



Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών
Συστημάτων

Μελέτη Σχεδίαση και Ανάπτυξη Μικροδικτύου Διεσπαρμένης Παραγωγής Ηλεκτρικής
Ενέργειας Βασιζόμενο σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) σε Ετερογενές
Τηλεπικοινωνιακό Περιβάλλον

Study, Design and Implementation of Microgrid for Distributed Energy Resources based on
Renewable Energy Resources in Heterogeneous Communication Systems

Η Διπλωματική Εργασία
παρουσιάστηκε ενώπιον
του Διδακτικού Προσωπικού του
Πανεπιστημίου Αιγαίου

Σε Μερική Εκπλήρωση
των Απαιτήσεων για το
“Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης
στις Τεχνολογίες και Διοίκηση
Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών
Συστημάτων.

του
Αρχοντού Νικόλαου
ΕΑΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2021

Η ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΩΝ ΕΠΙΚΥΡΩΝΕΙ
ΤΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ ΑΡΧΟΝΤΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ:

Βουγιούκας Δημοσθένης, Επιβλέπων, 10/3/2021

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και
Επικοινωνιακών Συστημάτων

Σκιάνης Χαράλαμπος, Μέλος

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και
Επικοινωνιακών Συστημάτων

Σκούτας Δημήτριος, Μέλος

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και
Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΕΑΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2021

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ολοκληρωμένη μελέτη, σχεδίαση και ανάπτυξη μικροδικτύου διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο είναι βασιζόμενο σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) σε ετερογενές τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον με γνώμονα Ανάπτυξης το Έξυπνο Ενεργειακό Δίκτυο.

Η παρούσα εργασία καλείται να μελετήσει τις ενεργειακές πλατφόρμες ανοιχτού κώδικα, όπως είναι το GridLAB-D, αλλά και τις επικοινωνιακές πλατφόρμες ανοιχτού κώδικα, όπως και το Network Simulator 3 (ns-3), καθώς και η μεταξύ τους συνένωση με τη χρήση προγραμμάτων συν-προσομοίωσης, όπως είναι το Hierarchical Engine for Large-scale Infrastructure Co-Simulation (HELICS).

Οι αυξημένες απαιτήσεις στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας των περιοχών καθώς και οι ελλείψεις ηλεκτρικής ενέργειας όπως σε απομακρυσμένα σημεία, τα προβλήματα ποιότητας του ρεύματος, οι διακοπές στις μέρες με μεγάλη λειτουργία και οι μεγάλες αυξήσεις στις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν οδηγηθεί στην ανάπτυξη πιο αξιόπιστων συστημάτων. Κύριο γνώρισμα της λειτουργίας του αποτελεί η αμφίδρομη ροή τόσο της ενέργειας όσο και των πληροφοριών. Η λύση είναι η διεσπαρμένη παραγωγή, που εφαρμόζεται εδώ και χρόνια σε κάποιες περιοχές του εξωτερικού, με μικρής κλίμακας πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκονται κοντά στο καταναλωτή.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της διεσπαρμένης παραγωγής στο Έξυπνο Ενεργειακό Δίκτυο, οι βασικές λειτουργίες, τα οφέλη κατασκευής της, οι αρχιτεκτονικές και τα πρωτοκολλά στα οποία βασίζεται. Επίσης στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο πλαίσιο της Διεσπαρμένης Παραγωγής όπως είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα αιολικά συστήματα και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί. Συνέχεια στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στην έννοια των μικροδικτύων, δηλαδή στα βασικά στοιχεία και στις λειτουργίες του. Επιπλέον, το τέταρτο κεφάλαιο εμπεριέχει μια αναφορά στις τεχνολογίες επικοινωνιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις μονάδες της διεσπαρμένης παραγωγής και εξετάζονται οι ασύρματες και ενσύρματες τεχνολογίες, που μπορούν να εφαρμοστούν στο περιβάλλον του. Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια αναφορά στα προγράμματα προσομοίωσης και αναλύεται η ανάγκη ύπαρξης προγραμμάτων και λογισμικών προσομοίωσης σε δυο διαφορετικά επίπεδα, δηλαδή σε ενεργειακό και τηλεπικοινωνιακό επίπεδο καθώς και ο συνδυασμός αυτών των δυο. Επιπροσθέτως, γίνεται μια εμπεριστατωμένη καταγραφή και περιγραφή των διάφορων εργαλείων ανοιχτού κώδικα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της διεσπαρμένης παραγωγής στα πλαίσια του Έξυπνου Ενεργειακού Δικτύου. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενέστερη αναφορά στα προγράμματα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το έβδομο κεφάλαιο αφιερώνεται στην επεξήγηση της εγκατάστασης των απαραίτητων προγραμμάτων. Στο όγδοο κεφάλαιο επεξηγούνται αναλυτικά τα σενάρια

προσομοίωσης που δημιουργήθηκαν καθώς και ο τρόπος εκτέλεσης των σεναρίων μέσω των προσομοιωτών. Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα διάφορα σενάρια προσομοίωσης και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της τηλεπικοινωνιακής κίνησης καθώς και η συνολική επίδοση του συστήματος. Καταληκτικά, το τελευταίο κεφάλαιο αποτελεί τον επίλογο της διπλωματικής εργασίας, εκφράζοντας τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Λέξεις κλειδιά: Έξυπνο Ενεργειακό Δίκτυο, GridLAB-D, ns-3, FNCS, Διεσπαρμένη παραγωγή, Οπτικές επικοινωνίες (Fiber Communications), Trace Metrics, NetAnim

© 2021

του

ΑΡΧΟΝΤΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the comprehensive study, design and development of a microgrid of distributed electricity production which is based on renewable energy sources (RES) in a heterogeneous telecommunications environment with the development of the Smart Energy Grid.

The present work is called to study open source energy platforms, such as GridLAB-D, but also open source communication platforms, such as Network Simulator 3 (ns-3), and how to integrate them using programs plus -simulation, such as the Hierarchical Engine for Large-scale Infrastructure Co-Simulation (HELICS).

Increased demands on electricity systems in the area as well as electricity shortages such as remote locations, power quality problems, interruptions in busy days and large increases in electricity prices have led to the development of more reliable systems. The main feature of its operation is the two-way flow of both energy and information. The solution is distributed generation, which has been applied for years in some areas abroad, with small-scale sources of electricity generation that are close to the consumer.

Initially, the first chapter analyzes the concept of distributed generation in the Intelligent Energy Network, the basic functions, the benefits of its construction, the architectures and the protocols on which it is based. Also in the second chapter a reference is made to renewable energy sources in the context of Scattered Production such as photovoltaic systems, wind systems and hydroelectric power stations. Continuation in the third chapter refers to the concept of micro-networks, ie its basic elements and functions.

In addition, the fourth chapter contains a reference to the communication technologies that can be used in the units of distributed generation and examines the wireless and wired technologies that can be applied in its environment. The fifth chapter makes a reference to the simulation programs and analyzes the need for simulation programs and software at two different levels, at the energy and telecommunication level as well as the combination of the two.

In addition, a thorough recording and description of the various open source tools that can be used to study distributed generation within the Intelligent Energy Network is made. The sixth chapter provides a more detailed reference to the simulation programs used in the implementation of this dissertation. The seventh chapter is devoted to explaining the installation of the necessary programs.

The eighth chapter explains in detail the simulation scenarios that were created as well as how to execute the scenarios through the simulators. The ninth chapter presents the results for the various simulation scenarios and evaluates the results of the telecommunications traffic as well as the overall performance of the system. Finally, the last chapter is the epilogue of the dissertation, expressing the conclusions that emerge.

© 2021

ARCHONTOS NIKOLAOS

Department of Information and Communication Systems Engineering

UNIVERSITY OF THE AEGEAN

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών με τίτλο “Τεχνολογίες και Διοίκηση Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων” του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα της εργασίας κύριο Δημοσθένη Βουγιούκα, Καθηγητή και Πρόεδρο του Τμήματος για την σημαντική βοήθεια του καθώς επίσης και για το χρόνο που μου αφιέρωσε. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου για την ενθάρρυνση, την υποστήριξη και τη βοήθεια που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Αγγελή Νικόλαο, Υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος, για το χρόνο του, το ενδιαφέρον του και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Κατάλογος Περιεχομένων

Περιεχόμενα

Abstract	6
Κατάλογος Ακρωνυμίων	13
Κεφάλαιο 1 ^ο Διεσπαρμένη Παραγωγή στο Έξυπνο Ενεργειακό Δίκτυο	14
1.1 Εισαγωγή.....	14
1.2 Η ανάδειξη της διεσπαρμένης παραγωγής.....	15
1.3 Λόγοι μετατόπισης από τη συγκεντρωμένη παραγωγή σε διεσπαρμένη παραγωγή.	16
1.4 Σύνδεση της διεσπαρμένης παραγωγής με το έξυπνο ενεργειακό δίκτυο	17
1.6 Βασικές τεχνολογίες της διεσπαρμένης παραγωγής.....	19
1.7 Βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών της διεσπαρμένης παραγωγής.....	20
1.8 Μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής με συμβατικά καύσιμα	21
Κεφάλαιο 2 ^ο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στο πλαίσιο της Διεσπαρμένης Παραγωγής	24
2.1 Εισαγωγή.....	24
2.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα	24
2.2.1 Συσσωρευτές.....	26
2.2.2 Μονάδες ρύθμισης της ισχύος.....	27
2.2.3 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	28
2.2.3.1 Συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο.....	28
2.2.3.2 Συστήματα απομονωμένα από το δίκτυο	30
2.3 Αιολικά συστήματα	31
2.3.1 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών.....	32
2.4 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί	32
2.5 Συστήματα βιομάζας	33
Κεφάλαιο 3 ^ο Τα Μικροδίκτυα (Microgrids).....	34
3.1 Εισαγωγή.....	34
3.2 Βασικά στοιχεία του μικροδικτύου.....	35
3.3 Μικροδίκτυα και ενεργειακές κοινότητες.....	36
3.4 Λειτουργίες μικροδικτύων.....	37
3.5 Δομή Μικροδικτύου	38
3.6 Πλεονεκτήματα του Μικροδικτύου	39
Κεφάλαιο 4 ^ο Συστήματα τηλεπικοινωνιών στο πλαίσιο της διεσπαρμένης παραγωγής	40
4.1 Εισαγωγή.....	40
4.2 Ασύρματες Τεχνολογίες	41
4.3 Ενσύρματες Τεχνολογίες.	47
Κεφάλαιο 5 ^ο Ανοικτού τύπου λογισμικά ανάπτυξης για το Μοντέλο της Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	49
5.1 Κίνητρα	49
5.2 Η αναγκαιότητα της προσομοίωσης	50
5.3 Λογισμικά προσομοίωσης στο ενεργειακό επίπεδο	51

5.4 Λογισμικά προσομοίωσης στο επικοινωνιακό επίπεδο	53
5.5 Λογισμικά προσομοίωσης και των δυο επίπεδων (Co-Simulation).....	56
Κεφάλαιο 6: Συν – Προσομοίωση στο πλαίσιο της διεσπαρμένης παραγωγής.....	57
6.1 Επισκόπηση συν-προσομοίωσης.....	57
6.2 Επεξήγηση του προσομοιωτή GridLAB-D.	58
6.2.1 Επεξήγηση των στελεχών (modules) στην συν-προσομοίωση.....	59
6.3 Επεξήγηση του προσομοιωτή Network – Simulator 3 (NS-3).....	62
6.3.1 Βασικές κατηγορίες του NS-3.....	64
6.3.2 Βασικές δομές του ns-3	65
6.4 Σύστημα εντοπισμού (Tracing System).....	67
6.5 Hierarchical Engine for Large-scale Infrastructure Co-Simulation (HELICS)	68
6.5.1 Βασικά χαρακτηριστικά του HELICS	68
6.5.2 Βήματα της διαδικασίας συν-προσομοίωσης με το HELICS.....	69
6.5.3 Ανάλυση του HELICS.....	70
6.6 Netanim	71
6.7 Tracemetrics	72
Κεφάλαιο 7ο Ανάπτυξη και περιγραφή της προσομοίωσης του μοντέλου διεσπαρμένης παραγωγής	72
7.1 Εγκατάσταση του περιβάλλοντος συν-προσομοίωσης.....	72
7.1.1 Εγκατάσταση της βιβλιοθήκης ZeroMQ	73
7.1.2 Εγκατάσταση βιβλιοθήκης Boost	74
7.1.3 Εγκατάσταση του βασικού προσομοιωτή HELICS	75
7.1.4 Εγκατάσταση του προσομοιωτή GridLAB-D.....	76
7.1.5 Εγκατάσταση του προγράμματος Xerces-C++	77
7.1.6 Εγκατάσταση του NS-3	78
7.1.7 Εγκατάσταση του προγράμματος NetAnim.....	80
7.1.8 Εγκατάσταση του εργαλείου TraceMetrics	81
7.2 Υλοποίηση σεναρίου προσομοίωσης.....	82
7.2.1 Ανάπτυξη σεναρίου μέσω του GridLAB-D.....	83
7.2.2 Ανάπτυξη σεναρίου μέσω Ns-3.....	84
7.2.3 Επεξήγηση της λειτουργίας του HELICS.....	89
Κεφάλαιο 8ο Ανάλυση αποτελεσμάτων διεργασιών συν-προσομοίωσης.....	91
Κεφάλαιο 9ο Συμπεράσματα.....	105
Βιβλιογραφία.....	106

Κατάλογος Πινάκων

Table 1: Wifi Channel Throughput	91
Table 2:Wifi Channel Goodput	92
Table 3:Wifi Channel Delay all nodes	92
Table 4:Wifi Channel Jitter all nodes.....	93
Table 5: Throughput Ethernet Channel.....	93
Table 6:Goodput Ethernet Channel	94
Table 7:Delay Ethernet Channel.....	95
Table 8:Jitter Ethernet Channel	95
Table 9:Delay Of Point-Point Channel.....	96
Table 10:Goodput Of Point - Point Channel	96
Table 11:Delay Of Point -Point Channel.....	97
Table 12:Jitter Of Point-Point Channel	97
Table 13:Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 1	98
Table 14: Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 2	99
Table 15: Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 3	100
Table 16: Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 1 και ΑΠΕ.....	101
Table 17: Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 2 και ΑΠΕ.....	102
Table 18: Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 3 και ΑΠΕ.....	103
Table 19:Συμφασικότητα Μικροδικτύου.....	104

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Μοντέλο Διεσπαρμένης Παραγωγής	15
Εικόνα 2: Διαφορά κεντρικής και διεσπαρμένης παραγωγής	16
Εικόνα 3: Τεχνολογίες μονάδων διανεμημένης παραγωγής.	20
Εικόνα 4: Φωτοβολταϊκή συστοιχία	26
Εικόνα 5: Φωτοβολταϊκό σύστημα	29
Εικόνα 6: Μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός.....	33
Εικόνα 7: Επισκόπηση του Μικροδικτύου.....	36
Εικόνα 8: Η δομή ενός μικροδικτύου	38
Εικόνα 9: Η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική του HELICS.	71
Εικόνα 10: Το μοντέλο της προσομοίωσης στο πρόγραμμα NetAnim.....	71
Εικόνα 11: Αρχικό παράθυρο TraceMetrics	72
Εικόνα 12: Εγκατάσταση Linux.....	73
Εικόνα 13: Επιτυχής εγκατάσταση της βιβλιοθήκης ZeroMQ	74
Εικόνα 14: Επιτυχής εγκατάσταση της βιβλιοθήκης Boost.....	75
Εικόνα 15: Επιτυχής εγκατάσταση Helics.....	76
Εικόνα 16: Επιτυχής εγκατάσταση Gridlab-d	77
Εικόνα 17: Επιτυχής εγκατάσταση του Xerces-c.....	78
Εικόνα 18: Επιτυχής εγκατάσταση του NS-3.....	80
Εικόνα 19: Αρχικό παράθυρο του NetAnim.....	81
Εικόνα 20: Αρχικό παράθυρο του Tracemetrics.....	82
Εικόνα 21: Αρχιτεκτονική του 802.11 στο Ns-3.....	85
Εικόνα 22: Το μοντέλο της διάδοσης μέσω του WifiChannel	86
Εικόνα 23: Κώδικας για το μοντέλο καθυστέρησης διάδοσης.....	87
Εικόνα 24: Τοπολογία μοντέλου στο Ns-3	89
Εικόνα 25: Τελικό περιβάλλον προσομοίωσης.....	90

Κατάλογος Ακρωνυμίων

Ακρωνύμιο	Επεξήγηση
ΕΕΔ	Έξυπνο Ενεργειακό Δίκτυο
Dispersed generation	Διεσπαρμένη παραγωγή
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
HELICS	Hierarchical Engine for Large-scale Infrastructure Co-Simulation
Ns-2	Network Simulator 2
Ns-3	Network Simulator 3
LTE	Long-Term Evolution
PLC	Power Line Communication
Wide-Area Situational Awareness	WASA
DER	Distributed Energy Resource
DR	Demand Response

Κεφάλαιο 1° Διεσπαρμένη Παραγωγή στο Έξυπνο Ενεργειακό Δίκτυο

1.1 Εισαγωγή

Η διεσπαρμένη παραγωγή ορίζεται ως η παραγωγή ενέργειας από πολλές, μικρές και διεσπαρμένες γεωγραφικά μονάδες παραγωγής, με τιμές που κατά κανόνα κυμαίνονται από 1kW μέχρι 100MW και αποτελούν μία σχετικά σύγχρονη τάση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αλλά ως ιδέα δεν είναι καινούργια.

Τα συστήματα της διεσπαρμένης παραγωγής έχουν κάνουν την εμφάνιση τους ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια. Ουσιαστικά αποτελούν συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία συνδέεται άμεσα στο έξυπνο ενεργειακό δίκτυο και δημιουργείται έτσι η λεγόμενη αμφίδρομη διαδρομή του ηλεκτρικού ρεύματος. Υπάρχουν και άλλοι ορισμοί στη διεθνή βιβλιογραφία για την συγκεκριμένη παραγωγή είναι οι λέξεις διάσπαρτη, αποκεντρωμένη και ενσωματωμένη

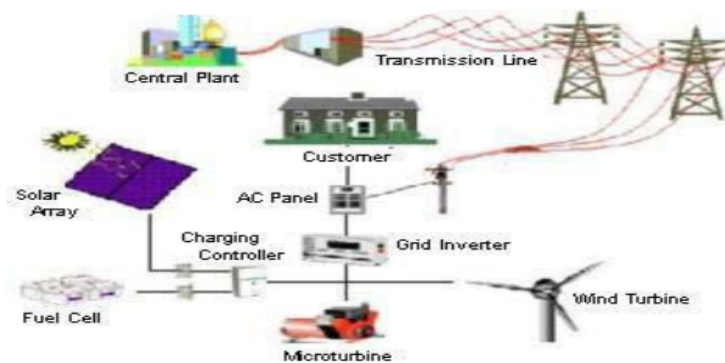
Το μέγεθος των μονάδων της διεσπαρμένης παραγωγής κυμαίνεται ανάλογα με την ισχύ που παράγουν η οποία μπορεί να είναι από λίγα kW έως και μερικές εκατοντάδες MW. Ο όρος της διεσπαρμένης παραγωγής αυξάνεται συνεχώς σε ολοένα και περισσότερα μοντέλα.

