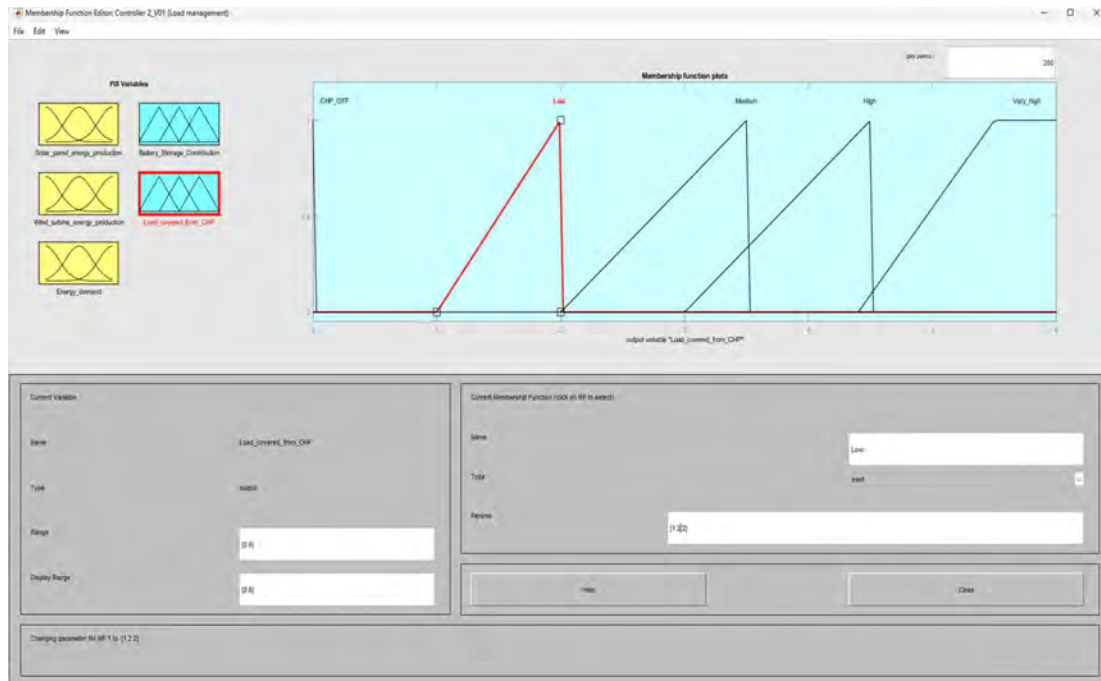
Εικόνα 6.30: Έξοδος 2^{ου} ελεγκτή: Διείσδυση συστήματος μπαταριών

Κάλυψη φορτίου από μονάδες ΣΗΘ (Load covered from CHP)

Η Σίφνος ανήκει στα ΜΔΝ, επομένως δεν μπορεί να αποκτήσει ενέργεια από το κεντρικό δίκτυο σε περίπτωση η ενέργεια των ΑΠΕ είναι ανεπαρκής. Την αυτονομία της Σίφνου εξασφαλίζουν οι μονάδες ΣΗΘ, οι οποίες λειτουργούν με ελαφρύ ντίζελ. Αυτές είναι και οι μονάδες οι οποίες θα καλύψουν την ζήτηση φορτίου στο μικροδίκτυο σε περιπτώσεις χαμηλής παραγωγής των ΑΠΕ ή μεγάλων επιπέδων ζήτησης τους καλοκαιρινούς μήνες. Τα επίπεδα των συναρτήσεων συμμετοχής της εξόδου είναι τα εξής:

Πίνακας 6.13

Λεκτικοί Τελεστές	Επίπεδα συναρτήσεων συμμετοχής
Εκτός λειτουργίας (CHP OFF)	0
Χαμηλή (Low)	1.0-2.0 MWh
Μέτρια (Medium)	2.0-3.50 MWh
Μεγάλη (High)	3.0-4.5 MWh
Πολύ μεγάλη (Very high)	4.4-6 MWh



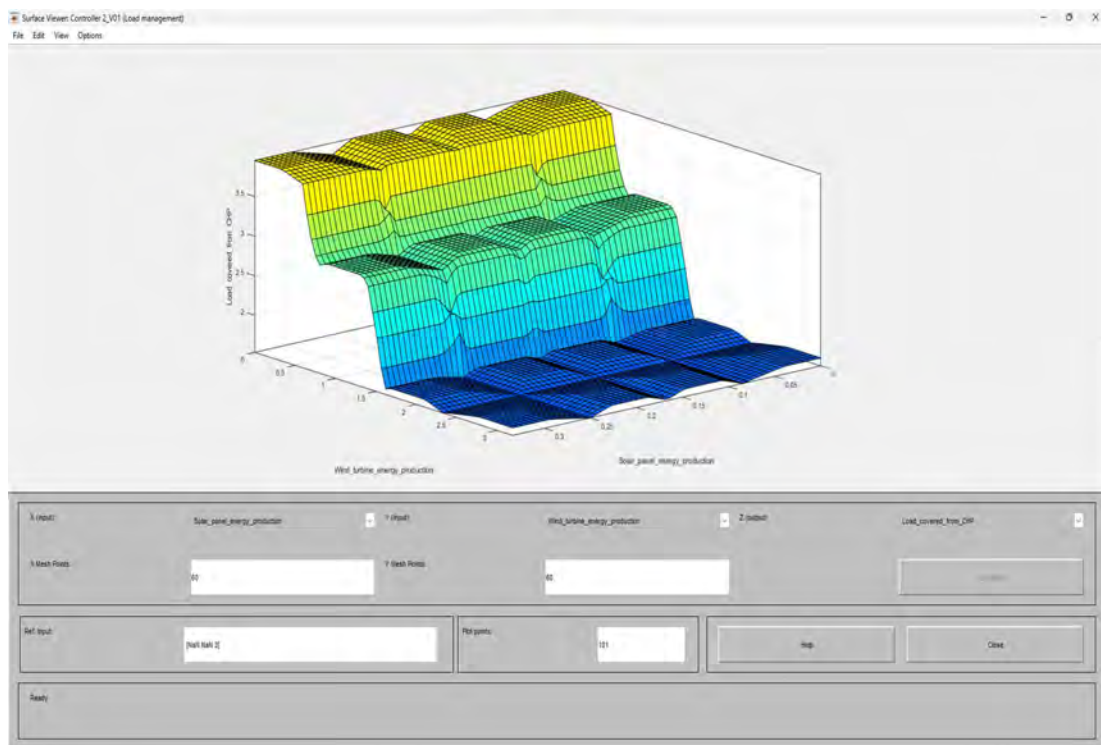
Εικόνα 6.31: Έξοδος 2^{ου} ελεγκτή: Κάλυψη φορτίου από μονάδες ΣΗΘ

6.3.3 Διαμόρφωση συνόλου κανόνων 2^{ου} συστήματος ασαφούς συμπερασμού

Το δεύτερο σύνολο κανόνων δημιουργήθηκε ακολουθώντας την ίδια διαδικασία στον Rule Editor, όπως και για τον 1^ο ελεγκτή. Επιπλέον τα ίδια βήματα ακολουθούμε για την τρισδιάστατη αναπαράσταση των μεταβλητών της επιλογής μας. Στο διάγραμμα της επιλογής Surface στην εικόνα 6.35 βλέπουμε την τρισδιάστατη απεικόνιση των τιμών της κάλυψη φορτίου από μονάδες ΣΗΘ, με εισόδους την παραγωγή ενέργειας στις Α/Γ και την παραγωγή ενέργειας στα ΦΒ. Εύκολα παρατηρούμε πως το ποσοστό κάλυψης φορτίου από τις μονάδες ΣΗΘ εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τα επίπεδα παραγωγής ενέργειας των ανεμογεννητριών. Αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό, εφόσον η εγκατεστημένη ισχύς του αιολικού πάρκου είναι πολύ μεγαλύτερη του φωτοβολταϊκού.