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στην έννοια της διεσπαρμένης παραγωγής είναι οι αναλώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) καθώς χάρη σε αυτές πετυχαίνετε μεγάλη μείωση των βλαβερών εκπομπών αερίων και έτσι πολλές χώρες επενδύουν σε αυτές ώστε το μεγάλο μέρος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να βασίζεται σε αυτές.

Γενικά, ο όρος διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να οριστεί ως η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσα σε ένα διεσπαρμένο δίκτυο ή στο δίκτυο αλλά στη μεριά του καταναλωτή ,όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα

Πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες της διεσπαρμένης παραγωγής ανάλογα με το μέγεθος τους ή με την τεχνολογία στην οποία βασίζονται χωρίζονται σε βασικές κατηγορίες. Αρχικά, με βάση το μέγεθος τους χωρίζονται στα εξής:

- Πολύ μικρές μονάδες (*micro, 1W-5kW*)
- Μικρές (*small, 5kW-5MW*)
- Μεσαίες (*medium, 5MW-50MW*)
- Μεγάλες (*large, 50MW-350MW*)



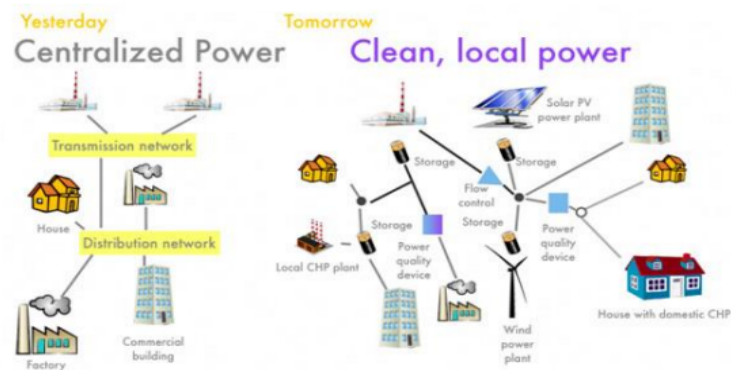
Εικόνα 1: Μοντέλο Διεσπαρμένης Παραγωγής [1]

1.2 Η ανάδειξη της διεσπαρμένης παραγωγής

Η έννοια της διεσπαρμένης παραγωγής δεν είναι νέα. Ιστορικά τα αρχικά δίκτυα ηλεκτρισμού βασιζόντουσαν σε συνεχές ρεύμα και εξυπηρετούσαν τοπολογίες μικρής έκτασης. Η ιδέα της διεσπαρμένης παραγωγής υπήρχε από το παρελθόν και έπαιζε και σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πορεία όμως της εξέλιξης το ηλεκτρικό δίκτυο βασίστηκε στο εναλλασσόμενο ρεύμα το οποίο επέτρεπε την μεταφορά της ενέργειας σε μακρινές αποστάσεις. Με βάση τη μεγάλη ζήτηση για ενέργεια οδηγήθηκαν στην δημιουργία μεγαλύτερων σταθμών παραγωγής που είχαν ως στόχο την βελτίωση της απόδοσης και της ελάττωσης του κόστους της ενέργειας που παράγεται. Το παρόν ηλεκτρικό δίκτυο, βασίζεται περισσότερο στη συγκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από εργοστάσια μεγάλης ισχύος που οδηγείται με γραμμές υψηλής τάσης και παραδίδεται στους καταναλωτές με γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης.

Σκοπός της διεσπαρμένης παραγωγής ορίζεται ως η παραγωγή ενεργού ισχύος για την κάλυψη των αναγκών γειτονικών στο σημείο σύνδεσής τους καταναλωτών. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, για παράδειγμα όταν η ζήτηση είναι περιορισμένη και η παραγωγή τους αυξημένη, η παραγόμενη ενέργεια, είναι δυνατόν, να εξάγεται στο σύστημα μεταφοράς.

Τα τελευταία χρόνια όμως τα συμβατικά συστήματα παραγωγής ενέργειας αντιμετωπίζουν παγκοσμίως προβλήματα, όπως η σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων, η χαμηλή απόδοση και η περιβαλλοντική ρύπανση. Συγχρόνως, οι τεχνολογικές καινοτομίες, οι αλλαγές στο ρυθμιστικό περιβάλλον και η ανησυχία για την κλιματική αλλαγή έχουν δημιουργήσει ένα διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ευρεία ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής η οποία διανέμεται στο δίκτυο από μια ποικιλία αποκεντρωμένων τοποθεσιών.[1]



Εικόνα 2: Διαφορά κεντρικής και διεσπαρμένης παραγωγής

1.3 Λόγοι μετατόπισης από τη συγκεντρωμένη παραγωγή σε διεσπαρμένη παραγωγή.

Η εισχώρηση της διεσπαρμένης παραγωγής στο πλαίσιο του έξυπνου ενεργειακού δικτύου βασίζεται στους παρακάτω παράγοντες βάσει του Αμερικάνικου Οργανισμού Ενέργειας (US Department of Energy):

- Ανάπτυξη στις τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής.
- Οι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς
- Οι αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιόπιστη ενέργεια
- Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Οι ανησυχίες για τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές.

Ουσιαστικά, μέσω της αύξησης των μεγεθών των υποσταθμών παραγωγής ενέργειας λύθηκε το πρόβλημα της μείωσης του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς δεν υπήρχε πλέον πρόβλημα εγκατάστασης και μεγέθους. Πιο συγκεκριμένα, ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας αναπτύσσετε χωρικά όσο πιο κοντά στην πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται, έτσι η παραγόμενη ενέργεια πρέπει να μεταδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις ώστε να φτάσει στους καταναλωτές.

Με σκοπό λοιπόν την αντιμετώπιση των προβλημάτων ρύπανσης του περιβάλλοντος μέσω της συμβατικής παραγωγής ενέργειας, επέστρεψε σαν ιδέα η διεσπαρμένη παραγωγή μέσω της οποίας μπορεί να μειωθεί η ρύπανση καθώς και η ανάγκη για κατασκευή μεγάλων και μεμονωμένων εργοστασίων. Η διεσπαρμένη παραγωγή λοιπόν είναι ικανή να τροφοδοτήσει με ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα ένα μεγάλο ποσοστό των καταναλωτών σε σύγκριση με τη συμβατική παραγωγή που στηρίζεται σε ένα μικρό αριθμό και μεγάλης έκτασης σταθμούς παραγωγής ενέργειας.

Τέλος ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό εκτός από το συνδυασμό θερμότητας και ενέργειας στα πλαίσια της κατανεμημένης παραγωγής αξιοποιούνται σε ένα μεγάλο βαθμό οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας με σκοπό τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε κοντινή απόσταση από τον καταναλωτή, το οποίο σημαίνει ότι οι απώλειες από τις γραμμές μεταφοράς μειώνεται σημαντικά. Επίσης ελαττώνονται σε σημαντικό βαθμό οι τυχόν βλάβες στις διατάξεις των δικτύων διανομής αφού οι απαιτήσεις από την μεριά των καταναλωτών εξασφαλίζονται από την ενέργεια που παράγεται τοπικά και σε μικρή απόσταση από εκείνους.[1]

1.4 Σύνδεση της διεσπαρμένης παραγωγής με το έξυπνο ενεργειακό δίκτυο

Η σύνδεση της διεσπαρμένης παραγωγής με το έξυπνο ενεργειακό δίκτυο επηρεάζει τελείως τον τρόπο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Αρχικά οι τελικοί καταναλωτές έχουν ένα σημαντικό ποσοστό ενεργειακής αυτονομίας καθώς και το ολικό σύστημα χαρακτηρίζεται από περισσότερη ευελιξία και καλύτερη απόδοση. Επίσης το ολικό σύστημα είναι περισσότερο ανεκτικό σε μικρούς παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας.

Εν συνεχεία, τα θετικά της σύνδεσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με το δίκτυο είναι πολύ σημαντικά τόσο στο επίπεδο των καταναλωτών όσο και στο επίπεδο των παραγωγών όσο και για το ίδιο το δίκτυο.

Τα κυριότερα οφέλη είναι τα εξής:

- *Σταθερή ρύθμιση της τάσης ώστε να μην υπάρχουν αυξομειώσεις και πτώσεις της τάσης.*
- *Βελτίωση της ποιότητας της ισχύος.*
- *Ελάττωση των απωλειών της ενέργειας.*
- *Ελάττωση της χωρητικότητας της ισχύς του δικτύου μεταφοράς και διανομής*
- *Βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου σε πολύ κρίσιμες περιπτώσεις όπως τα σφάλματα.*

Ακόμη, υπάρχουν και πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από την σύνδεση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής τα οποία μπορεί να είναι τα ακόλουθα:

- *Υποβιβασμός της ποιότητας ισχύος.*
- *Συγκεκριμένα προβλήματα στο έλεγχο του συστήματος.*
- *Αύξηση στις τιμές του ρεύματος.*
- *Πιθανές υπερτάσεις σε συγκεκριμένους καταναλωτές που προμηθεύονται ενέργεια από τον ίδιο μετασχηματιστή.*

Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος προέρχεται από τη λειτουργία των μονάδων ηλεκτρονικών ισχύος όπως είναι οι αντιστροφείς. Η λειτουργία των μονάδων αυτών είναι απαραίτητη ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη διαμόρφωση της κυματομορφής της τάσης η οποία δημιουργείται από τα συστήματα της διεσπαρμένης παραγωγής ώστε να πραγματοποιηθεί η σύνδεση τους με το έξυπνο ενεργειακό δίκτυο.

Ένα παράδειγμα αποτελούν οι συνδέσεις των φωτοβολταϊκών παράγουν σταθερή τάση (DC) ενώ η τάση ενός πάρκου αιολικής ενέργειας είναι εναλλασσόμενη αλλά χαρακτηρίζεται από μεγάλες διακυμάνσεις πλάτους και συχνότητας. Έτσι οι μονάδες των ηλεκτρονικών ισχύος που τοποθετούνται στην έξοδο των μονάδων παραγωγής θα εξασφαλίζουν ότι θα είναι κατάλληλη για την σωστή σύνδεση στο δίκτυο.

Μέσω της ενσωμάτωσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να υπάρξουν σφάλματα στο δίκτυο και για αυτό το λόγο είναι αναγκαίο να γίνεται σωστός σχεδιασμός για την προστασία και το έλεγχο του δικτύου από τον διαχειριστή του συστήματος. [1]

1.5 Η διεσπαρμένη παραγωγή στα πλαίσια της αγοράς ενέργειας.

Στη σημερινή εποχή και με τη παρούσα κατάσταση της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, οι καταναλωτές δίνουν ιδιαίτερη προσοχή στα διαφορετικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να επιλέξουν ποια υπηρεσία τους εξυπηρετεί καλύτερα. Για αυτό το λόγο λοιπόν ο τομέας της διεσπαρμένης παραγωγής κατέχει ένα σημαντικό ρόλο για τους προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας καθώς αποτελεί μια ευέλικτη μορφή παραγωγής ενέργειας που ανταποκρίνεται στις δύσκολες συνθήκες της αγοράς. Τα συστήματα της κατανεμημένης παραγωγής χαρακτηρίζονται από μικρό μέγεθος σε σχέση με τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής και έχουν μικρότερο χρόνο κατασκευής. Επίσης χαρακτηρίζονται από επεκτασιμότητα και ευελιξία στις διακυμάνσεις των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας.

Το ποσοστό κατά το οποίο η διανεμημένη παραγωγή βασίζεται στη λειτουργία και τη διάρθρωση της αγοράς ενέργειας και της τιμολόγησης των υπηρεσιών. Ακόμη ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί η αξιοπιστία των συγκεκριμένων συστημάτων όσο αναφορά στη παροχή ενέργειας και στην αποσυμφόρηση των δικτύων καθώς και στη δυνατότητα αυτόματης εκκίνησης των συστημάτων και στη σταθερότητα στην παροχή της ισχύος καθώς σε περίπτωση διακοπής ρεύματος μπορούν να δώσουν στο δίκτυο εφεδρική ισχύ.

Σε σχέση με τη ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας, η κατανεμημένη παραγωγή μπορεί να στηρίζει συγκεκριμένες χωρικές περιοχές όπου η δύναμη της τάσης είναι δύσκολη.

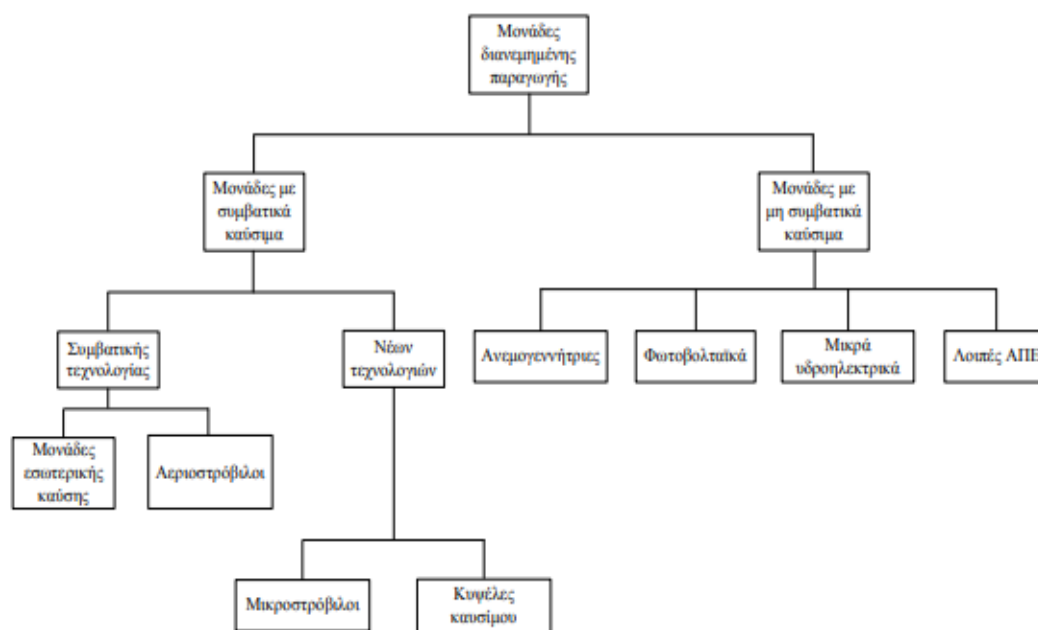
1.6 Βασικές τεχνολογίες της διεσπαρμένης παραγωγής

Οι βασικές τεχνολογίες που απαρτίζουν τη διεσπαρμένη παραγωγή χαρακτηρίζονται ως συστήματα παραγωγής ενέργειας μικρής κλίμακας και μπορούν να συνδυαστούν με βασικά συστήματα αποθήκευσης που τοποθετούνται στο τελικό καταναλωτή ή πολύ κοντά σε αυτόν. Πιο αναλυτικά, περιλαμβάνουν ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών οι οποίες μπορεί να είναι μονάδες καυσίμου, μικρού μεγέθους τουρμπίνες καθώς και διάφορα συστήματα που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επίσης, διαθέτουν συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος και διατάξεις επικοινωνίας και ελέγχου με σκοπό τη βέλτιστη απόδοση των ανεξάρτητων συστημάτων παραγωγής.

Το συνηθέστερο καύσιμο που χρησιμοποιούν τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής είναι το φυσικό αέριο. Και το υδρογόνο όμως μπορεί να παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στο μέλλον. Τεχνολογίες

ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα και ο άνεμος είναι επίσης διαδεδομένες

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται οι κυριότερες τεχνολογίες των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Συγκεκριμένα διακρίνεται ότι υπάρχει μια σαφής κατηγοριοποίηση των συγκεκριμένων μονάδων σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μονάδες που βασίζονται σε συμβατικά και μη ανανεώσιμα καύσιμα για τη λειτουργία τους και στην δεύτερη κατηγορία οι μονάδες που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.[2]



Εικόνα 3: Τεχνολογίες μονάδων διανεμημένης παραγωγής [2].

1.7 Βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών της διεσπαρμένης παραγωγής

Σε γενικές γραμμές, μέσω της διεσπαρμένης παραγωγής παρέχεται στο καταναλωτή μεγαλύτερη αξιοπιστία, ικανοποιητική ποιότητα ισχύος και η δυνατότητα για συμμετοχή σε μια ανταγωνιστική αγορά ενέργειας. Επίσης, ανοίγονται προοπτικές για την αποσυμφόρηση των υπερφορτωμένων γραμμών διανομής, για σωστό έλεγχο των διακυμάνσεων των τιμών του ηλεκτρικού ρεύματος καθώς και για ενδυνάμωση της ενεργειακής ασφάλειας. Συγκεκριμένα τα πλεονεκτήματα που υπάρχουν σε διάφορους τομείς είναι τα ακόλουθα:

- Σε οικονομικό επίπεδο:
 - Μειώνονται οι χρεώσεις της ζήτησης κάτι το οποίο οδηγεί σε μείωση του κόστους κατά τις

περιπτώσεις αιχμής.

➤ *Με την είσοδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υπάρχει ένα πιο προβλέψιμο ενεργειακό κόστος.*

- Σε λειτουργικό επίπεδο:

➤ *Προσφέρεται μεγαλύτερη αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος, ειδικά σε συγκεκριμένους χωρικές περιοχές όπου οι αυξομειώσεις τάσης αποτελούν ένα συχνό φαινόμενο και τα επίπεδα ενέργειας που προσφέρονται από το δίκτυο είναι αναξιόπιστα.*

➤ *Προσφέρεται ηλεκτρική ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η παραδοσιακές γραμμές μεταφοράς είναι δύσκολο να φτάσουν.*

➤ *Μειώνεται η υπερφόρτωση των γραμμών διανομής*

➤ *Αυξάνεται η αξιοπιστία του δικτύου.[2]*

1.8 Μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής με συμβατικά καύσιμα

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως η πρώτη κατηγορία των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής βασίζονται σε συμβατικά καύσιμα. Υπάρχουν συγκεκριμένα είδη τεχνολογιών που ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία.[2]

- **Γεννήτριες Diesel**

Οι γεννήτριες Diesel αποτελούν μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν με βάση τον πετρέλαιο Diesel. Το κύριο χαρακτηριστικό τους αποτελεί η χρήση ανάφλεξης υπό πίεση για την καύση του πετρελαίου το οποίο εισάγεται στο θάλαμο καύσης κατά τη διάρκεια του τελικού σταδίου συμπίεσης.

Η κύρια διαφορά τους με μια μηχανή βενζίνης είναι ότι η συγκεκριμένη βασίζεται σε ένα μίγμα καυσίμου και αέρα για την ανάφλεξη.

- **Μικροτουρμπίνες**

Οι συγκεκριμένες μονάδες αποτελούν περιστροφικές μηχανές που παράγουν ενέργεια από τη ροή αερίου υπό πίεση. Αποτελούνται από έναν συμπίεστή που συνδέεται με μια τουρμπίνα μέσω ενός θαλάμου καύσης. Οι μικροτουρμπίνες μπορούν να λειτουργήσουν με τη μέθοδο του απλού κύκλου ή της ανάκτησης θερμότητας. Σε έναν στρόβιλο απλού κύκλου, χωρίς ανάκτηση, μέσα στον καυστήρα προστίθεται ενέργεια στο ρεύμα αερίου, αέρας αναμιγνύεται με καύσιμο και αναφλέγεται.

Η καύση αυξάνει την θερμοκρασία, την πτητικότητα και τον όγκο του αερίου. Αυτό κατευθύνεται προς τις λεπίδες της τουρμπίνας, περιστρέφοντάς τη και ενεργοποιώντας το συμπίεστή. Οι μικροτουρμπίνες απλού κύκλου έχουν χαμηλότερο κόστος, υψηλότερη αξιοπιστία και περισσότερη θερμότητα διαθέσιμη για τις

εφαρμογές συμπαραγωγής, από ότι οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας.

Οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιούν ένα μηχανισμό εναλλαγής θερμότητας από το μέταλλο, που ανακτά τμήμα της θερμότητας από το ρεύμα αέρα που κατευθύνεται προς την εξάτμιση και το μεταβιβάζει στο εισερχόμενο κρύο ρεύμα αέρα. Ο θερμός αέρας χρησιμοποιείται έπειτα στη διαδικασία καύσης. Η προθέρμανση του αέρα, μειώνει την ποσότητα των απαιτούμενων καυσίμων για την αύξηση της θερμοκρασίας του στο απαραίτητο επίπεδο στην είσοδο του στροβίλου. Ο λόγος της ηλεκτρικής προς τη θερμική ενέργεια στις μονάδες ανάκτησης θερμότητας έχει υψηλότερη τιμή από τις μονάδες χωρίς ανάκτηση και, επιπλέον, οι πρώτες μπορούν να κάνουν εξοικονόμηση καυσίμων σε ποσοστό 30 με 40%, από τη διαδικασία της προθέρμανσης.

- **Κυψέλες καυσίμου**

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που καταναλώνει υδρογόνο και οξυγόνο και παράγει ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια (την άνοδο και την κάθοδο), τα οποία διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι από πολυμερές ή άλλο υλικό, το οποίο επιτρέπει την διέλευση ιόντων, αλλά όχι τη διέλευση των ηλεκτρονίων. Ένα καύσιμο που περιέχει υδρογόνο (π.χ. φυσικό αέριο) εισάγεται από την πλευρά της ανόδου, όπου τα ηλεκτρόνια του υδρογόνου ελευθερώνονται και κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα δίδοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και φτάνουν στην κάθοδο, όπου ενώνονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο, παράγοντας νερό. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία του ιονισμού του υδρογόνου χρησιμοποιείται ένας καταλύτης υψηλής αγωγιμότητας στα ηλεκτρόδια (π.χ. πλατίνα). Όταν το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι καθαρό υδρογόνο, τα μόνα παράγωγα της διεργασίας αυτής είναι ηλεκτρικό ρεύμα, καθαρό νερό και θερμότητα.

- **Μηχανές εσωτερικής καύσης**

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης βασίζονται στην μετατροπή θερμότητας από την καύση του καυσίμου σε περιστροφική κίνηση που στη συνέχεια οδηγεί μια γεννήτρια. Ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν μια αποδεδειγμένη τεχνολογία με χαμηλό κεφαλαιακό κόστος, με μεγάλο εύρος στην παραγωγή ενέργειας από λίγα kW έως αρκετά MW, με καλή απόδοση και καλή αξιοπιστία λειτουργίας.

Οι περισσότερες μηχανές εσωτερικής χρησιμοποιούν κλάσματα της απόσταξης του πετρελαίου, από βενζίνη για τις μικρότερες, πετρέλαιο diesel για τις λίγο μεγαλύτερες, έως και μαζούτ για μεγέθη που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή.

Αυτά τα χαρακτηριστικά, συνδυάζοντάς τα με τη δυνατότητα των μηχανών να ξεκινούν γρήγορα κατά τη διάρκεια μιας διακοπής λειτουργίας καθώς και ότι δεν εξαρτώνται από μεγάλους χώρους εγκατάστασης, τις κάνουν την κύρια επιλογή για έκτακτη ανάγκη ή εφεδρικές παροχές ηλεκτρικού ρεύματος.

- **Αεριοστρόβιλοι**

Οι αεριοστρόβιλοι αποτελούνται από έναν συμπιεστή, έναν καυστήρα και μια γεννήτρια τουρμπίνας που μετατρέπει την περιστροφική ενέργεια σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αεριοστρόβιλοι όλων των μεγεθών χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία ενέργειας. Παράγουν ισχύ μεταξύ 500 kW και 25 MW και χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, πετρέλαιο ή συνδυασμό καυσίμων.

Οι σύγχρονοι αεριοστρόβιλοι έχουν αποδόσεις 20 έως 45% σε πλήρες φορτίο. Μικροί βιομηχανικοί αεριοστρόβιλοι της τάξης των 1 - 20 MW χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού – Θερμότητας. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι όταν απαιτείται ατμός υψηλότερης θερμοκρασία.

- **Μηχανές Stirling**

Οι μηχανές Stirling έχουν κατηγοριοποιηθεί ως μηχανές εξωτερικής καύσης. Είναι σφραγισμένα συστήματα με ένα αδρανές αέριο που θέτει σε λειτουργία τη μηχανή, συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Συνήθως είναι διαθέσιμες σε μικρά μεγέθη (1-25 kW) και προς το παρόν παράγονται σε μικρές ποσότητες για εξειδικευμένες εφαρμογές στη διαστημική και τη θαλάσσια βιομηχανία.

Κεφάλαιο 2^ο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στο πλαίσιο της Διεσπαρμένης Παραγωγής

2.1 Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή αλλιώς «ήπιες» μορφές ενέργειας αποτελούν μορφές ενέργειας οι οποίες μπορούν να διατεθούν προς εκμετάλλευση και προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες όπως είναι ο άνεμος, η γεωθερμία, η ηλιακή ενέργεια και η κυκλοφορία του νερού. Συγκεκριμένα σύμφωνα με τους διεθνείς οργανισμούς, ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να θεωρηθεί η αιολική ενέργεια, η ηλιακή, η αεροθερμική, η γεωθερμική, η υδροθερμική καθώς και η ενέργεια που παράγεται από βιομάζα και από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων.

Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δύο βασικά χαρακτηριστικά τους. Αρχικά η εκμετάλλευση των συγκεκριμένων μορφών ενέργειας δεν απαιτεί ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση άλλης ύλης αλλά απαιτεί μόνο εκμετάλλευση της υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Επίσης, ουσιαστικά ο συγκεκριμένος όρος αναφέρεται σε «καθαρές» μορφές ενέργειας οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον που δεν αποβάλουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά απόβλητα όπως οι συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας.

Οι πιο πολλές ΑΠΕ αποτελούν εξ ορισμού μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής αν και υπάρχουν εξαιρέσεις όπως είναι τα μεγάλα αιολικά πάρκα. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότερες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που βασίζονται σε ΑΠΕ.[3]

2.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Ο ήλιος αποτελεί την πιο σημαντική και αέναη μορφή ενέργειας. Παρόλα αυτά το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας παραμένει χωρίς εκμετάλλευση. Συγκεκριμένα εκτιμάται ότι το ποσοστό ηλιακής ενέργειας που καταφθάνει στο πλανήτη είναι 10.000 φορές μεγαλύτερο από τη συνολική παγκόσμια κατανάλωση. Σε διάστημα μισής ώρας ο πλανήτης λαμβάνει αρκετή ηλιακή ενέργεια ώστε να καλυφθούν οι παγκόσμιες ανάγκες ενός χρόνου. Η ηλιακή ενέργεια που αντανακλάται πάνω σε ένα τετραγωνικό

μέτρο κάθε χρόνο ισοδυναμεί ενεργειακά με ένα βαρέλι συμβατικού καυσίμου που σε αντίθεση με την ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια ρυπογόνα πηγή ενέργειας που ελαττώνεται συνέχεια.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν την σημαντικότερη τεχνολογία που βασίζεται σε ηλιακή ενέργεια στη διεσπαρμένη παραγωγή. Τα φωτοβολταϊκά μηχανήματα έχουν ως κυρίαρχο κομμάτι την «ηλιακή κυψέλη» (solar cell) η οποία αποτελεί ένα κατάλληλο ημιαγωγό λεπτού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια.

Αποτελούνται από κατάλληλους δίσκους πυριτίου που βρίσκονται σφραγισμένοι μέσα σε μια βάση από πλαστικό ώστε να υπάρχει προστασία από τις καιρικές συνθήκες και κυρίως την υγρασία. Η μπροστινή όψη του πλαισίου προστατεύεται μέσω ενός ανθεκτικού υλικού από γυαλί. Η κατασκευή αυτή, που δεν ξεπερνά σε πάχος τα 4 με 5 χιλιοστά του μέτρου, τοποθετείται συνήθως σε μια βάση αλουμινίου, όπως στους πίνακες γυαλιού των κτιρίων. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούν ένα μέρος του φωτοβολταϊκού συστήματος, το οποίο είναι κάθε φορά σχεδιασμένο για συγκεκριμένες λειτουργίες. Οι άλλες συσκευές που προστίθενται στο πλαίσιο μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες:[3]

- **Συσσωρευτές**

Το συγκεκριμένο είδος μηχανισμού είναι χρήσιμο στην αποθήκευση ενέργειας όταν αυτό απαιτείται (το βράδυ ή τις βροχερές μέρες).

- **Αντιστροφείς**

Το συγκεκριμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα είναι απαραίτητο για την αντιστροφή του συνεχούς ρεύματος που παράγεται στο φωτοβολταϊκό σε εναλλασσόμενο.

- **Ρυθμιστές**

Αυτές οι συσκευές είναι χρήσιμες στη διαχείριση την αποθηκευμένη ενέργεια στον συσσωρευτή και διοχετεύουν ενέργεια στο φορτίο.

- **Μηχανικές Κατασκευές**

Αναφέρονται σε όλες τις συσκευές που απαιτούνται για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών και των λοιπών συσκευών.

Η ύπαρξη της ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί μια ηλεκτρική τάση η οποία μέσω μιας κατάλληλης σύνδεσης σε φορτίο παράγεται σαν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά ομαδοποιούνται κατάλληλα και συγκροτούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή γεννήτριες, τυπικής ισχύος από 20W έως 300W. Οι

συγκεκριμένες γεννήτριες συνδέονται ηλεκτρολογικά μεταξύ τους και δημιουργούνται οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ή την ηλιακή γεννήτρια ρεύματος και τα ηλεκτρονικά ισχύος που διαχειρίζονται την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Για αυτόνομα συστήματα υπάρχει επίσης το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρίες.

Όταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διατίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέπουν ένα μεγάλο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται αθόρυβα, αξιόπιστα και χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις



Εικόνα 4: Φωτοβολταϊκή συστοιχία.[3]

2.2.1 Συσσωρευτές

Στα συστήματα που είναι απομονωμένα από το υπόλοιπο δίκτυο, ο μηχανισμός των φωτοβολταϊκών θα πρέπει κάθε φορά να παρέχει την ενέργεια που απαιτείται για την ομαλή λειτουργία του συστήματος ανεξάρτητα από το αν υπάρχει η όχι ηλιακή ενέργεια. Για αυτό το λόγο υπάρχουν οι συσσωρευτές ενέργειας, οι οποίοι είναι μηχανισμοί που αποθηκεύουν την ενέργεια που περισσεύει σε μέρες όπου υπάρχει μεγάλη ποσότητα από τις ηλιακές ακτίνες. Οι κυριότεροι τύποι μπαταριών που χρησιμοποιούνται στους συσσωρευτές είναι οι μόλυβδου-ασβεστίου και μόλυβδου-αντιμονίου. Λόγω των συνεχών αλλαγών στη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας, τα συστήματα των συσσωρευτών πρέπει να περνούν από πολλούς κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης χωρίς να χάνονται τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Το ποσοστό της

χωρητικότητας του συσσωρευτή που μπορεί να εκφορτιστεί χωρίς να καταστραφεί ονομάζεται βάθος αποφόρτισης και εξαρτάται από το είδος του.

Οι μολύβδου-ασβεστίου είναι μικρού βάθους αποφόρτισης και αντέχουν 20% εκφόρτιση σε κάθε κύκλο. Οι νικελίου-καδμίου είναι μεγάλου βάθους εκφόρτισης και αντέχουν 80% αποφόρτιση σε κάθε κύκλο. Οι συσσωρευτές χρειάζονται αλλαγή κάθε 5 με 10 χρόνια ανάλογα με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης και αποφόρτισης που κάνουν.

Μέσω του μηχανισμού των συσσωρευτών παρέχεται αυτονομία στο σύστημα η οποία ποικίλει από μερικές ημέρες έως δύο ή τρεις εβδομάδες. Η χρονική διάρκεια αυτονομίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος, δηλαδή από την τοποθεσία του και την ύπαρξη ή όχι γεννήτριας. Το βασικό χαρακτηριστικό των συσσωρευτών είναι η τάση τους, η οποία συνήθως είναι πολλαπλάσιο των 12 V, και η χωρητικότητά τους, η οποία υπολογίζεται σε αμπερώρια (Ah). Για παράδειγμα ένας συσσωρευτής 50Ah, 48V θα αποθηκεύσει υπό ονομαστικές συνθήκες 2400Wh.

Οι συσσωρευτές, πέραν της μείωσης της απόδοσης που προκαλούν, χρειάζονται περιοδική συντήρηση (έλεγχο υγρών) και έναν μεγάλο χώρο για να αποθηκευτούν. Ο σωστός υπολογισμός του μεγέθους του συσσωρευτή του συστήματος είναι καθοριστικός για την επίτευξη μεγάλης διάρκειας ζωής του, για την ιδανική απόδοση και για την επίτευξη ονομαστικού κόστους κύκλου ζωής του συστήματος.[3]

2.2.2 Μονάδες ρύθμισης της ισχύος

Στο πλαίσιο των φωτοβολταϊκών συστημάτων υπάρχουν συγκεκριμένες ηλεκτρονικές μονάδες οι οποίες είναι υπεύθυνες για τον έλεγχο και τη ρύθμιση της ισχύος που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Οι μονάδες αυτές είναι οι εξής:

- **Οι ρυθμιστές για την ομαλή φόρτιση των μπαταριών**

Οι συγκεκριμένες μονάδες είναι υπεύθυνες για την ομαλή φόρτιση και αποφόρτιση των συσσωρευτών. Όταν ένας συσσωρευτής χαρακτηρίζεται ως φορτισμένος πλήρως όταν δεν αφήνει άλλο ρεύμα να εισέλθει από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία στον συσσωρευτή.

Ομοίως, όταν ο συσσωρευτής έχει αδειάσει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, το οποίο ελέγχεται μέσω της μέτρησης της τάσης του συσσωρευτή, ο ελεγκτής δεν επιτρέπει να δοθεί άλλο ρεύμα από τους συσσωρευτές προτού επαναφορτιστούν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επιμήκυνση του χρόνου ζωής του συσσωρευτή.

- **Ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος**

Η συγκεκριμένη συσκευή είναι υπεύθυνη για την κατάλληλη επεξεργασία του ρεύματος και της τάσης εξόδου από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια ώστε για κάθε χρονική στιγμή το σύστημα να παίρνει τη μέγιστη ισχύ από την γεννήτρια.

- **Οι αντιστροφεείς**

Ορίζονται ως οι συσκευές οι οποίες είναι υπεύθυνες για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο.[3]

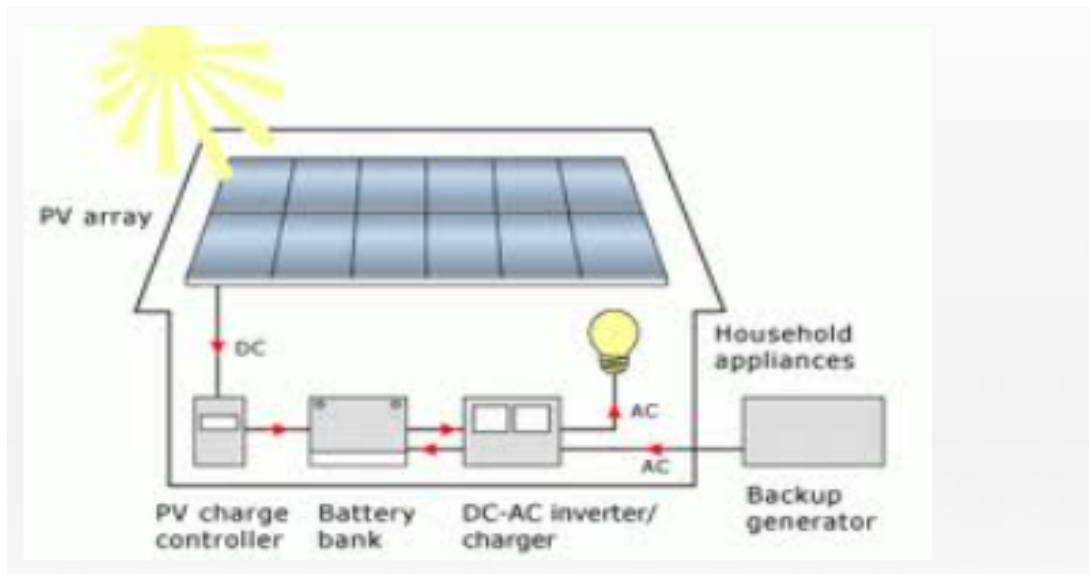
2.2.3 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αναφέρονται σε πολλές περιπτώσεις. Συγκεκριμένα οι κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται είναι οι εξής:

- *Τα συστήματα τα οποία είναι συνδεδεμένα με το υπόλοιπο δίκτυο.*
- *Τα συστήματα τα οποία έχουν διαχωριστεί από το υπόλοιπο δίκτυο.*

3.2.3.1 Συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο

Στα συνδεδεμένα συστήματα οι μονάδες των φωτοβολταϊκών τροφοδοτούν απευθείας με ηλεκτρική ενέργεια το δίκτυο όπως απεικονίζεται και στην παρακάτω εικόνα όπου δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός συσσωρευτή.



Εικόνα 5: Φωτοβολταϊκό σύστημα.[4]

Αυτά τα συστήματα μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές υποκατηγορίες:

- Στα συστήματα με κατανεμημένες φωτοβολταϊκές μονάδες που αυτές είναι τοποθετημένες στις σκέπες οικιακών σπιτιών ή εμπορικών κέντρων.
- Στις κεντρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας όπου οι φωτοβολταϊκές μονάδες συνδέονται με τους υποσταθμούς και μετά με το δίκτυο.

Στην πρώτη κατηγορία ο τελικός χρήστης ο οποίος έχει τη φωτοβολταϊκή μονάδα στην ιδιοκτησία του μπορεί είτε να αγοράζει είτε να πουλάει ενέργεια ανά πάσα χρονική στιγμή. Ουσιαστικά, έχει τη δυνατότητα να παίρνει την ενέργεια που χρειάζεται από τις φωτοβολταϊκές μονάδες και να χρησιμοποιεί το δίκτυο μόνο όταν είναι απαραίτητο δηλαδή κατά τη διάρκεια που δεν υπάρχει ηλιακή ενέργεια. Αυτή η διαδικασία καθίσταται εφικτή μέσω της χρήσης ενός κατάλληλου μετρητή που έχει την δυνατότητα να είναι αμφίδρομος. Ουσιαστικά στην περίπτωση που η φωτοβολταϊκή συστοιχία τροφοδοτεί το φορτίο ενός κτιρίου και υπάρχει περίσσεια ενέργεια, τότε τη διοχετεύει στο υπόλοιπο δίκτυο. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι μεγαλύτερο από την παραγωγή της συστοιχίας τότε η ζήτηση ικανοποιείται με την εισαγωγή της ενέργειας από το δίκτυο. Με αυτό το τρόπο λοιπόν, το δίκτυο λειτουργεί σαν μονάδα αποθήκευσης για το φωτοβολταϊκό σύστημα. [4]

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι ολοκληρωμένες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελούνται από φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Οι συγκεκριμένες μονάδες συνδέονται άμεσα με το υπάρχον δίκτυο όποτε κατασκευάζονται πολύ πιο γρήγορα.