49. If (Solar_panel_energy_production is Low) and (Wind_turbine_energy_production is Low) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is Battery_ON_CHARGE)(Load_covered_from_CHP is Very_high) (1)
50. If (Solar_panel_energy_production is Low) and (Wind_turbine_energy_production is Medium) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is High)(Load_covered_from_CHP is High) (1)
51. If (Solar_panel_energy_production is Medium) and (Wind_turbine_energy_production is Medium) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is High)(Load_covered_from_CHP is High) (1)
52. If (Solar_panel_energy_production is High) and (Wind_turbine_energy_production is Medium) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is High)(Load_covered_from_CHP is High) (1)
53. If (Solar_panel_energy_production is Very_high) and (Wind_turbine_energy_production is Medium) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is Low)(Load_covered_from_CHP is High) (1)
54. If (Solar_panel_energy_production is Low) and (Wind_turbine_energy_production is High) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is Low)(Load_covered_from_CHP is High) (1)
55. If (Solar_panel_energy_production is Medium) and (Wind_turbine_energy_production is High) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is Low)(Load_covered_from_CHP is High) (1)
56. If (Solar_panel_energy_production is High) and (Wind_turbine_energy_production is High) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is Low)(Load_covered_from_CHP is High) (1)
57. If (Solar_panel_energy_production is Very_high) and (Wind_turbine_energy_production is High) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is Low)(Load_covered_from_CHP is High) (1)
58. If (Solar_panel_energy_production is Low) and (Wind_turbine_energy_production is Very_high) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is Low)(Load_covered_from_CHP is Medium) (1)
59. If (Solar_panel_energy_production is Medium) and (Wind_turbine_energy_production is Very_high) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is Low)(Load_covered_from_CHP is Medium) (1)
60. If (Solar_panel_energy_production is High) and (Wind_turbine_energy_production is Very_high) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is Battery_ON_CHARGE)(Load_covered_from_CHP is Medium) (1)
61. If (Solar_panel_energy_production is Very_high) and (Wind_turbine_energy_production is Very_high) and (Energy_demand is Very_high) then (Battery_Storage_Contribution is Battery_ON_CHARGE)(Load_covered_from_CHP is Medium) (1)

Εικόνα 6.34: Βάση κανόνων ασαφούς λογικής 2^{ου} ελεγκτή (49-61)



Εικόνα 6.35: Απεικόνιση αποτελεσμάτων της εξόδου «Κάλυψη φορτίου από ΣΗΘ» στον Surface Viewer

6.3.4 Παραδείγματα υπολογισμών μέσω συστήματος ασαφούς συμπερασμού του 2^{ου} ελεγκτή

Όπως και στην περίπτωση του 1^{ου} ελεγκτή έτσι και τώρα θα παρουσιαστούν παραδείγματα υπολογισμού μέσω του συστήματος ασαφούς συμπερασμού του 2^{ου} ελεγκτή, ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία του.

Πίνακας 6.14: Παράδειγμα 1, διαχείρισης φορτίου από τον 2^ο ελεγκτή

Είσοδος	Τιμή εισόδου (MWh)	Έξοδος	Τιμή εξόδου (MWh)
Παραγωγή ΦΒ	0.303 (Πολύ υψηλή)	Κάλυψη φορτίου από ΣΗΘ (CHP)	CHP-OFF
Παραγωγή Α/Γ	1.76 (Υψηλή)	Διείσδυση Συσσωρευτών	0.375 (Μέτρια)
Ζήτηση ενέργειας	2.04 (Μέτρια)		

Στο παράδειγμα 1 βλέπουμε πως η συνολική ζήτηση φορτίου 2,04 MWh, καλύπτεται κατά κύριο λόγο από την ενέργεια που παράγει η ανεμογεννήτρια, με σημαντική συμμετοχή των ΦΒ στοιχείων, ενώ επικουρικά λειτουργεί και η συστοιχία μπαταριών με μέτρια διείσδυση. Εφόσον το φορτίο καλύπτεται από τις ΑΠΕ του δικτύου οι μονάδες ΣΗΘ βρίσκονται σε αναμονή (CHP-OFF). Ο ασαφής κανόνας που ικανοποιούν οι συνθήκες του πίνακα 6.14 είναι ο Νο28: *If (Solar panel energy production is Very High) and (Wind turbine energy production is High) and (Energy demand is Medium) then (Battery Storage Contribution is Medium)(Load converted from CHP is CHP-OFF).*

Πίνακας 6.15: Παράδειγμα 2, διαχείρισης φορτίου από τον 2^ο ελεγκτή

Είσοδος	Τιμή εισόδου (MWh)	Έξοδος	Τιμή εξόδου (MWh)
Παραγωγή ΦΒ	0.217 (Υψηλή)	Κάλυψη φορτίου από ΣΗΘ (CHP)	3.06 (Μέτρια)
Παραγωγή Α/Γ	1.1 (Μέτρια)	Διείσδυση Συσσωρευτών	0.425 (Μέτρια)
Ζήτηση ενέργειας	4.09 (Υψηλή)		

Στο δεύτερο παράδειγμα η συνολική ζήτηση ενέργειας είναι 4,09 MWh. Από τα διαγράμματα ωριαίας ζήτησης αντιλαμβανόμαστε, πως πρόκειται για επίπεδο ζήτησης της καλοκαιρινής περιόδου. Η παραγόμενη ενέργεια του αιολικού και του φωτοβολταϊκού πάρκου είναι 1,1 MWh 0,217 MWh αντίστοιχα. Μέσω του συστήματος ασαφούς συμπερασμού υπολογίζεται πως η κάλυψη φορτίου από τις μονάδες ΣΗΘ είναι 3.06. Επομένως θα λειτουργήσουν 3 μονάδες ισχύος 1 MW η κάθε μια, και μέρος του φορτίου θα καλυφθεί από τα 1,742 MW των ΑΠΕ με μέτρια διείσδυση του συστήματος μπαταριών. Ο ασαφής κανόνας που ικανοποιείται σε αυτό το σενάριο είναι Νο39: *If (Solar panel energy*

production is High) and (Wind turbine production is medium) and (Energy demand is High) then (Battery Storage Contribution is Medium) (Load covered from CHP is Medium). Στις εικόνες 6.36 και 6.37 βλέπουμε το παράθυρο του Rule Viewer στο οποίο βγήκαν τα αποτελέσματα των δύο παραδειγμάτων.



Εικόνα 6.36: Αποτελέσματα του συστήματος ασαφούς συμπερασμού παραδείγματος 1



Εικόνα 6.37: Αποτελέσματα του συστήματος ασαφούς συμπερασμού παραδείγματος 2

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική ενασχόληση

Στην παρούσα ΔΕ διερευνήθηκε δυνατότητα δημιουργίας ενός αυτόνομου μικροδικτύου με ΑΠΕ στο νησί της Σίφνου και ο σχεδιασμός δύο ελεγκτών, οι οποίοι λειτουργούν βασισμένοι σε συστήματα ασαφούς συμπερασμού, με σκοπό την πρόβλεψη φορτίου και την διαχείριση ενέργειας στο μικροδίκτυο. Η υλοποίηση των δύο ασαφών ελεγκτών θέλησε να συνδυάσει το πολλά υποσχόμενο πεδίο των μικροδικτύων με τον συναρπαστικό και ουσιαστικά αναγκαίο τομέα της πρόβλεψης φορτίου και της ευφυούς διαχείρισης ενέργειας.

Με στόχο τα παραπάνω, δημιουργήθηκε ο πρώτος ελεγκτής, σκοπός το οποίου ήταν η πρόβλεψη των επιπέδων παραγωγής ενέργειας σε μονάδες του μικροδικτύου, οι οποίες παρουσιάζουν στοχαστική συμπεριφορά. Με την βοήθεια των ασαφών συστημάτων συμπερασμού, υπολογίστηκαν οι τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψιν αβέβαιες μεταβλητές όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου. Έπειτα σχεδιάστηκε ένας δεύτερος ελεγκτής, ο οποίος λαμβάνει σαν εισόδους την παραγόμενη ενέργεια των μονάδων ΑΠΕ του μικροδικτύου και συγκρίνοντας τις με την ζήτηση φορτίου, διαχειρίζεται τους μη στοχαστικούς διαθέσιμους πόρους, τις μπαταρίες και της μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας ηλεκτρισμού. Έτσι σε ένα περιβάλλον φιλικό προς τον χρήστη και χωρίς να απαιτείται η χρονοβόρα ακριβής μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος, δομήθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης και κάλυψης φορτίου σε ένα μικροδίκτυο.

Τέλος, η παρούσα ΔΕ θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ως βάση για την δημιουργία συστημάτων ασαφούς συμπερασμού με σκοπό την μελέτη ποικίλων και πολύπλοκων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Κάποιες πιθανές τροποποιήσεις που θα μπορούσαν να γίνουν είναι, η μοντελοποίηση και εξέταση της ενεργειακής συμπεριφοράς επιπλέον μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (π.χ. οι υδροστρόβιλοι), η διαχείριση του φορτίου τους σε ένα δίκτυο που θα περιλαμβάνει και άλλες ΑΠΕ, με πολυπλοκότερο προφίλ ζήτησης.