Συνήθως τέτοιες μονάδες εγκαθίστανται κοντά στα σημεία του δικτύου όπου υπάρχει μεγάλη ζήτηση

ηλεκτρικής ενέργειας.

Μερικά πλεονεκτήματα των παραπάνω συστημάτων είναι η προβλεπόμενη μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας και η προστασία του περιβάλλοντος. Με την παραγωγή ενέργειας κοντά στο σημείο ζήτησης μειώνεται η απόσταση που πρέπει να διανύσει το ρεύμα και επιτυγχάνεται μείωση των ενεργειακών απωλειών και των απωλειών ισχύος στο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να αποφευχθεί σημαντικά η ανάγκη για αναβάθμιση το δικτύου μεταφοράς αφού σε πολλές περιπτώσεις οι ώρες αυξημένης ζήτησης ταυτίζονται με τις ώρες του μεσημεριού για παράδειγμα που η φωτοβολταϊκή συστοιχία δύναται να παράγει μεγάλη ισχύ. [4]

2.2.3.2 Συστήματα απομονωμένα από το δίκτυο

Στα απομονωμένα συστήματα οι μονάδες των φωτοβολταϊκών δεν συνδέονται με το κυρίως δίκτυο. Αυτά τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει δίκτυο που βασίζεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα είτε στις περιπτώσεις που υπάρχει μεγάλος κόστος στην εγκατάσταση μιας γραμμής που συνδέει το σύστημα με το δίκτυο είτε στις περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η σύνδεση λόγω μεγάλης απόστασης από τις μονάδες παραγωγής.

Τέτοια συστήματα μπορεί να αποτελούνται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία ή συσσωρευτή ή αντλία νερού ή ακόμη και γεννήτρια. Τα συστήματα που αποτελούνται μόνο από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι τα συστήματα εκείνα που δεν χρειάζονται ενέργεια σε μόνιμη βάση. Ουσιαστικά η λειτουργία τους βασίζεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη ηλιακή ενέργεια υπάρχει τόσο υπάρχει αύξηση στην ανάγκη για σωστή ψύξη.

Στη περίπτωση ύπαρξης συσσωρευτή το φωτοβολταϊκό σύστημα παρέχει την ενέργεια κάθε φορά που απαιτείται ανεξαρτήτως αν έχει ήλιο ή όχι διότι οι συσσωρευτές αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργειας όταν αυτή υπάρχει και την επιστρέφουν όταν χρειάζεται. Το πόση ενέργεια θα επιστρέψει εξαρτάται από το μέγεθος και το είδος του συσσωρευτή.

Όταν υπάρχει άλλου είδους γεννήτρια τότε το σύστημα είναι υβριδικό. Η γεννήτρια μπορεί να είναι πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Στα συστήματα αυτά η γεννήτρια και η φωτοβολταϊκή συστοιχία αλληλοσυμπληρώνονται. [4]

2.3 Αιολικά συστήματα

Η ενέργεια που χαρακτηρίζεται ως κινητική η οποία δημιουργείται από την ύπαρξη του αέρα ο οποίο επηρεάζει τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας τα οποία είναι συνδεδεμένα σε έναν περιστρεφόμενο άξονα. Το συγκεκριμένο είδος ενέργειας των πτερυγίων μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μια γεννήτριας. Έχουν υπάρξει διάφορες τεχνολογίες για την παραγωγή ενέργειας μέσω του αιολικού συστήματος. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες ενός οριζοντίου άξονα αλλά έχουν δημιουργηθεί και ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα λόγω του ότι αποδίδουν καλύτερα σε χαμηλά ποσοστά της ταχύτητας των ανέμων. Η χρήση αιολικής ενέργειας βασίστηκε αρχικά σε μικρού τύπου εγκαταστάσεις που είχαν σύνδεση σε χαμηλή και μέση τάση.

Τα συγκεκριμένα συστήματα αποτελούν μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής καθώς βασίζονται στα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Προσφέρουν εγγύηση στον τελικό καταναλωτή καθώς ένας μεγάλος αριθμός από ανεμογεννήτριες οι οποίες είναι εγκατεστημένες χωρικά κοντά στο τελικό χρήστη μπορούν να προσφέρουν τα κατάλληλα ποσοστά ενέργειας για την κάλυψη της τοπικής ζήτησης ή για την υποστήριξη της λειτουργίας του τοπικού δικτύου.
- Αποτελούν ένα σημαντικό σημείο διασύνδεσης καθώς οι ανεμογεννήτριες μπορεί να είναι συνδεδεμένες στην πλευρά του τελικού χρήστη ή απευθείας στο τοπικό δίκτυο.

Τα συστήματα αιολικής ενέργειας της διεσπαρμένης παραγωγής συνδέονται είτε στην πλευρά του μετρητή του πελάτη για την εξυπηρέτηση τοπικών φορτίων ή απευθείας στο δίκτυο διανομής για την υποστήριξη τοπικών λειτουργιών δικτύου ή αντιστάθμισης κοντινών φορτίων. Αυτή η διάκριση διαφοροποιεί τα τυπικά μικρότερα διεσπαρμένα αιολικά συστήματα από τα αιολικά πάρκα που αποτελούνται από δεκάδες ή εκατοντάδες ανεμογεννητριών πολλών MW που η ενέργεια τους μεταφέρεται μέσω γραμμών μεταφοράς σε υποσταθμούς για μεταγενέστερη παροχή στα φορτία.[4]

2.3.1 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

Οι σύγχρονες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό ανεμογεννητριών, από ένα σύστημα συλλογής και από υποσταθμούς συλλογής και διασύνδεσης με μονάδες που έχουν σχεδιαστεί με σκοπό τη βέλτιστη απόδοση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση αιολικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες έχουν εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια από μηχανές χαμηλής παραγωγής ενέργειας της τάξης των λίγων κιλοβάτ, σε μεγάλες μηχανές παραγωγής ενέργειας της τάξης των πολλών μεγαβάτ.

Η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών στα αιολικά πάρκα βασίζεται στο κατάλληλο σχεδιασμό και στις δυνατότητες των προς χρήση μονάδων. Για αυτό το λόγο στη παρούσα παράγραφο αναφέρονται οι βασικοί τύποι των ανεμογεννητριών με βάση τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, την τάση του, την ισχύ τους

Οι βασικές μέθοδοι λειτουργίας μια ανεμογεννήτριας βασίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνεται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας από την αιολική ενέργεια σε μηχανική. Αυτό γίνεται εφικτό μέσω της χρήσης πτερυγίων τα οποία χαρακτηρίζονται ως αεροδυναμικά, από ρότορες και από ένα εύρος μεθοδολογιών για το έλεγχο της ισχύς. Στη δεύτερη κατηγορία εμπεριέχεται η μετατροπή ενέργειας μέσω γεννήτριας η οποία μεταδίδεται στο υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τον μηχανικό έλεγχο ισχύος τους, και περαιτέρω να διαχωριστούν ανάλογα με τον έλεγχο της ταχύτητας τους.

Όλα τα πτερύγια της τουρμπίνας μετατρέπουν την κίνηση του αέρα μέσω των αεροτομών τους σε ροπή και στη συνέχεια ρυθμίζουν την εν λόγω ροπή σε μια προσπάθεια να πάρουν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια, αλλά αποφεύγοντας την πρόκληση βλάβης.[4]

2.4 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί εκμεταλλεύονται τη δυναμική ενέργεια της μάζας νερού που βρίσκεται σε κάποιο ύψος με σκοπό να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε κινητική κατά την πτώση του και στη συνέχεια σε ηλεκτρική καθώς το νερό κινεί έναν υδροστρόβιλο. Παρόλο που η υδραυλική ενέργεια παρέχεται δωρεάν από τη φύση, η κατασκευή μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών απαιτεί σημαντικές δαπάνες και έργα και έχει επίδραση στο περιβάλλον. Οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί δεν συγκαταλέγονται στις ΑΠΕ καθώς προκαλούν έντονη περιβαλλοντική αλλοίωση της περιοχής του έργου κυρίως λόγω της κατασκευής μεγάλων φραγμάτων.

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί δεν εμφανίζουν τα αρνητικά χαρακτηριστικά των μεγάλων σταθμών όσο αφορά την περιβαλλοντική επιβάρυνση. Οι μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικές μονάδες απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών, κάτι το οποίο μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρό και με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η κατασκευή φραγμάτων επηρεάζει ολόκληρο το οικοσύστημα καθώς μεταβάλλει ριζικά τη μορφολογία της περιοχής. Ωστόσο ένα καλά σχεδιασμένο μικρό υδροηλεκτρικό έργο μπορεί να ενταχθεί στον περιβάλλοντα χώρο έχοντας ελάχιστη αρνητική επίδραση στο περιβάλλον.

Τα μικρά υδροηλεκτρικά χρησιμοποιούν κυρίως το νερό του ποταμού με μικρή ή καθόλου ανάγκη χρήσης δεξαμενής. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι ο χρόνος κατασκευής τους είναι μικρός, είναι συστήματα συνεχούς ροής και σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα προσφέρουν τη δυνατότητα συνεχούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης λόγω του μικρότερου μεγέθους τους έχουν το πλεονέκτημα πως μπορούν να κατασκευαστούν πιο κοντά στην κατανάλωση σαν διεσπαρμένη παραγωγή. Για να περιοριστούν οι επιδράσεις στο περιβάλλον από την κατασκευή μεγάλων φραγμάτων τα προγράμματα επιχορηγήσεων καθώς και οι νόμοι για τις ΑΠΕ.[4]



Εικόνα 6: Μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός

2.5 Συστήματα βιομάζας

Με τον όρο βιομάζα αποκαλείται οποιοδήποτε υλικό παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς, όπως είναι το ξύλο και άλλα προϊόντα του δάσους, τα υπολείμματα των καλλιεργειών ή τα κτηνοτροφικά απόβλητα, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, μέσω κατάλληλων θερμοχημικών διεργασιών επεξεργασίας, για την παραγωγή ενέργειας.

Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια (ή σε θερμότητα) με διάφορες διαδικασίες. Η πλειοψηφία της ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα παράγεται χρησιμοποιώντας έναν κύκλο ατμού όπου

το υλικό της βιομάζας καίγεται για να δημιουργήσει ατμό σε έναν λέβητα. Ο εξαγόμενος ατμός χρησιμοποιείται έπειτα για να κινήσει ένα ατμοστρόβιλο συνδεδεμένο με μια γεννήτρια. Η βιομάζα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί μαζί με άνθρακα για να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η πιο οικονομική βραχυπρόθεσμη επιλογή για να εισαγάγει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα και ελαττώνει τις εκπομπές αερίων στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από κάρβουνο. Άλλη εναλλακτική λύση είναι να μετατραπεί η στερεά βιομάζα σε ένα αέριο καυσίμων. Το αέριο καυσίμων μπορεί κατόπιν να χρησιμοποιηθεί σε μια εμβολοφόρα μηχανή, σε μία γεννήτρια αεριοστρόβιλων υψηλής αποδοτικότητας ή σε κυψέλες καυσίμου.[4]

Τα κύρια εμπόδια στη διάδοση της χρήσης της βιομάζας για την ηλεκτρική παραγωγή είναι το κόστος, η χαμηλή απόδοση μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια και η διαθεσιμότητα σε πρώτη ύλη. Η βιομάζα έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, η οποία κάνει τη μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις δαπανηρή.

Κεφαλαίο 3^ο Τα Μικροδίκτυα (Microgrids)

3.1 Εισαγωγή

Τα μικροδίκτυα ορίζονται ως δίκτυα με χαμηλή τάση ή δίκτυα που βασίζονται στην κατανομημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας μονάδες που βασίζονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το πρώτο βασικό στοιχείο των μικροδικτύων είναι ότι έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ανεξάρτητα και να μην επηρεάζουν την λειτουργία του ολικού δικτύου σε περίπτωση βλάβης. Οι μονάδες παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε ένα μικροδίκτυο μπορεί να είναι μικροτουρμπίνες, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά πάρκα. Τα μικροδίκτυα ουσιαστικά χαρακτηρίζονται ως η πιο σημαντική προσέγγιση για την ανάπτυξη του έξυπνου ενεργειακού δικτύου καθώς η εφαρμογή τους πραγματοποιείται περισσότερο στο επίπεδο της διανομής ή της κατανάλωσης και αποτελούν την ελπιδοφόρα λύση όσο αναφορά στα ζητήματα που υπάρχουν από τις απαιτήσεις ενός έξυπνου ενεργειακού δικτύου.[5]

Πρακτικά η ανάπτυξη ενός μικροδικτύου βασίζεται στον γενικό έλεγχο όλου του συστήματος διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο έλεγχος του συστήματος διανομής χαρακτηρίζεται η διαδικασία εκείνη που ελέγχει όλους τους πόρους του συστήματος όπως είναι οι μονάδες της διεσπαρμένης παραγωγής, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας καθώς και τα φορτία που είναι ενσωματωμένα στο τοπικό δίκτυο.

Μέσα στο κεντρικό δίκτυο, το ,Microgrid μπορεί να θεωρηθεί σαν μία ελεγχόμενη οντότητα ικανή να λειτουργεί σαν αυτόνομη γεννήτρια, σαν μικρή πηγή ισχύος ή σαν βοηθητική υποστηρικτική υπηρεσία του δικτύου. Ένα μικροδίκτυο μπορεί είτε να συνδεθεί είτε να αποσυνδεθεί από το δίκτυο ώστε να επιτρέπεται να λειτουργεί είτε σε σύνδεση με το δίκτυο (grid-connected mode) είτε απομονωμένα από αυτό (island mode).

Η ικανότητα να λειτουργούν αυτόνομα τα καθιστούν μια πολύ καλή λύση για απομακρυσμένες περιοχές, αγροτικές περιοχές και νησιά όπου η επέκταση του δημόσιου ηλεκτρικού δικτύου είναι μη εφικτή ή οικονομικά απαγορευτική. Η ικανότητα να λειτουργούν σε σύνδεση με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο, τα καθιστά μια αποτελεσματική λύση στην ελεύθερη αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας.[5]

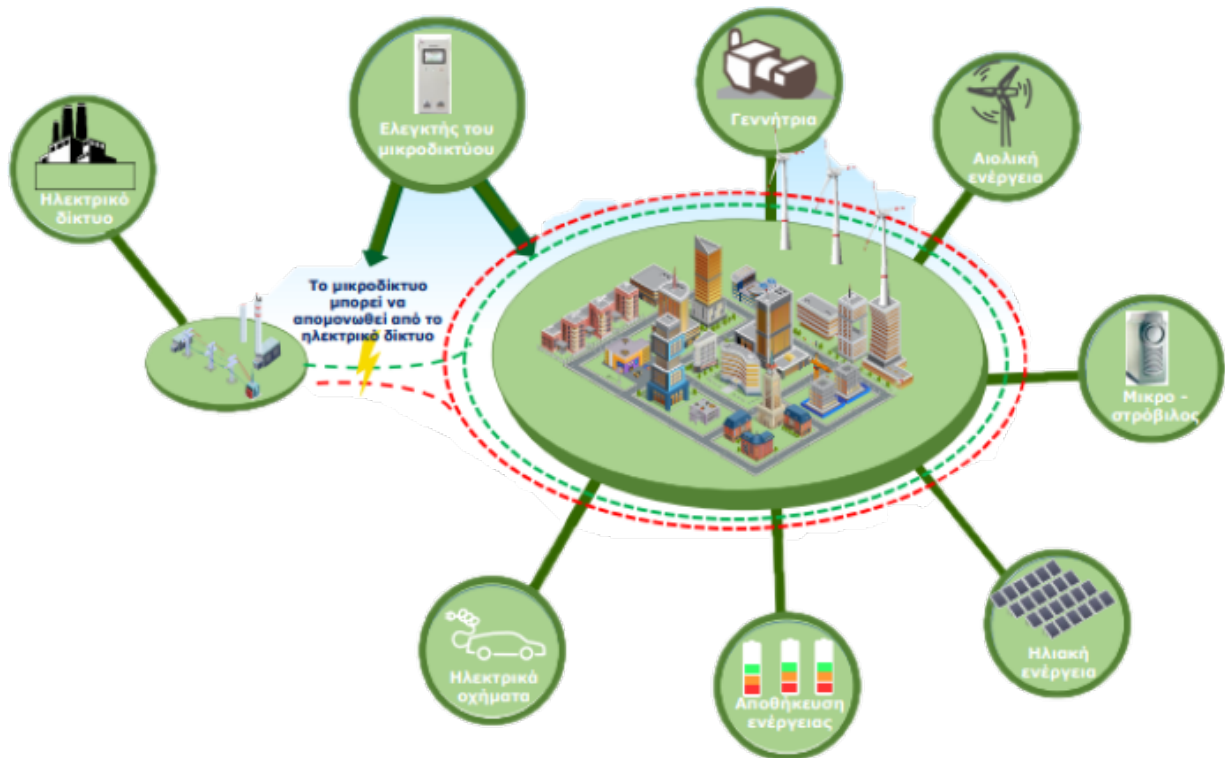
Για αυτό το λόγο υπάρχουν δυο βασικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται στο πλαίσιο ενός μικροδικτύου:

- *ένα μικροδίκτυο πρέπει να περιέχει και πηγές αλλά και φορτία υπό τοπικό έλεγχο.*
- *ένα μικροδίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί και συνδεδεμένο με το υπόλοιπο δίκτυο αλλά και απομονωμένο από αυτό.*

3.2 Βασικά στοιχεία του μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο αποτελείται από μία συστοιχία φορτίων και διεσπαρμένων πηγών (σταθμών διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης) που λειτουργούν σαν ένα ενιαίο ελεγχόμενο, σύστημα που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα στους καταναλωτές του μικροδικτύου. Σαν μέρος του δικτύου διανομής έχει κυκλική διαμόρφωση και συνδέεται με το δίκτυο μεταφοράς σε ένα σημείο. Σκοπός του μικροδικτύου είναι, μέσω της σωστής διαχείρισης της διεσπαρμένης παραγωγής και του φορτίου, να φροντίζει για την αποδοτική και συνεχή τροφοδότηση των καταναλωτών.

Το μικροδίκτυο περιλαμβάνει διεσπαρμένες πηγές από συστήματα φωτοβολταϊκών, ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμων , μικροτουρμπίνες , γεννήτριες πετρελαίου και μπαταρίες. Το μικροδίκτυο συνήθως λειτουργεί σε κατάσταση σύνδεσης με το δίκτυο. Παρόλα αυτά, αναμένεται να υπάρχουν οι κατάλληλες τεχνικές ελέγχου, οι σωστές στρατηγικές και ικανοποιητική παραγωγή για να μπορεί να τροφοδοτηθεί τουλάχιστον ένα μέρος του φορτίου σε συνθήκες απομόνωσης (island mode). Η κάλυψη της ζήτησης του φορτίου μπορεί να γίνει απευθείας από τις διεσπαρμένες μικροπηγές ή από το δίκτυο.



Εικόνα 7: Επισκόπηση του Μικροδικτύου.[5]

3.3 Μικροδίκτυα και ενεργειακές κοινότητες

Τα τελευταία χρόνια με την συνεχόμενη ανάπτυξη της έννοιας του έξυπνου ενεργειακού δικτύου ολοένα και περισσότερες χώρες βασίζονται σε μικροδίκτυα για την ηλεκτροδότηση συγκεκριμένων περιοχών. Πιο συγκεκριμένα, στη Γερμανία υπάρχουν πάνω από 650 «Stadtwerke» (τοπικές ενεργειακές κοινότητες που παρέχουν θέρμανση και ηλεκτρισμό) επίσης στην Ολλανδία, πάνω από 200 τοπικές πρωτοβουλίες συμμετέχουν σε τοπικές ενεργειακές κοινότητες, συμπεριλαμβανομένων και περισσότερων από 55 συνεταιρισμών.

Μπορούν να γίνουν επενδύσεις σε μικροδίκτυα σε πολλές φάσεις και από διαφορετικά ενδιαφερόμενα μέρη: από τους τελικούς καταναλωτές, τους προμηθευτές ενέργειας, τους διαχειριστές συστημάτων διανομής, κλπ. Η λειτουργία ενός μικροδικτύου καθορίζεται κυρίως από το ποιος θα έχει την ιδιοκτησία καθώς και από τους ρόλους των διαφόρων παραγόντων.

Έτσι μπορούν να υπάρξουν 3 μοντέλα επενδύσεων στο πλαίσιο ενός μικροδικτύου τα οποία μπορεί να είναι:

- Εταιρίες παραγωγής ηλεκτρισμού ή οι διαχειριστές δικτύων διανομής κατέχουν και λειτουργούν το

μικροδίκτυο. Αυτό δεν είναι δυνατό σύμφωνα με τη νομοθεσία της ΕΕ

- *Παραγωγοί – καταναλωτές να κατέχουν και λειτουργούν κατανεμημένους ενεργειακούς πόρους για να ελαχιστοποιήσουν την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος ή για να μεγιστοποιήσουν τα έσοδα τους (Μικροδίκτυα τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων)*
- *Οι φορείς συγκέντρωσης ενέργειας (πάροχοι ενεργειακών υπηρεσιών) μεγιστοποιούν την αξία των συγκεντρωμένων κατανεμημένων ηλεκτρικών πόρων συμμετέχοντας στις τοπικές ενεργειακές αγορές.*

3.4 Λειτουργίες μικροδικτύων

Οι βασικές λειτουργίες των μικροδικτύων είναι οι παρακάτω:

- **Απομονωμένη λειτουργία (island mode)**

Τα μικροδίκτυα απομονωμένης λειτουργίας απομονώνονται από τα άλλα δίκτυα παραγωγής ενέργειας και μπορούν να προμηθεύουν είτε μία μεμονωμένη εγκατάσταση είτε πολλαπλούς χρήστες. Είναι αυτόνομα ως προς την παραγωγή ενέργειας, αλλά δεν μπορούν να παρέχουν πλεόνασμα ενέργειας και σε περιόδους ελλείμματος δεν μπορούν να δεχθούν ηλεκτρικό ρεύμα από το δίκτυο. Αυτά τα συστήματα βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, σε περιοχές όπου το τοπικό δίκτυο ηλεκτρισμού είναι εξαιρετικά ασταθές ή σε μέρη όπου είναι απαραίτητη η αυτάρκεια ενέργειας.[6]

- **Συνδεδεμένα με δίκτυο**

Τα μικροδίκτυα σε δίκτυο συνδέονται απευθείας στο τοπικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Προσφέρουν το πλεονέκτημα της δυνητικής αυτάρκειας ενέργειας, αλλά μπορούν επίσης να δεχθούν ηλεκτρισμό από ή να παρέχουν ηλεκτρισμό πίσω στο τοπικό δίκτυο ηλεκτρισμού.

Μία πιθανή πρόκληση που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν τα μικροδίκτυα που συνδέονται με το δίκτυο είναι ότι εάν υπάρχει κάποια βλάβη στο ευρύτερο δίκτυο ηλεκτρισμού, το τοπικό μικροδίκτυο είναι πιθανό επίσης να αντιμετωπίσει βλάβη. Για την αποφυγή αυτού του κινδύνου, μπορούν να ληφθούν

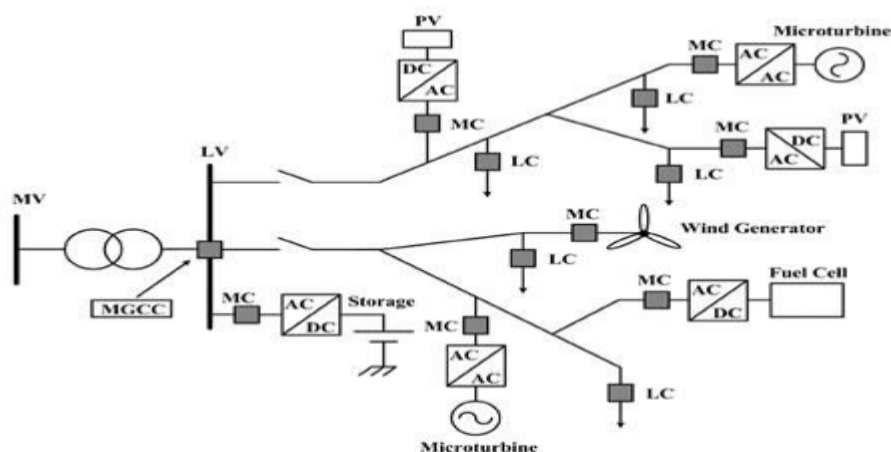
υπόψη επιπλέον παράγοντες κατά τον σχεδιασμό του συστήματος για τη διευκόλυνση της αυτόματης μετάβασης σε απομονωμένη λειτουργία (island mode) και σε αποφόρτιση προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα συνδεδεμένα φορτία δεν υπερβαίνουν τις δυνατότητες παραγωγής του μικροδικτύου.

- **Συνδεδεμένα με δίκτυο σε συνδυασμό με απομονωμένη λειτουργία (island mode)**

Ορισμένα μικροδίκτυα, ενώ κανονικά λειτουργούν παράλληλα με το τοπικό δίκτυο, μπορούν να αποσυνδέσουν την εισερχόμενη τροφοδοσία δικτύου και να παρέχουν την απαραίτητη ενεργειακή υποδομή ανεξάρτητα από το δίκτυο. Για να συμβεί αυτό, χρειάζεστε πηγές παραγωγής ενέργειας, οι οποίες μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα από το δίκτυο, όπως οι μηχανές αερίου που έχουν την ικανότητα να βρίσκονται σε απομονωμένη λειτουργία (island mode). Μπορεί να υπάρχει η ανάγκη προσθήκης της ικανότητας επανεκκίνησης, κάτι που σημαίνει ότι η μηχανή μπορεί να ξεκινήσει το μικροδίκτυο χωρίς την παρουσία εξωτερικής πηγής ενέργειας, όπως το δίκτυο ηλεκτρισμού.

3.5 Δομή Μικροδικτύου

Η έννοια ενός μικροδικτύου εμπεριέχει την υψηλή σύνδεση της διεσπαρμένης παραγωγής με το δίκτυο. Ουσιαστικά όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, τα μικροδίκτυα αποτελούν απομονωμένα συστήματα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να λειτουργούν σε τοπικό επίπεδο. Το σύμπλεγμα των φορτίων και των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας, που λειτουργούν ως ενιαία ελεγχόμενη οντότητα, ξεπερνά τα μειονεκτήματα της ανεξάρτητης λειτουργίας διεσπαρμένης παραγωγής. Η γενική δομή για ένα μικροδίκτυο και η θέση του σε σχέση με το σύστημα διαχείρισης των δικτύων διανομής απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 8: Η δομή ενός μικροδικτύου.[6]

Οι βασικές μονάδες λοιπόν που απαρτίζουν ένα μικροδίκτυο είναι οι εξής:

- *Αντιστροφείς*

Οι περισσότερες πηγές του μικροδικτύου συνδέονται στο υπόλοιπο δίκτυο μέσω μετατροπών. Οι αυξημένες δυνατότητες που προσφέρουν οι σύγχρονοι αντιστροφείς καθιστούν δυνατό τον έλεγχο της παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος και κατά συνέπεια της τάσης και της συχνότητας σε απομονωμένη λειτουργία.

- *Μονάδες Αποθήκευσης*

Το βασικό πρόβλημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι δεν μπορεί να αποθηκευτεί εύκολα σε μεγάλο ποσοστό. Σχεδόν όλη η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα είναι ταυτόχρονη με την παραγωγή της. Ωστόσο για την λειτουργία των μικροδικτύων, εφόσον αυτά περιλαμβάνουν μεγάλη παραγωγή από ΑΠΕ, είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η παρουσία μονάδων αποθήκευσης ενέργειας.

3.6 Πλεονεκτήματα του Μικροδικτύου

Μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα που εξασφαλίζει η δομή ενός μικροδικτύου για τη λειτουργία του ευρύτερου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αναλύονται στη παρούσα παράγραφο. Συγκεκριμένα είναι τα παρακάτω:

- *Ασταμάτητη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας εντός του μικροδικτύου ακόμη και σε περιπτώσεις που το κεντρικό δίκτυο διανομής μπορεί να καταρρεύσει προσωρινά.*
- *Αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την ελάττωση των απωλειών και τη βελτίωση της ποιότητας της ισχύς μέσω των μονάδων της διεσπαρμένης παραγωγής που αναπτύσσονται κοντά στους τελικούς καταναλωτές.*
- *Μειωμένη περιβαλλοντική επίδραση λόγω της μείωσης των εκπομπών αερίων και σωματιδίων. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής σε ένα πολύ σημαντικό βαθμό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και νέων τεχνολογιών που είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον.*
- *Ελαχιστοποίηση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των καταναλωτών, όταν το μικροδίκτυο λαμβάνει μέρος σε μια εντελώς απελευθερωμένη αγορά ενέργειας.*
- *Η εύκολη διαχείριση των φορτίων που χαρακτηρίζει τα μικροδίκτυα είναι μια διαδικασία που βοηθά σημαντικά την ευστάθεια του δικτύου αλλά και στην οικονομική λειτουργία του συστήματος σε περιόδους αιχμής. [6]*

Στην συνέχεια ορισμένα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στο μικροδίκτυο από τεχνική και οικονομική πλευρά μπορεί να είναι:

- *Ο τύπος των φορτίων του.*
- *Το πλήθος των καταναλωτών.*
- *Ο τύπος των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής (φωτοβολταϊκές πηγές, αιολική ενέργεια)*
- *Η ισχύς, ο αριθμός των μονάδων παραγωγής και το προφίλ παραγωγής τους.*

Όπως ήδη αναφέρθηκε το μικροδίκτυο είναι διαμορφωμένο ώστε να λειτουργεί τόσο σε αμφίδρομη σύνδεση με το δίκτυο όσο και σε αυτόνομη κατάσταση, σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η δυνατότητα σύνδεσης του μικροδικτύου με το δίκτυο του επιτρέπει την ανταλλαγή ενέργειας καθώς και την επιστροφή της πλεονάζουσας ενέργειας σε αυτό ή και την απορρόφηση της σε ενδεχόμενο όπου οι μονάδες του δικτύου δεν είναι επαρκείς για να καλύψουν την τοπική ζήτηση. Σε περιπτώσεις παράλληλης λειτουργίας με το κεντρικό δίκτυο, αυτό που είναι επιθυμητό είναι να αποφεύγονται όσο το δυνατόν περισσότερο προβλήματα που δύναται να προκαλεί το μικροδίκτυο.[6]

Κεφάλαιο 4^ο Συστήματα τηλεπικοινωνιών στο πλαίσιο της διεσπαρμένης παραγωγής

4.1 Εισαγωγή

Ο τομέας των τηλεπικοινωνιών αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες στην ανάπτυξη των μονάδων της διεσπαρμένης παραγωγής. Δυο σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να οριστικοποιηθούν κατάλληλα κατά την ανάπτυξη της επικοινωνίας των συγκεκριμένων είναι η απόδοση του καναλιού (throughput) καθώς ουσιαστικά η συγκεκριμένη μεταβλητή καθορίζει την ποσότητα της διακίνησης δεδομένων από ένα σημείο σε ένα άλλο σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, ο δεύτερος παράγοντας είναι η καθυστέρηση του καναλιού (latency). Στα ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας η απόδοση συνήθως υπολογίζεται σε bits ανά λεπτό(bps).

Σχεδόν όλες οι τεχνολογίες μετάδοσης δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την ανάπτυξη των μονάδων της διεσπαρμένης παραγωγής και συγκεκριμένα στους τομείς της μεταφοράς, της διανομής και σε τελικό στάδιο στους καταναλωτές. Κάθε τεχνολογία ή ένα σύνολο τεχνολογιών αντιστοιχεί περισσότερο σε εφαρμογές συγκεκριμένου τομέα ή σε εφαρμογές με παρεμφερείς επικοινωνιακές ανάγκες. Η επιλογή της προς χρήση επικοινωνιακής τεχνολογίας θα εξαρτηθεί από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του δικτύου και τις καθορισμένες απαιτήσεις. Μικρές επιχειρήσεις παροχής ενέργειας, για παράδειγμα, μπορούν να εκμεταλλευθούν τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα υπάρχοντα κυψελωτά δίκτυα και να

συνεργαστούν με του παρόχους τους ώστε να μειώσουν το κεφαλαιουχικό και λειτουργικό κόστος.

Αντιθέτως, οι μεγάλες επιχειρήσεις παροχής ενέργειας θα είναι σε θέση να αναπτύξουν το προσωπικό τους δίκτυο για την αποφυγή της κοινής χρήσης εύρους ζώνης, με στόχο την παραγωγή μεγαλύτερου κέρδους. Επιπλέον, παράγοντες επιλογής των προς εφαρμογή τεχνολογιών αποτελούν οι γεωγραφικές ανάγκες, αλλά και οι υπηρεσίες που θα παρέχονται στους καταναλωτές.[7]

4.2 Ασύρματες Τεχνολογίες

Γενικά, στις ασύρματες τεχνολογίες επικοινωνίας τα εκπεμπόμενα και λαμβανόμενα σήματα εξασθενούν σε μεγάλο βαθμό λόγω μετάδοσης και παρεμβολών στο το κανάλι επικοινωνίας. Με αποτέλεσμα, να υποστηρίζουν κατά κύριο λόγο συνδέσεις συσκευών που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, με συγκριτικά χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων

Η χρήση ασύρματων τεχνολογιών παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις ενσύρματες, για παράδειγμα το χαμηλό κόστος εγκατάστασης του απαραίτητου εξοπλισμού, την εξασφάλιση υψηλής κινητικότητας, τη κάλυψη απομακρυσμένων περιοχών κ.ά. Ωστόσο, για κάθε τεχνολογία υπάρχουν συγκεκριμένες προκλήσεις προς διευθέτηση πριν την χρήση της στο τομέα του έξυπνου ενεργειακού δικτύου. Τέτοιες προκλήσεις είναι οι ακόλουθες:

- *Οι ασύρματες τεχνολογίες που υπάγονται σε μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνότητων είναι πιο ευάλωτες σε φαινόμενα θορύβου και παρεμβολών.*
- *Οι ασύρματες τεχνολογίες με αδειοδοτημένο φάσμα αντιμετωπίζουν λιγότερες παρεμβολές, αλλά αποτελούν μια μη οικονομική λύση.*
- *Οι ασύρματες τεχνολογίες παρέχουν μικρότερη ασφάλεια κατά την αποστολή και λήψη των δεδομένων.[7]*

- **Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα.**

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (LAN), βασίζονται στο πρότυπο της IEEE 802.11. Τα κύρια γνωρίσματα που παρουσιάζουν είναι η παροχή ισχυρής, υψηλών ταχυτήτων επικοινωνίας σημείου-σε-σημείο (point-to-point) και σημείου-προς-πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint), σε ρυθμούς μετάδοσης των 1 και 2 Mbps. Το πρότυπο αυτό εισάγει την τεχνολογία ευρέος φάσματος (spread spectrum technology) η οποία επιτρέπει στους χρήστες να χρησιμοποιούν κοινές μπάντες συχνοτήτων (frequency bands) με ελάχιστη παρεμβολή μεταξύ τους.

Το πρότυπο IEEE 802.11b, γνωστό επίσης και ως Wi-Fi, προσφέρει μέγιστο ρυθμό δεδομένων στα 11Mbps και λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz. Επιπλέον, πρόσφατα διαθέσιμες τεχνολογίες βασισμένες στο IEEE 802.11a και 802.11g μπορούν να επιτύχουν ρυθμούς μέχρι 54 Mbps. Το IEEE 802.11a λειτουργεί στα 5.4GHz με OFDM διαμόρφωση και το IEEE 802.11g, γνωστό ως ενισχυμένο WI-Fi, λειτουργεί στα 2,4GHz με DSSS διαμόρφωση. Το IEEE 802.11n, βασισμένο σε τεχνολογία MIMO (Multiple Input Multiple Output) προορίζεται να αυξήσει τους ρυθμούς μεταφοράς, φτάνοντας τα 600Mbps, ενώ το IEEE 802.11i, γνωστό ως WPA-2, ενισχύει την ασφάλεια στα ασύρματα LANs χρησιμοποιώντας προηγμένα πρότυπα κρυπτογράφησης (AES).[7]

- **WiMAX**

Η τεχνολογία WiMAX (Worldwide inter-operability for Microwave Access) αποτελεί μέρος της σειράς προτύπων IEEE 802.16 που σχεδιάστηκαν για την κατασκευή WMAN (Wireless Metropolitan Area Network). Ο κύριος στόχος του WiMAX είναι η επίτευξη της διαλειτουργικότητας σε μικροκυματική πρόσβαση. Το 2001, το πρώτο προσχέδιο του IEEE 802.16, όριζε το φάσμα των 10-66GHz για την επικοινωνία των οντοτήτων. Κατόπιν, αναπτύχθηκε ένα υποσύνολο του παραπάνω φάσματος με σκοπό την επίτευξη της διαλειτουργικότητας. Στις σταθερές επικοινωνίες αφιερώθηκαν οι ζώνες συχνοτήτων των 3.5 και 5.8GHz, ενώ στις κινητές επικοινωνίες ανατέθηκαν οι ζώνες 2.3, 2.5 και 3.5GHz. Τα φάσματα των 2.3, 2.5, 3.5GHz είναι αδειοδοτημένα, ενώ των 5.8GHz είναι μη αδειοδοτημένο. Το πρότυπο αυτό, παρέχει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 70Mbps και απόσταση κάλυψης ως 48km. Ωστόσο, η κάλυψη και η ταχύτητα του δικτύου είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα. Τα αδειοδοτημένα φάσματα παρέχουν μετάδοση υψηλότερης ισχύος και σε μεγαλύτερες αποστάσεις, το οποίο τα καθιστά καταλληλότερα για την επικοινωνία σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Μερικές εφαρμογές του ΕΕΔ που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το πρότυπο WiMAX είναι [7]:

- **Ασύρματα Αυτόματα Συστήματα Ανάγνωσης Μετρητών (WAMRS).**

Η μεγάλη κάλυψη απόστασης και οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων καθιστούν την τεχνολογία WiMAX πιο κατάλληλη για τα Ασύρματα Αυτόματα Συστήματα Ανάγνωσης Μετρητών (WAMRS) ως μέρος της χρησιμότητας Υποδομήαυτόματου μετρητή (AMI).