Βιβλιογραφία

- [1] «H. Sæle, A. Morch, A. Buonanno, M. Caliano, M. D. Somma and C. Papadimitriou, "Development of Energy Communities in Europe,"» σε *2022 18th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Ljubljana, Slovenia, pp. 1-5, doi: 10.1109/EEM54602.2022.9921054, 2022.
- [2] Dondi, Peter & Bayoumi, Deia & Haederli, Christoph & Julian, Danny & Suter, Marco, «Network integration of distributed power generation,» *Journal of Power Sources - J POWER SOURCES*, τόμ. 106, αρ. 1-2, pp. 1-9, 2002.
- [3] Α. Τσικαλάκης, «Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης,» 2008.
- [4] Y. Y. Adajah, S. Thomas, M. S. Haruna and S. O. Anaza, Abuja, Nigeria, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICMEAS52683.2021.9, « "Distributed Generation (DG): A Review",» σε *2021 1st International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS)*, Abuja, Nigeria, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICMEAS52683.2021.9, 2021.
- [5] R.W. Flumerfelt and S.S. Wang, «Wind Power,» *Access science*, 2020.
- [6] «Άυλη Πολιτιστική Κληρονομιά της Ελλάδας,» 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ayla.culture.gr/>.
- [7] Blaajberg, F. & Ma, Ke, «Wind Energy Systems,» *Proceeding of the IEEE*, τόμ. 105, αρ. 11, pp. 2116-2131, doi: 10.1109/JPROC.2017.2695485, 2017.
- [8] Dambhare, Mugdha & Butey, Bhavana & Moharil, Sanjiv, «Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends,» *Journal of Physics: Conference Series*, Τόμ. %1 από %21913, doi: 10.1088/1742-6596/1913/1/012053, 2021.
- [9] «What is Photovoltaics,» G2V, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://g2voptics.com>.

- [10] Γ. Χ. Γούτσος, «Υβριδικά Φ/Β συστήματα. Εφαρμογή σε δημόσιο κτήριο,» 2016.
- [11] Αιολική Γη Α.Ε., «Ετήσια παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκό σταθμό,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.aiolikigi.gr.
- [12] C. Wang and M. H. Nehrir, «Distributed Generation Applications of Fuel Cells,» σε *2006 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, Clemson, SC, USA, pp. 244-248, doi: 10.1109/PSAMP.2006.285395, 2006.
- [13] A.Z. Vougioukli, «Feasibility and environmental appraisal of a small hydro-power plant,» Piraeus, 2013.
- [14] Υπουργείο Ενέργειας ΗΠΑ, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.energy.gov>.
- [15] H. Kulasekara and V. Seynulabdeen, «A Review of Geothermal Energy for Future Power Generation,» σε *2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, Dhaka, Bangladesh, 2019, pp. 223-228, doi: 10.1109/ICAEE48663.2019.8975470, 2019.
- [16] M. Faisal, M. A. Hannan, P. J. Ker, A. Hussain, M. B. Mansor and F. Blaabjerg, «Review of Energy Storage System Technologies in Microgrid Applications: Issues and Challenges,» *IEEE Access*, τόμ. 6, pp. 35143-35164, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2841407, 2018.
- [17] Georgious, Ramy & Refaat, Rován & Garcia, Jorge & Daoud, Ahmed, «Review on Energy Storage Systems in Microgrids,» *Electronics*, αρ. 10, doi: 10.3390/electronics10172134, 2021.
- [18] ΑΔΜΗΕ, «Βασικά στοιχεία συστήματος μεταφοράς ενέργειας,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.admie.gr>.
- [19] ΔΕΗ, «Συμβατική Παραγωγή,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dei.gr>.
- [20] ΔΕΔΔΗΕ, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://deddie.gr>.