- **Τιμολόγηση σε πραγματικό χρόνο (Real-time Pricing).**

Το δίκτυο WiMAX για AMI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή σε πραγματικό χρόνο μοντέλα τιμολόγησης με βάση την κατανάλωση ενέργειας των πελάτων.

Ανίχνευση και αποκατάσταση διακοπής λειτουργίας.

Με τη βοήθεια της αμφίδρομης επικοινωνίας με WiMAX μεταξύ των καταναλωτών και των παρόχων, μπορεί να επιτευχθεί γρήγορα ανίχνευση και η αποκατάσταση μιας ή περισσότερων βλαβών του συστήματος.

Στα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας WiMAX συμπεριλαμβάνονται το μικρότερο κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας, η ομαλή επικοινωνία, οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης (ως τα 75Mbps), το επαρκές εύρος ζώνης και η επεκτασιμότητα. Ένα από τα αρνητικά του WiMAX είναι ότι το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαμοιράζεται στους χρήστες. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι οι συχνότητες πάνω από 10GHz δεν μπορούν να διαδοθούν μέσω εμποδίων. Έτσι, οι χαμηλότερες συχνότητες είναι πιο χρήσιμες, για εφαρμογές AMI ειδικότερα σε αστικές περιοχές. Ωστόσο, οι ζώνες χαμηλότερης συχνότητας είναι ήδη διαθέσιμες και συνεπώς, τον πιο πιθανό τρόπο χρήσης του WiMAX είναι με τη μίσθωσή του από τον τρίτο.

- **ZigBee**

Το ZigBee είναι ένα πρότυπο και μια τεχνολογία επικοινωνίας που καθορίζει το φυσικόεπίπεδο, βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 ,κοινώς γνωστό ως ασύρματη προσωπική περιοχή χαμηλού επιπέδου δικτύων (LR-WPAN). Στο δίκτυο ZigBee υπάρχουν δύο τύποι συσκευών, οι FFD συσκευές πλήρους λειτουργίας και οι RFD συσκευές μειωμένης λειτουργίας. Το FFD εκτελεί την εγκατάσταση, διαχείριση και δρομολόγηση ενώ RFD υποστήριξη τις λειτουργίες του FFD.

Το ZigBee και το ZigBee Smart Energy Profile (SEP) έχουν αναγνωρισθεί ως τα πιο κατάλληλα πρότυπα επικοινωνίας για τις δικτυακές εφαρμογές του ΕΕΔ από το Εθνικό Ινστιτούτο των Η.Π.Α. για τα πρότυπα και την τεχνολογία (NIST).

Η συγκεκριμένη τεχνολογία θεωρείται καλή επιλογή για τη μέτρηση και τη διαχείριση της ενέργειας και ιδανικό για εφαρμογές που σχετίζονται με το έξυπνο ενεργειακό δίκτυο καθώς προσφέρει απλότητα, χαμηλές απαιτήσεις εύρους ζώνης χαμηλό κόστος εγκατάστασης, λειτουργία μέσω ενός μη δανειοδοτημένου φάσματος και εύκολη υλοποίηση του δικτύου επικοινωνίας. Ακόμη, διαθέτει 16 κανάλια επικοινωνίας στη ζώνη των 2.4GHz κάθε ένα με εύρος ζώνης των 5MHz.[8]

- **Κυψελωτές Επικοινωνίες (Cellular Communications)**

Το σύστημα των κυψελωτών επικοινωνιών αποτελεί μια αξιόπιστη επιλογή για την επικοινωνία μεταξύ των έξυπνων μετρητών και των επιχειρήσεων παροχής ενέργειας. Εκμεταλλευόμενοι τις υπάρχουσες υποδομές, οι επιχειρήσεις αποφεύγουν σημαντικό κόστος και χρόνο που θα απαιτούνταν για τη δημιουργία μιας νέας και αποκλειστικής υποδομής. Οι 3G (3rd Generation) / LTE (Long Term Evaluation) τεχνολογίες λειτουργούν στο φάσμα 824-894MHz/1900MHz, οι οποίες αποτελούν τις αδειοδοτημένες μπάντες συχνοτήτων. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αυτών των

τεχνολογιών έχει βελτιωθεί τα τελευταία χρόνια, και η απόσταση κάλυψης εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα της κυψελωτής υπηρεσίας.

Η τοπολογία του δικτύου αποτελείται από κυψέλες, οι οποίες καλύπτουν μια περιοχή και εξυπηρετούνται η καθεμία από τουλάχιστον ένα σταθμό βάσης. Κάθε κυψέλη χρησιμοποιεί διαφορετικό σύνολο συχνοτήτων από τις γειτονικές της, ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή και να παρέχεται εγγυημένο εύρος ζώνης εντός των ορίων της. Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα, το σημαντικότερο είναι ότι τα κυψελωτά δίκτυα υπάρχουν ήδη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι κάποιο ποσοστό. Επίσης, παρέχεται επαρκές εύρος ζώνης για αρκετές από τις εφαρμογές, ενώ με την πρόσφατη ανάπτυξη στις 3G / LTE τεχνολογίες, ο ρυθμός δεδομένων και η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) βελτιώνονται πολύ γρήγορα.

Από την άλλη πλευρά, οι κρίσιμες εφαρμογές του ΕΕΔ χρειάζονται αδιάλειπτη διαθεσιμότητα επικοινωνιών. Ωστόσο, το κυψελωτό δίκτυο θα χρησιμοποιείται παράλληλα και από την αγορά των καταναλωτών, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε συμφόρηση του δικτύου ή πτώση του δικτύου και μείωση της επίδοσης σε καταστάσεις έκτακτου ανάγκης. Ακόμη, οι κυψελωτές επικοινωνίες είναι πιθανόν ακατάλληλες για εφαρμογές που σχετίζονται με πολλά δεδομένα και απαιτούν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης.[8]

- **Δορυφορικές επικοινωνίες.**

Οι δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν ένα αξιόπιστο τρόπο απομακρυσμένου ελέγχου και παρακολούθησης, αφού εισάγουν παγκόσμια κάλυψη και ταχεία και αξιόπιστη εγκατάσταση. Σε συγκεκριμένες καταστάσεις όπου δεν υπάρχει υποδομή επικοινωνίας, όπως σε απομακρυσμένους υποσταθμούς, οι δορυφορικές επικοινωνίες παρέχουν μια οικονομικά αποδοτική λύση. Τέτοιου είδους επικοινωνία είναι εφικτό να εγκατασταθεί και το μόνο που χρειάζεται είναι η απόκτηση του απαραίτητου εξοπλισμού. Ορισμένες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας χρησιμοποιούν ήδη τέτοιον εξοπλισμό για την παρακολούθηση κάποιων υποσταθμών. Ακόμη, μια μοναδικά επίγεια αρχιτεκτονική επικοινωνίας είναι ευάλωτη σε καταστροφές και βλάβες του συστήματος. Κατά συνέπεια, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία και η μετάδοση των δεδομένων σε περιπτώσεις καταστροφών του επίγειου συστήματος, οι δορυφορικές επικοινωνίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως βοηθητικό σύστημα επικοινωνίας.

Ωστόσο, η ενσωμάτωση των δορυφορικών συστημάτων εμπεριέχει και μειονεκτήματα, καθώς υπάρχουν δυο σημαντικές αδυναμίες. Πρώτον, ένα δορυφορικό σύστημα επικοινωνίας εισάγει πολύ υψηλότερη καθυστέρηση στο κανάλι επικοινωνίας από αυτή ενός επίγειου συστήματος. Για αυτό το λόγο κάποια πρωτόκολλα επικοινωνίας, ακατάλληλα για τις δορυφορικές επικοινωνίες. Δεύτερον, τα χαρακτηριστικά ενός δορυφορικού καναλιού διαφέρουν ανάλογα με την επίδραση της εξασθένησης και τις καιρικές συνθήκες. Αυτή η κατάσταση μπορεί να μειώσει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση ολόκληρου του συστήματος επικοινωνίας.

- **Bluetooth**

Το Bluetooth συμπεριλαμβάνεται στο πρότυπο IEEE 802.15.1 για τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (wireless personal area network- WPAN). Αποτελεί ένα πρότυπο χαμηλής ισχύος και μικρού εύρους φάσματος. Λειτουργεί στη μη αδειοδοτημένη ISM ζώνη των 2.4-2.4835GHz. Παρέχει ρυθμό μεταφοράς δεδομένων ίσο με 721Kbps. Οι συσκευές με ρύθμιση Bluetooth αποτελούνται από την πλήρη δομή των 7 επιπέδων του OSI. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να διευκολύνει τόσο την επικοινωνία σημείου προς σημείο, όσο και σημείου προς πολλαπλά σημεία. Ανάλογα με τις παραμέτρους του συστήματος επικοινωνίας, το Bluetooth προσφέρει κάλυψη μεταξύ 1m-100m. Οι συσκευές Bluetooth επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις τριγύρω ασύρματες επικοινωνιακές. Γενικά, το Bluetooth προσφέρει ασθενή ασφάλεια συγκριτικά με άλλα πρότυπα.

4.3 Ενσύρματες Τεχνολογίες.

- **Powerline Communications (PLC).**

Η τεχνική Powerline Communication (PLC) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί τις υφιστάμενες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τη μετάδοση σημάτων δεδομένων υψηλής ταχύτητας (2-3 Mb/s) από τη μία συσκευή στην άλλη. Η τεχνολογία PLC, ουσιαστικά περιλαμβάνει το δίκτυο μεταφοράς μέσης τάσης καθώς και το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο PLC είναι κυρίως στενού εύρους ζώνης (narrowband -NB) που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες (μερικά kHz) και ευρυζωνικές (broadband - BB) που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες (εκατοντάδες MHz).

Σε ένα τυπικό PLC δίκτυο, οι έξυπνοι μετρητές συνδέονται στο συγκεντρωτή δεδομένων (data concentrator) μέσω γραμμών μεταφοράς και τα δεδομένα μεταφέρονται στο κέντρο δεδομένων με τεχνολογίες κυψελωτού δικτύου. Για παράδειγμα, οποιαδήποτε ηλεκτρική συσκευή, όπως ένας έξυπνος μετρητής με βάση πομποδέκτη, μπορεί να συνδεθεί στη γραμμή ισχύος και να χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά των δεδομένων των μετρήσεων σε μια κεντρική τοποθεσία.[11]. Το PLC μπορεί να θεωρηθεί ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για εφαρμογές του έξυπνου ενεργειακού δικτύου λόγω του γεγονότος ότι η υπάρχουσα υποδομή μειώνει το κόστος εγκατάστασης του υποδομικών επικοινωνιών. Παρόλα αυτά, το PLC αντιμετωπίζει προβλήματα εξασθένησης, θορύβου και παραμόρφωσης, που συναντώνται στις ασύρματες επικοινωνίες όταν υλοποιούνται μέσω των καλωδίων ηλεκτρικής ενέργειας. Μιας και οι γραμμές μεταφοράς ισχύος δεν έχουν σχεδιαστεί για μετάδοση δεδομένων. Γενικά, οι γραμμές μεταφοράς ρεύματος ως μέσο μετάδοσης αποτελεί μη προβλεπόμενο και θορυβώδες περιβάλλον που δυσκολεύει τη υλοποίηση του καναλιού. Το χαρακτηριστικό του χαμηλού εύρους ζώνης (20Kbps για δίκτυα σε επίπεδο γειτονιάς (Neighborhood area networks) περιορίζει την PLC τεχνολογία ως προς τις εφαρμογές που χρειάζονται μεγαλύτερο εύρος.

Επιπλέον, η τοπολογία του δικτύου, ο αριθμός και τύπος των συνδεδεμένων συσκευών στις ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς, η απόσταση καλωδίωσης μεταξύ πομπού και δέκτη, όλα επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα του σήματος που μεταδίδεται από τις γραμμές. Επίσης η ευαισθησία του PLC στις διαταραχές και η εξάρτηση από την ποιότητα του σήματος αποτελούν μειονεκτήματα που καθιστούν την συγκεκριμένη τεχνολογία ακατάλληλη για τη μεταφορά δεδομένων.

- **Οπτικές Επικοινωνίες (Optical Communications).**

Οι οπτικές επικοινωνίες (Optical Communications) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη σύνδεση υποσταθμών σε κέντρα λειτουργίας και ελέγχου. Λόγω, των πολλαπλών πλεονεκτημάτων τους όπως η ανθεκτικότητα σε ραδιοφωνικές και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές την καθιστούν κατάλληλη για την μεταφορά δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ υψηλό εύρος ζώνης. Για αυτό το λόγο γίνεται αντιληπτό ότι το σύστημα οπτικών ινών θα κατέχει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της υποδομής του έξυπνου ενεργειακού δικτύου, καθώς η τεχνολογία του Οπτικού Ηλεκτρικού Καλωδίου Εδάφους (Optical Power Ground Wire -OPGW) επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες για μεγάλες αποστάσεις.

- **Digital Subscriber Lines (DSL)**

Πρόκειται για μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί τα καλώδια του τηλεφωνικού δικτύου και παρέχει υψηλή ταχύτητα κατά τη μεταφορά των δεδομένων. Η ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση των DSL γραμμών μειώνει δραστικά το κόστος. Για αυτό το λόγο, πολλοί πάροχοι θα επιλέξουν το DSL ως βασικό τρόπο επικοινωνίας των συσκευών στην ανάπτυξη του ΕΕΔ. Ωστόσο, η απόδοση (throughput) της DSL σύνδεσης βασίζεται κυρίως στην απόσταση που βρίσκεται ο συνδρομητής από το κέντρο εξυπηρέτησης, το οποίο καθιστά δύσκολο τον καθορισμό της επίδοσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Η μεγάλη διαθεσιμότητα, το χαμηλό κόστος και η παροχή υψηλού εύρους μετάδοσης δεδομένων αποτελούν τους δυο πιο σημαντικούς λόγους που εναποθέτουν την τεχνολογία DSL στις πρώτες θέσεις των προς εφαρμογή τεχνολογιών στην ανάπτυξη της ιδέας του έξυπνου ενεργειακού δικτύου.

Αντίθετα, η αξιοπιστία και ο πιθανός χρόνος διακοπής της λειτουργίας της DSL τεχνολογίας πιθανόν να μην είναι αποδεκτοί για κρίσιμες καταστάσεις. Η εξάρτηση της απόστασης και η έλλειψη τυποποίησης μπορούν να προκαλέσουν επίσης πρόσθετα προβλήματα. Τα επικοινωνιακά συστήματα που βασίζονται σε ενσύρματη επικοινωνία DSL απαιτούν την εγκατάσταση καλωδίων και την τακτική συντήρηση αυτών και συνεπώς δεν συνιστάται η εγκατάσταση τους σε αγροτικές περιοχές λόγω του υψηλού κόστους συντήρησης της καθορισμένης υποδομής.



Σχήμα 5: Πλαίσιο συνένωσης των τεχνολογιών στη διεσπαρμένη παραγωγή. [2]

Κεφάλαιο 5^ο Ανοικτού τύπου λογισμικά ανάπτυξης για το Μοντέλο της Διεσπαρμένης Παραγωγής

Στο παρόν κεφάλαιο παρέχεται μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των διάφορων ανοικτού τύπου (open-source) εργαλείων και των χαρακτηριστικών τους, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ερευνά για τη διεσπαρμένη παραγωγή και το μικροδίκτυο.

Αρχικά θίγονται τα κίνητρα για την ανάπτυξη λογισμικών και προσομοιωτών καθώς και οι συναφείς ερευνητικές ερωτήσεις και προκλήσεις του σχεδιασμού. Στην συνέχεια γίνεται η παρουσίαση των προγραμμάτων προσομοίωσης σε τρεις τύπους, δηλαδή, προγράμματα προσομοίωσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, του συστήματος επικοινωνίας των συσκευών στο δίκτυο, καθώς και λογισμικά προσομοίωσης που συνδυάζουν τα προηγούμενα δυο.

Σκοπός είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ύπαρξη ή όχι ικανού αριθμού ανοικτού κώδικα (open-source) εργαλείων προσομοίωσης, καθώς και ποια από αυτά είναι αποτελεσματικά ή όχι για την επίτευξη της σωστής αξιολόγησης της απόδοσης της διεσπαρμένης παραγωγής.

5.1 Κίνητρα

Για τη μελέτη ως προς τις καινοτομίες του εξελιγμένου έξυπνου δικτύου, η προσομοίωση θεωρείται ένα αρκετά σημαντικό εργαλείο. Ωστόσο, η δημιουργία ενός νέου προγράμματος προσομοίωσης από το μηδέν είναι πολύπλοκη, δαπανηρή και χρονοβόρα, ειδικά αν λάβουμε υπόψη τη διεπιστημονική φύση του έξυπνου δικτύου η οποία περιλαμβάνει τόσο το ενεργειακό δίκτυο και τις ΤΠΕ ως βασικά συστατικά. Η εναλλακτική λύση, δηλαδή, η χρήση των υπάρχων εργαλείων προσομοίωσης όπως είναι, ή ο συνδυασμός τους, μπορεί να επιφέρει το πλεονέκτημα μεγαλύτερης αξιοπιστίας και επεκτασιμότητας. Αν και η επαναχρησιμοποίηση των υφιστάμενων εργαλείων προσομοίωσης προσφέρει πολλά οφέλη, μερικές φορές είναι απαραίτητο να σχεδιαστούν προσαρμοσμένα εργαλεία πχ, λόγω έλλειψης χαρακτηριστικών.

5.2 Η αναγκαιότητα της προσομοίωσης

Ιστορικά, η προσομοίωση αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για το σχεδιασμό συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος, καθώς και δικτύων επικοινωνίας. Τα περιβάλλοντα προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη και την αξιολόγηση νέων αρχιτεκτονικών ΤΠΕ (Τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνίας) και πρωτόκολλων δικτύων, ενώ την ίδια στιγμή οι μηχανικοί ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν περιβάλλοντα προσομοίωσης για το σχεδιασμό διάφορων συστημάτων και λειτουργιών ενέργειας. Στο πλαίσιο του έξυπνου δικτύου, οι προσομοιωτές επιτρέπουν την μελέτη των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διασυνδεδεμένων συστημάτων και των στοιχείων παρακολούθησης και ελέγχου πάνω τους.

Τα κίνητρα για την προσφυγή σε προσομοίωση είναι τόσο οικονομικά όσο και πρακτικά. Η προσομοίωση χρησιμοποιείται για τη μείωση του κόστους που σχετίζεται με τις αναβαθμίσεις του συστήματος τροφοδοσίας και επικοινωνίας των δικτυακών υποδομών. Για παράδειγμα οι δαπάνες που συνδέονται με την εκτέλεση των αναβαθμίσεων (εγκατάσταση, δοκιμές, κλπ). Πράγματι, οι αναβαθμίσεις μπορεί να έχουν σοβαρές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, ακόμη και για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Η προσομοίωση μειώνει αυτούς τους κινδύνους, επιτρέποντας το σχεδιασμό και την αξιολόγηση των διαφόρων λύσεων πριν ουσιαστικά την εγκατάσταση τους στον τομέα αυτό, και μάλιστα σε ένα πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον. Το τελευταίο σημαίνει ότι τα μελλοντικά συστήματα ισχύος ή δίκτυα επικοινωνίας μπορούν να μελετηθούν υπό διάφορες συνθήκες και για διαφορετικά σενάρια.