- [21] Shady S. Refaat, Omar Ellabban, Sertac Bayhan, Haitham Abu-Rub, Frede Blaabjerg, Miroslav M. Begovic, *Smart Grid and Enabling Technologies*, Wiley-IEEE Press, 2021.
- [22] Siemens, «Energy intelligence,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://new.siemens.com>.
- [23] Nikos Hatziargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*, Wiley-IEEE Press, 2014.
- [24] Bani-Ahmed, Salam & Weber, Luke & Nasiri, Adel & Hosseini, Hossein, «Microgrid communications: State of the art and future trends,» σε *3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, Milwaukee, Wisconsin, USA 780. doi: 10.1109/ICRERA.2014.7016491, 2015.
- [25] Sami, Muhammad Salman; Abrar, Muahmmad; Akram, Rizwan; Hussain, Muhmmad Majid; Nazir, Mian Hammad; Khan, Muhammad Saad; Raza, Safdar, «Energy Management of Microgrids for Smart Cities: A Review,» *Energies*, τόμ. 24, αρ. 5976. doi: 10.3390/en14185976, 2021.
- [26] Δ. Κουκουλά, *Αποκεντρωμένος έλεγχος διαχείρισης διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων στα δίκτυα διανομής για παροχή επικουρικών υπηρεσιών*, Αθήνα, 2017.
- [27] Ronald R. Yager, Lotfi A. Zadeh, *An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems*, Springer US, 1992.
- [28] Κ. Παπαϊωάννου, *Εφαρμογές ευφυούς ελέγχου στον έλεγχο μικροδικτύου με φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτρια*, Πάτρα, 2017.
- [29] Code Crucks, «What is a fuzzy membership function - A complete guide,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://codecrucks.com>.
- [30] Aznarte, Jose & Alcalá-Fdez, Jesus & Arauzo-Azofra, Antonio & Benítez, José, «Fuzzy Autoregressive Rules: Towards Linguistic Time Series Modeling,» *Economic Reviews*, αρ. 30, pp. 646-668. doi: 10.1080/07474938.2011.553569., 2011.
- [31] Kovacic, Zdenko & Bogdan, Stjepan, *Fuzzy Controller Design: Theory and Applications*, CRC Press - Taylor and Francis. doi: 10.1201/9781420026504, 2006.

- [32] Β. Στεργιόπουλος, «Σίφνος: Παράδοση και καλαισθησία,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.in.gr.
- [33] Solargis, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://solargis.com/>.
- [34] «Κέντρο ανανεώσιμων πηγών και εξοικονόμησης ενέργειας,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://cres.gr>.
- [35] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, «Γεωπληροφοριακός Χάρτης,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://geo.rae.gr>.
- [36] Katsaprakakis, Dimitris & Dakanali, Eirini & Yiannis, Gyllis & Apostolos, Dimopoulos, «Ο ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΙΦΝΟΥ. ΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ,» σε *12^ο Εθνικό Συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργεια*, Θεσσαλονίκη, 2021.
- [37] Αλ. Κόντζηλας, Ανάλυση της διεύθυνσης ενέργειας σε μη διασυνδεδεμένα νησιά με χρήση μετεωρολογικών δεδομένων τυπικού ανεμολογικού έτους, Αθήνα, 2017.
- [38] «NASA Prediction of Worldwide Energy Resources,» NASA, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://power.larc.nasa.gov>.
- [39] «Solar Irradiation,» Energypedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://energypedia.info>.
- [40] S. Prajapati and E. Fernandez, «Performance Evaluation of Membership Function on Fuzzy Logic Model for Solar PV array,» σε *2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, Greater Noida, India. doi: 10.1109/GUCON48875.2020.9231202, 2020.
- [41] A. K. Tripathi, S. Ray and M. Aruna, «Analysis on Photovoltaic Panel Temperature under the Influence of Solar Radiation and Ambient Temperature,» σε *2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)*, Bhilai, India, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICAECT49130.2021.9392619, 2021.
- [42] N. H. Zaini, M. Z. Ab Kadir, M. Izadi, N. I. Ahmad, M. A. M. Radzi and N. Azis, «The effect of temperature on a mono-crystalline solar PV panel,» σε *2015 IEEE Conference*

on Energy Conversion (CENCON), Johor Bahru, Malaysia, pp. 249-253, doi: 10.1109/CENCON.2015.7409548, 2015.

- [43] A. Abir, D. Mehdi and S. Lassaad, «Pitch angle control of the variable speed wind turbine,» σε *2016 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Sousse, Tunisia, pp. 582-587, doi: 10.1109/STA.2016.7952021, 2016.