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι η προσομοίωση μπορεί να συμβεί πιο γρήγορα από ό, τι σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του μοντέλου προσομοίωσης. Αυτό μπορεί να μειώσει το χρόνο που απαιτείται για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Ως εκ τούτου, η προσομοίωση προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία σε σύγκριση με τις μελέτες που εξαρτώνται από την πραγματικότητα. Επίσης η προσομοίωση θεωρείται ως ένας σημαντικός παράγοντας για την υποστήριξη ερευνητικών και εκπαιδευτικών στόχων.

5.3 Λογισμικά προσομοίωσης στο ενεργειακό επίπεδο

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται και αναλύονται οι ανοικτού κώδικα προσομοιωτές ισχύος, όσον αφορά τα κύρια χαρακτηριστικά τους και οι επιλογές που υπάρχουν για ενσωμάτωση εξωτερικών εργαλείων. Οι εξομοιωτές για την ανάλυση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται εκτενώς από επαγγελματίες για το σχεδιασμό του δικτύου και τις λειτουργίες του. Υπερτάσεις, αρμονικές, βραχυκυκλώματα, παροδική σταθερότητα και η ροή ισχύος αποτελούν παραδείγματα σημαντικών φαινομένων του συστήματος ισχύος που πρέπει να συλληφθούν και να επεξεργαστούν καταλλήλα στις προσομοιώσεις. Στην συνέχεια, περιγράφονται τα ανοικτού κώδικα λογισμικά προσομοίωσης στο ενεργειακό επίπεδο.

- **Homer**

Το πρόγραμμα Homer είναι ένας προσομοιωτής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας που περιέχει ένα μίγμα από πηγές ενέργειας όπως τις συμβατικές γεννήτριες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, τις ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τις μπαταρίες κλπ. Μέσω αυτού του λογισμικού μπορούν να προσομοιωθούν τόσο συνδεδεμένα συστήματα όσο και αυτόνομα καθώς και διάφορα σενάρια με πράσινη ενέργεια. Το λογισμικό προσομοιώνει την λειτουργία ενός συστήματος, κάνοντας τους ενεργειακούς υπολογισμούς για κάθε μια από τις 8.760 ώρες σε ένα ημερολογιακό έτος.

Για κάθε ώρα το Homer συγκρίνει την ηλεκτρική και θερμική ζήτηση σε σχέση με την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παρέχει το σύστημα την συγκεκριμένη στιγμή και υπολογίζει τις ροές ενέργειας προς και από κάθε συνιστώσα του συστήματος. Για τα συστήματα που εμπεριέχουν μπαταρίες ως πηγές ενέργειας η γεννήτριες καυσίμου, το Homer αποφασίζει κάθε ώρα πως θα λειτουργήσουν οι γεννήτριες και αν πρέπει να φορτιστούν ή να εκφορτιστούν οι μπαταρίες. Το Homer, εκτελεί τους υπολογισμούς της ισοστάθμισης της ενέργειας για κάθε διαμόρφωση του συστήματος που θέλουμε να εξετάσουμε. Στη συνέχεια καθορίζει αν μια διαμόρφωση είναι εφικτή, δηλαδή, αν μπορεί να ανταποκριθεί στην ηλεκτρική ζήτηση υπό τις συνθήκες που υπάρχουν, και εκτιμά το κόστος της εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Οι υπολογισμοί του κόστους του συστήματος αντιπροσωπεύουν δαπάνες όπως το κεφάλαιο, την αντικατάσταση, τη λειτουργία και τη συντήρηση, καύσιμα.. Μετά την προσομοίωση όλων των πιθανών καταστάσεων του συστήματος, το λογισμικό εμφανίζει

μια λίστα, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συγκρίνει τις επιλογές σχεδιασμού του συστήματος.

- **Open DSS**

Το Open DSS είναι ένας προσομοιωτής ανοικτού κώδικα που αναπτύσσεται και συντηρείται από το EPRI(Electric Power Research Institute). Είναι σχεδιασμένο για να υποστηρίζει τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας και την ανάλυση του σχεδιασμού του συστήματος. Άλλες στοχευμένες εφαρμογές περιλαμβάνουν αρμονική μελέτη, μελέτη τάσης, μελέτη ελέγχου. Το Open DSS θεωρείται κατάλληλη πλατφόρμα για την ερευνά στο έξυπνο δίκτυο καθώς υποστηρίζει την ανάλυση της στοχαστικής διαδικασίας που σχετίζεται με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το πρόγραμμα έχει εξελιχθεί με την πάροδο των ετών και απέκτησε πολλές νέες δυνατότητες. Πολλές από τις δυνατότητες είναι αρκετά χρήσιμες για την ανάλυση των θεμάτων του Smart Grid. Το 2008, το EPRI άλλαξε την άδεια του προγράμματος με σκοπό την προώθηση των προσπάθειών εκσυγχρονισμού του δικτύου, παρέχοντας σε ερευνητές και συμβούλους ένα εργαλείο για την αξιολόγηση προηγμένων εννοιών και το DSS μετονομάστηκε σε OpenDSS. Τα συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι ανεπτυγμένο στην γλώσσα προγραμματισμού Delphi καθώς και στην γλώσσα προγραμματισμού C++.

- **Object Stab**

Το Object Stab είναι μια open-source βιβλιοθήκη που αντιπροσωπεύει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με ικανότητα εκτέλεσης προσομοιώσεων. Βασίζεται στην Modelica, μια γλώσσα γενικής χρήσης και μοντελοποίησης που τα χαρακτηριστικά της είναι παρόμοια με τις απλές αντικειμενοστραφείς γλώσσες προγραμματισμού όπως η Java και η C++. Ο σκοπός του εργαλείου ObjectStab είναι να παρέχει ένα περιβάλλον στο οποίο παρέχεται αρκετή ευελιξία μοντελοποίησης ώστε να επιτρέπεται τόσο η προσθήκη καθώς και η τροποποίηση νέων γεννητριών, φορτίων και μοντέλων συστήματος ελέγχου. Η βιβλιοθήκη του προγράμματος περιέχει μοντέλα κατάλληλα για το φορτίο ροής και μελέτες δυναμικής σταθερότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει σχεδιαστεί για χρήση από προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές που ειδικεύονται στην εκμάθηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, δυναμικής σταθερότητας και στην ταχεία δοκιμή των ερευνητικών ιδεών. Όλες οι συνιστώσες των

μοντέλων που εμπεριέχονται είναι διαφανείς και μπορούν εύκολα είτε να τροποποιηθούν είτε να επεκταθούν.

- **GridLab-D**

Το GridLab-D μπορεί να θεωρηθεί ως ένα εργαλείο ανάλυσης και διανομής της ενέργειας του συστήματος του έξυπνου δικτύου. Επιτρέπει την ταυτόχρονη προσομοίωση της ροής ισχύος, των φορτίων και των διάφορων λειτουργιών. Το λογισμικό αποτελείται από ένα κεντρικό σύστημα που μπορεί να καθορίσει ταυτόχρονα την κατάσταση εκατομμυρίων ανεξάρτητων συσκευών έχοντας ως αποτέλεσμα μια λεπτομερή και ακριβή περιγραφή του μοντέλου του συστήματος. Επιπλέον, το GridLAB-D εμπεριέχει πιο προηγμένα χαρακτηριστικά όπως τα μοντέλα συμπεριφοράς του καταναλωτή (πχ διάφορους τύπους ζήτησης της ισχύος). Αν και η αρχική εστίαση του GridLAB-D ήταν το σύστημα διανομής της ισχύος, η προσομοίωση και η ερευνά για το σύστημα μετάδοσης υποστηρίζεται επίσης καθώς τα modules της ροής τροφοδοσίας αποτελούνται από ένα module διανομής και από ένα module μετάδοσης. Καταληκτικά το συγκεκριμένο λογισμικό είναι αρκετά χρήσιμο διότι αποτελεί την βάση πολλών λογισμικών που συνδυάζουν την προσομοίωση και στα δυο επίπεδα, δηλαδή στο ενεργειακό και στο τηλεπικοινωνιακό. Αναλυτικότερη περιγραφή του συγκεκριμένου εργαλείου θα ακολουθήσει σε επόμενο κεφάλαιο, καθώς μέσω αυτού πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής.

5.4 Λογισμικά προσομοίωσης στο επικοινωνιακό επίπεδο

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μια επισκόπηση των προσομοιωτών ανοικτού κώδικα σε τηλεπικοινωνιακό επίπεδο, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάπτυξη και την αξιολόγηση των αρχιτεκτονικών και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Μερικοί από αυτούς που έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στα πλαίσια του έξυπνου δικτύου είναι : Network Simulator 2-3 (ns2-ns3), OMNeT++, NESSI, OPNET ή Riverbed Modeler.

- **Network Simulator 2-3 (NS-2 και NS-3)**

Το Network Simulator η έκδοση 2 (NS-2) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη ανοικτού κώδικα εφαρμογή προσομοίωσης δικτύου που δημιουργήθηκε για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς. Απευθύνεται στην ερευνά της δικτύωσης, με ιδιαίτερη έμφαση στα συστήματα του διαδικτύου. Ως εκ τούτου, περιλαμβάνει μια πλούσια βιβλιοθήκη των μοντέλων δικτύου για την υποστήριξη των προσομοιώσεων, π.χ., IP-based μοντέλα

(συμπεριλαμβανομένων των TCP, UDP, κλπ), τη δρομολόγηση, multicast πρωτόκολλα, πάνω από ενσύρματα ή / και ασύρματα δίκτυα.

Ο πυρήνας του NS-2 είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού C ++. Οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν νέα μοντέλα δικτύου ή πρωτόκολλα που χρησιμοποιώντας τη γλώσσα C ++. Ο κώδικας ελέγχου των προσομοιώσεων και άλλες πτυχές, όπως η τοπολογία του δικτύου χρησιμοποιούν το περιβάλλον της OTcl (Object Oriented Tcl) γλώσσας. Ως αποτέλεσμα, οι χρήστες μπορούν δημιουργήσουν και να τροποποιήσουν τις προσομοιώσεις, χωρίς να χρειάζεται να καταφύγουν σε κώδικα C ++.

Η ανάπτυξη του ns-3, του διάδοχου του ns-2, εμπεριέχει νέα χαρακτηριστικά που περιλαμβάνουν υποστήριξη από τη γλώσσα προγραμματισμού Python αντί για την γλώσσα OTcl, βελτιωμένη επεκτασιμότητα και μεγαλύτερη προσοχή στο ρεαλισμό. Ωστόσο, όταν επιλέγουμε μια συγκεκριμένη έκδοση του ns, είναι σημαντικό να εξετάσουμε ότι η ns-3 δεν είναι συμβατή με τη ns-2, δηλαδή, τα υπάρχοντα ns-2 μοντέλα προσομοίωσης πρέπει να εφαρμόζονται και πάλι για τη ns-3. Ο συγκεκριμένος προσομοιωτής θα αναλυθεί περισσότερο κεφάλαιο καθώς αποτελεί το δεύτερο προσομοιωτή που χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. [3]

• OMNeT++

Το open-source περιβάλλον προσομοίωσης OMNeT++ έχει σχεδιαστεί για την προσομοίωση της επικοινωνίας (ενσύρματα και ασύρματα) και στα καταναμημένα συστήματα γενικά. Το περιβάλλον προσομοίωσης έχει ένα γενικό σχέδιο (δηλαδή, δεν περιορίζεται σε προσομοίωση δικτύων επικοινωνίας) και ως εκ τούτου έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς, όπως προσομοιώσεις σε ασύρματα δίκτυα, και σε peer-to-peer δίκτυα. Ωστόσο, το OMNeT++ εφαρμόζεται επί το πλείστον στον τομέα της προσομοίωσης δικτύου επικοινωνίας. Τα μοντέλα προσομοίωσης του OMNeT++ αποτελούνται από απλά modules που υλοποιούνται σε γλώσσα προγραμματισμού C++ .Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι πολύ σημαντικό για την αξιολόγηση του έξυπνου δικτύου σε επίπεδο προτύπων και πρωτοκόλλων.

Ο OMNeT++ είναι ένας προσομοιωτής για διακριτά συμβάντα (DES – Discrete Event Simulator). Όπως και ο ns-3 είναι επεκτάσιμος, αρθρωτός, με κύριο σκοπό την προσομοίωση δικτύων υπολογιστών. Εν τούτοις, μπορεί να προσομοιώσει και άλλα δίκτυα, όπως δίκτυα σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, δίκτυα ουρών, δίκτυα αισθητήρων, κλπ. Για να το επιτύχει, αναπτύσσονται, ως ξεχωριστά έργα, διάφορα πλαίσια (frameworks), τα οποία αποτελούν βιβλιοθήκες με όλα τα απαραίτητα δικτυακά στοιχεία, μηνύματα, Διαδικτυακά και άλλα πρωτόκολλα

Η φιλοσοφία του σχεδιασμού του είναι μία αρχιτεκτονική συστατικών στοιχείων για δημιουργία μοντέλων. Τα στοιχεία (modules) προγραμματίζονται σε C++. Κατόπιν συναρμολογούνται σε μεγαλύτερα συστατικά στοιχεία και μοντέλα χρησιμοποιώντας μία σχετικά απλή γλώσσα υψηλού επιπέδου, ονόματι NED. Έτσι, είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση των μοντέλων.

- **NeSSi**

Το Nessi (Network Simulator Security) αποτελεί ένα open-source προσομοιωτή δικτύου που αναπτύχθηκε στο DAI-Labor (Distributed Artificial Intelligence Laboratory) και χρηματοδοτείται από την Deutsche Telekom Laboratories. Ο συγκεκριμένος προσομοιωτής είναι υπεύθυνος για την υποστήριξη σεναρίων που σχετίζονται με την ασφάλεια, δηλαδή, την ανίχνευση επίθεσης, μετρήσεις της ασφάλειας, κλπ. Αποτελεί ένα πολύ σημαντικό προσομοιωτή, καθώς το θέμα της ασφάλειας είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στην ανάπτυξη του έξυπνου δικτύου.

- **OPNET ή Riverbed Modeler**

Ο OPNET (Optimized Network Engineering Tool) είναι ένας εμπορικός προσομοιωτής δικτύων. Το περιβάλλον του είναι πλήρως γραφικό και τρέχει σε Windows της Microsoft. Εκτός από την ίδια περίπου φιλοσοφία με τους προηγούμενους προσομοιωτές, είναι γραμμένος σε C++ για μέγιστη δυνατή ταχύτητα. Αν και είναι δυνατή η τροποποίηση, προσθήκη ή επέκταση κάθε στοιχείου στην βιβλιοθήκη του σε C++, αυτή η δυνατότητα δεν υπάρχει για την ακαδημαϊκή του έκδοση, η οποία διατίθεται δωρεάν για 6 μήνες με δωρεάν απλή εγγραφή και σχετική ψηφιακή άδεια χρήσης, η οποία είναι ανανεώσιμη. Επίσης, η έκδοση αυτή δεν περιέχει όλες τις δυνατότητες και βιβλιοθήκες της πλήρους εκδόσεως.

5.5 Λογισμικά προσομοίωσης και των δυο επίπεδων (Co-Simulation)

Στην συνέχεια θα αναλυθούν τα ανοικτού τύπου λογισμικά που συνδυάζουν τους προσομοιωτές τόσο σε ενεργειακό αλλά και σε τηλεπικοινωνιακό επίπεδο. Τα οποία είναι GridSpice, EPOCHS, FNCS, HELICS.

- **Grid Spice**

Το GridSpice αποτελεί ένα λογισμικό προσομοίωσής βασισμένο στο νέφος(Cloud-based simulation) ενσωματώνοντας το εργαλείο GridLAB-D για την προσομοίωση της παραγωγής, διανομής και κατανάλωση της ενέργειας και το εργαλείο MATPOWER (λογισμικό που βασίζεται στο Matlab) με σκοπό βέλτιστη προσομοίωση της ροής ισχύος σε ένα έξυπνο δίκτυο.

- **EPOCHS**

Το εργαλείο EPOCHS συνδυάζει τον προσομοιωτή δικτύου NS2 με άλλους δυο προσομοιωτές ισχύος ,το PSCAD/EMTDC και το PSLF. Το EPOCHS επιτρέπει στους χρήστες να ερευνήσουν ηλεκτρομαγνητικά σενάρια που αφορούν την επικοινωνία χρησιμοποιώντας τα λογισμικά PSCAD/EMTDC και NS2 καθώς και ηλεκτρομηχανολογικά σενάρια που αφορούν τις επικοινωνίες χρησιμοποιώντας τα λογισμικά PSLF και NS2.

- **FNCS**

Το πρόγραμμα FNCS(Framework for Network Co-Simulation) συνενώνει έναν προσομοιωτή διανομής ισχύος(GridLAB-D) ,έναν προσομοιωτή μετάδοσης και έναν προσομοιωτή δικτύου (NS3) για να απεικονίσει την βελτιωμένη απόδοση ενός έξυπνου δικτύου.

- **HELICS**

Το πρόγραμμα HELICS (Hierarchical Engine for Large-scale Infrastructure Co-Simulation) αποτελεί ένα ανοικτού κώδικα λογισμικό συν-προσομοίωσης στο επίπεδο της συνένωσης επιμέρους προσομοιωτών. Το HELICS ξεκίνησε το 2018 ως ένα project σύμπραξης τριών ερευνητικών εργαστηρίων των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής που ασχολούνται σε ερευνητικό επίπεδο με το έξυπνο ενεργειακό δίκτυο με την υποστήριξη του υπουργείου ενέργειας.

Κεφάλαιο 6: Συν – Προσομοίωση στο πλαίσιο της διεσπαρμένης παραγωγής.

6.1 Επισκόπηση συν-προσομοίωσης

Η συν-προσομοίωση αποτελεί μια τεχνική ανάλυσης που επιτρέπει σε προσομοιωτές από διαφορετικά συστήματα να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, συνήθως ανταλλάσσοντας τιμές κατά τη πορείας της προσομοίωσης. Η συν-προσομοίωση επιτρέπει τη σύζευξη υπαρχόντων μοντέλων και προσομοιωτών υπολογίζοντας αποτελέσματα τα οποία είναι πιο ρεαλιστικά και δυναμικά.

Η διαδικασία της συν-προσομοίωσης χαρακτηρίζεται επίσης από ένα ενσωματωμένο παραλληλισμό που επιτρέπει την χρήση διαφορετικών πλαισίων με σκοπό την δημιουργία μικρών έως και πολύ μεγάλων μοντέλων προσομοίωσης. Ιδιαίτερα για συστήματα με περιορισμένες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των προσομοιωτών, οι ανταλλαγές τιμών που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι περιορισμένες, επιτρέποντας ως ένα όριο στους προσομοιωτές να λειτουργούν ανεξάρτητα.

Η σύνδεση λοιπόν των προσομοιωτών μπορεί να περιγράφει από δύο βασικές συναρτήσεις:

- *Διατήρηση συγχρονισμού όλων των προσομοιωτών που χρησιμοποιούνται.*
- *Διευκόλυνση της μεταφοράς δεδομένων μεταξύ τους.*

Η διατήρηση του συγχρονισμού αποτελεί ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό κατά τη διαδικασία της συν-προσομοίωσης καθώς σε ένα ετερογενές περιβάλλον προσομοίωσης όπου η έννοια του χρόνου κάθε προσομοιωτή είναι διαφορετική και ο υπολογισμός του χρόνου που απαιτείται από κάθε προσομοιωτή μπορεί να είναι διαφορετικός, για αυτό το λόγο η ρύθμιση ενός καθολικού χρόνου συν-προσομοίωσης είναι απαραίτητη.

Χωρίς το παραπάνω χαρακτηριστικό το πλαίσιο της συνεργατικής προσομοίωσης καθίσταται αδύνατο να πραγματοποιηθεί καθώς τα αποτελέσματα του κάθε ξεχωριστού προσομοιωτή επηρεάζουν το συνολικό σύστημα. Αν οι τιμές των αποτελεσμάτων αυτών λαμβάνονται από διαφορετικά χρονικά πλαίσια από τις υπόλοιπες ουσιαστικά δεν έχουν κανένα νόημα.

6.2 Επεξήγηση του προσομοιωτή GridLAB-D.

Ένα από τα τρία βασικότερα εργαλεία προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής είναι το GridLAB-D. Το πρόγραμμα GridLAB-D είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης και ανάλυσης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που δημιουργήθηκε από το Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), σε συνεργασία με το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. Αποτελεί ένα ευέλικτο και ανοικτούκώδικα (open-source) προσομοιωτή βασισμένο σε πράκτορες οποίος παρέχει τη δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς στοιχείων. Συνιστά ένα καινοτόμο εργαλείο προσομοίωσης και ανάλυσης συστημάτων διανομής ενέργειας που προσφέρει σημαντικές πληροφορίες στους σχεδιαστές συστημάτων ενέργειας καθώς και σε παρόχους που επιθυμούν να επωφεληθούν από τις τελευταίες ενεργειακές τεχνολογίες. Το συγκεκριμένο λογισμικό προσομοίωσης εμπεριέχει πιο ανεπτυγμένες μεθόδους μοντελοποίησης μέσω της χρήσης αλγορίθμων υψηλής απόδοσης με αποτέλεσμα την παροχή ενός καλύτερου μοντέλου τελικής χρήσης. Τα βασικά στοιχεία που εμπεριέχονται είναι οι ενότητες (module), οι κλάσεις και τα αντικείμενα, τα οποία αποτελούν τα στοιχεία εισαγωγής που μέσω αυτών περατώνονται οι προσομοιώσεις.

Οι ενότητες (modules) συνήθως δημιουργούνται για να υλοποιήσουν ένα σύνολο από κλάσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν αντικείμενα ενός συγκεκριμένου τύπου. Η έκδοση του GridLAB-D υποστηρίζει έναν αριθμό από διαφορετικές ενότητες:

- *Climate module*
- *Market module*
- *Powerflow module*
- *Residential module*
- *Reliability module*

Στον πυρήνα του, το GridLAB-D κατέχει έναν ανεπτυγμένο αλγόριθμο ώστε να καθορίσει ταυτόχρονα την κατάσταση πολλών ανεξάρτητων συσκευών, καθεμία από τις οποίες περιγράφεται από μοντέλα και εξισώσεις σχετικά με τον συγκεκριμένο τομέα. Ο πυρήνας υλοποιεί την επικοινωνία και τον συντονισμό όλων των ενότητων, και όλων των συναρτήσεων υποστήριξης ώστε να λειτουργήσουν οι παραπάνω ενότητες (modules).

Ένα πρότυπο του GridLAB-D μπορεί να αποθηκευτεί είτε σε αρχείο glm (GridLAB-D Model) είτε στην μορφή ενός xml αρχείου. Τα αρχεία glm δεν είναι ακριβώς όπως τα αρχεία xml. Ένα αρχείο xml είναι μια πιστή απεικόνιση του ακριβούς μοντέλου που προσομοιώνεται, ενώ ένα αρχείο glm μπορεί να παράσχει πληροφορίες όπως οι παραμετρικές τιμές και οι στατιστικές κατανομές για την κάθε ιδιότητα, καθώς και προδιαγραφές για τη σύνθεση αντικειμένων έτσι ώστε μεγάλα μοντέλα να μπορούν δημιουργηθούν από σχετικά απλές περιγραφές. Τέλος, τα glm αρχεία επιτρέπουν την περιγραφή της συμπεριφοράς των αντικειμένων της προσομοίωσης ενώ τα xml αρχεία δεν έχουν αυτή την δυνατότητα.

Σε γενικές γραμμές και τα δύο είδη αρχείων χρησιμοποιούνται για δυο λόγους:

Την προβολή των αποτελεσμάτων εξόδου.

Την ανταλλαγή δεδομένων με άλλα εργαλεία.

Από αρχιτεκτονικής άποψης το GridLAB-D λειτουργεί ως συνδυασμός ενός μεταγλωττιστή και ενός λειτουργικού προγράμματος. Καθορίζει τις ενότητες, τα αντικείμενα, τις κλάσεις, που είναι τα βασικά στοιχεία για την δημιουργία ενός σεναρίου προς προσομοίωση, τη ιεραρχία κληρονομικότητας, τους ονομαζόμενους τύπους μεταβλητών και τις συνδέσεις στα διάφορα αντικείμενα. Επίσης κάτι σημαντικό είναι πως το μοντέλο προσομοίωσης του GridLAB-D καθοδηγείται με βάση τα γεγονότα που συμβαίνουν και όχι με βάση τον χρόνο.

6.2.1 Επεξήγηση των στελεχών (modules) στην συν-προσομοίωση

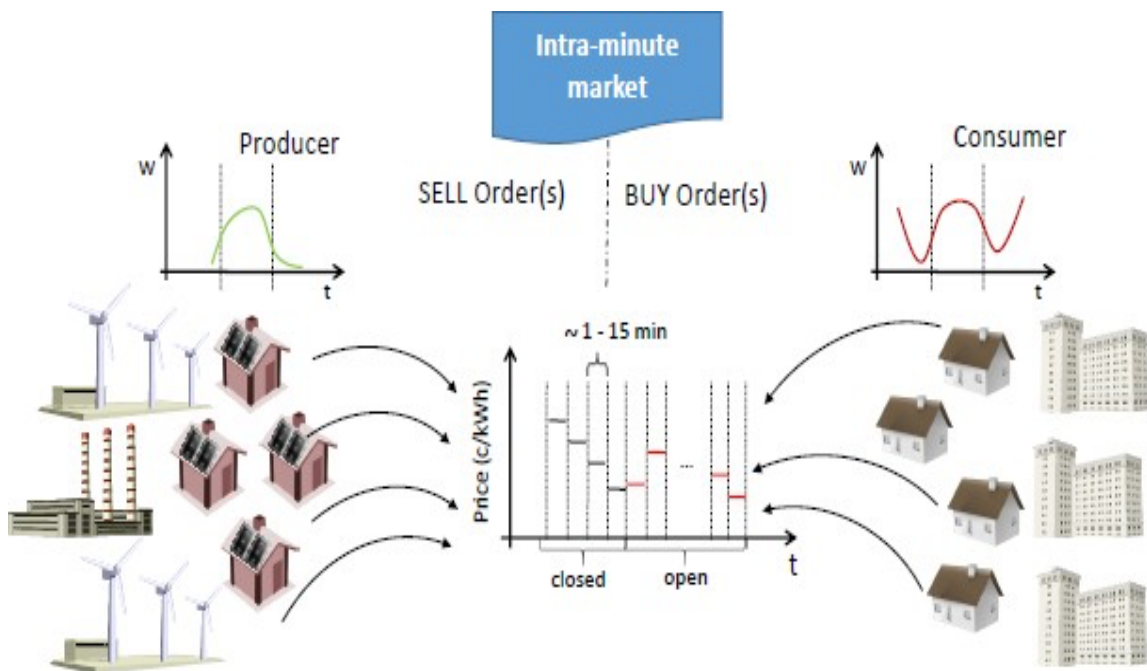
- **Climate module**

Το εν λόγω module παρέχει μια διεπαφή η οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί από τα αντικείμενα για να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς τα κλιματικά δεδομένα. Αντικείμενα όπως τα σπίτια και τα κτίρια βασίζονται σε αυτά τα στοιχεία αναφορικά με τον παράγοντα του εξωτερικού καιρού στον υπολογισμό της εσωτερικής θερμοκρασίας. Τα κλιματικά δεδομένα περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, την υγρασία και την ηλιακή ακτινοβολία, στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αύξησης της θερμοκρασίας η οποία είναι αποτέλεσμα της θερμότητας που αποκτάται από την άμεση έκθεση μιας επιφάνειας στο ηλιακό φως.

- **Market module**

Το Market Module στο Gridlab-D χαρακτηρίζεται κυρίως από ένα σύστημα πλειοδοσιών (bidding) το οποίο οργανώνει την αγορά ενέργειας. Την επιφόρτιση οργάνωσης της αγοράς έχει το αντικείμενο auction. Ανήκει στο market module και αποτελεί το μέσο για να παρέχουν είτε να ζητούν ενέργεια ((sellers - buyers) αντίστοιχα) οι συσκευές σε δυναμικό ή πραγματικό χρόνο. Το αντικείμενο auction αποτελεί την κεντρική οντότητα της αγοράς(market module).

Αναφορικά με τη λειτουργία της, με τη πάροδο συγκεκριμένου χρόνου και μετά την παροχή προσφορών από τους παραγωγούς και οι καταναλωτές, θα υπολογιστεί η ποσότητα προσφοράς και ζήτησης, καθώς και η τιμή στην οποία θα πωλείται - αγοράζεται η συγκεκριμένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Η τιμή που θα αποφασιστεί θα καταστεί ενεργή έπειτα από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα (latency interval). Το αντικείμενο auction δεν αποδίδει κανένα λογιστικό έλεγχο στο σύστημα των πλειοδοσιών, παρέχει απλώς μια κεντρική αγορά για αγοραστές και πωλητές ενέργειας.[28] Ένα σχήμα που απεικονίζει την λειτουργία του auction ακολουθεί στην συνέχεια:



Σχήμα 6: Λειτουργία του Object Auction. [9]

- **Power Flow module**

Το συγκεκριμένο module παρέχει μοντέλα συστημάτων ηλεκτρικής διανομής και χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους για την παρατήρηση των τιμών της τάσης και του ρεύματος σε ένα σύστημα. Γενικότερα μέσω του συγκεκριμένου module υπολογίζεται η ροή ισχύος (power flow) για ένα σύστημα διανομής ενέργειας. Για αυτό το λόγο προσδιορίζονται οι τάσεις των κόμβων ενός δικτύου καθώς και τα ρεύματα στις γραμμές μεταφοράς σε κάθε σημείο του συστήματος, δεδομένου του μοντέλου του συστήματος και των ηλεκτρικών φορτίων που συνδέονται σε κάθε κόμβο και της τάσης στον υποσταθμό. Το πρόβλημα της ροής ισχύος επιλύεται χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους. Όταν η τοπολογία του συστήματος από τον τροφοδότη στα φορτία είναι αυστηρά ακτινική χρησιμοποιείται η μέθοδος σάρωσης προς τα εμπρός-πίσω (forward- back sweep method), η οποία είναι η προεπιλεγμένη μέθοδος από τον συγκεκριμένο προσομοιωτή. Ενώ όταν η τοπολογία είναι μη-ακτινική χρησιμοποιούνται τριφασικές οι μη ισορροπημένες μέθοδοι Gauss-Seidel ή Newton-Raphson.

Το powerflow module αποτελείται από πολλά αντικείμενα με το node και το link να έχουν πρωταρχικό ρόλο. Σχεδόν όλα τα αντικείμενα μέσα στο powerflow module προέρχονται από αυτά τα δύο αντικείμενα. Επομένως οποιεσδήποτε ιδιότητες, που ορίστηκαν για αυτά τα δύο αντικείμενα είναι επίσης διαθέσιμες σε οποιοδήποτε αντικείμενο που προέρχεται από αυτά. Για παράδειγμα, το αντικείμενο node έχει ως ιδιότητα την τάση, έτσι το αντικείμενο load που είναι παράγωγο του αντικειμένου node έχει αυτόματα αυτή την ιδιότητα, καθώς και αυτές που το κάνουν να ξεχωρίζει από το αντικείμενο node.

Στο powerflow module εκτός των άλλων αντικειμένων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τάσης και του ρεύματος υπάρχουν και αντικείμενα όπως ο meter και ο triplex meter που αποτελούν παράγωγα του αντικειμένου node με την διαφορά όμως ότι διατηρούν και τις δικές τους ιδιότητες. Ορισμένες αξιοσημείωτες ιδιότητες είναι ότι τα εν λόγω αντικείμενα αποτελούν σημείο μέτρησης είτε της ενέργειας είτε της ισχύος σε ένα συγκεκριμένο σημείο του συστήματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα αντικείμενα που θα χρησιμοποιηθούν από το powerflow module για την υλοποίηση είναι τα node, load, triplex-line και triplex_meter.[9]

- **Residential module**

Το συγκεκριμένο module προσομοιώνει διάφορες συσκευές και ηλεκτρονικές συσκευές που βρίσκονται μέσα στο σπίτι όπως κλιματισμός, θερμοσίφωνα, πλυντήριο ψυγείο κλπ.

- **Reliability module**

Το εν λόγω module παρέχει τη δυνατότητα να προκαλεί συμβάντα σε ένα σύστημα και να αξιολογεί τις επιπτώσεις τους. Αυτό το module συλλέγει και εξάγει μετρήσεις κατάλληλες για κάθε ενότητα σε ένα αρχείο καταγραφής για αξιολόγηση από τους χρήστες.

6.3 Επεξήγηση του προσομοιωτή Network – Simulator 3 (NS-3)

Ο προσομοιωτής Network-Simulator 3(ns-3) είναι ο τρίτος στην σειρά προσομοιωτής δικτύων διακριτών γεγονότων(discrete event network simulator) που στοχεύει κυρίως στην έρευνα και την εκπαιδευτική χρήση. Το ns-3 έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μια ανοικτού κώδικα (open-source), πλατφόρμα προσομοίωσης δικτύων με σκοπό την μελέτη και ανάπτυξη σεναρίων προσομοίωσης για το τομέα των τηλεπικοινωνιών και δικτύων.

Εν συντομία, το ns-3 παρέχει μοντέλα τα οποία αποτυπώνουν πιστά το κάθε επίπεδο της πυραμίδας OSI, οδηγώντας έτσι στην δημιουργία και υλοποίηση σύνθετων πειραμάτων με αποτέλεσμα την παραγωγή αξιόπιστων στοιχείων. Το ns-3 έχει αναπτυχθεί και βασίζεται πλήρως στην γλώσσα προγραμματισμού C++ έτσι για να κατασκευαστεί μια προσομοίωση, ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει ένα κύριο πρόγραμμα σε C++ που κατασκευάζει τα διάφορα στοιχεία που απαιτούνται για την περιγραφή του δικτύου επικοινωνίας καθώς και την επιθυμητή δραστηριότητα του δικτύου. Το πρόγραμμα στη συνέχεια συντάσσεται και συνδέεται με τη βιβλιοθήκη των μοντέλων δικτύου που διανέμονται με το ns-3.

Το μεγαλύτερο μέρος του API (Application Program Interface) του ns-3 είναι διαθέσιμο σε Python, αλλά όλα τα μοντέλα έχουν γραφεί σε C++. Η δημιουργία των script για τον ns-3 μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε από τις δύο γλώσσες στις περισσότερες των περιπτώσεων, αλλά μία ικανοποιητική γνώση της C++ είναι αναγκαία. Ως compiler χρησιμοποιείται ο γνωστός gcc της GNU μαζί με άλλα της εργαλεία (GNU, 2015). Αν και ο ns-3 διανέμεται σε πηγαία μορφή μαζί με τα περισσότερα αναγκαία εργαλεία, ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει με αυτά ένα σύστημα από βιβλιοθήκες λογισμικού. Ο πηγαίος κώδικας είναι επίσης αναγκαίος, επειδή ο χρήστης δημιουργεί τα προγράμματα που αντιστοιχούν σε

προσομοιώσεις του ns-3 με το να ξαναφτιάχνει κάποιες από τις βιβλιοθήκες

Κατά τη σύνταξη του προγράμματος προσομοίωσης C ++, υπάρχουν τέσσερα βασικά βήματα που θα πρέπει να ακολουθηθούν για να οδηγήσουν στην ομαλή λειτουργία της προσομοίωσης:[9]

- *Δημιουργία της τοπολογίας του δικτύου*

Αυτό αποτελείται από την αρχικοποίηση των αντικειμένων σε C ++ που θα αφορούν τους κόμβους του δικτύου, τις συσκευές, τα κανάλια και τα πρωτόκολλα δικτύου που βρίσκονται στο μοντέλο προσομοίωσης. Δημιουργία ζήτησης(demand) δεδομένων στο δίκτυο: Αυτό συνίσταται τη δημιουργία προσομοίωσης διαφόρων εφαρμογών δικτύου που στέλνουν και λαμβάνουν πληροφορίες από ένα δίκτυο ώστε να προκαλέσουν τη δημιουργία ή την επεξεργασία πακέτων.

- *Εκτέλεση της προσομοίωσης*

Τυπικά, αυτό οδηγεί στην είσοδο του προσομοιωτή το κύριο βρόχο συμβάντος, το οποίο διαβάζει και αφαιρεί τα γεγονότα στη σφραγίδα του χρόνου από την ταξινομημένη δομή δεδομένων συμβάντων. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς έως ότου η λίστα συμβάντων γίνει κενή ή όταν έχει επιτευχθεί ο προκαθορισμένος χρόνος που διαρκεί η προσομοίωση.

- *Ανάλυση των αποτελεσμάτων*

Αυτό πραγματοποιείται συνήθως μέσω της ανάλυσης των πληροφοριών που παράγονται από την εκτέλεση του προγράμματος στο ns-3. Τα αρχεία ανίχνευσης θα περιέχουν αρκετές πληροφορίες σχετικά με τα κανάλια επικοινωνίας στην προσομοίωση.

6.3.1 Βασικές κατηγορίες του NS-3

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι κλάσεις του ns-3 είναι υλοποιημένες σε C++ και ο κώδικας τους διασπάται στις εξής κατηγορίες [10]:

- **Πυρήνας**

Στην κατηγορία αυτή υλοποιούνται βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούν όλες οι υπόλοιπες κλάσεις. Γίνεται ορισμός σημαντικών κλάσεων όπως η Object η οποία αποτελεί την υπερκλάση όλων των οντοτήτων στον ns-3, επίσης δημιουργούνται συστήματα για την διαχείριση των αντικειμένων όπως το Attribute System.

- **Network**

Στην συγκεκριμένη κατηγορία αντιστοιχούν οι κλάσεις που έχουν σχέση με τα σημαντικά στοιχεία ενός δικτύου τα οποία και περιγράφουν. Η βασική κλάση στην οποία βασίζονται οι υπόλοιπες κλάσεις ονομάζεται Node η οποία περιγράφει τους κόμβους ενός δικτύου.

- **Internet**

Εδώ υλοποιούνται οι κλάσεις που έχουν σχέση με την τοπολογία των πειραμάτων καθώς επίσης υλοποιείται και το Internet Module το οποίο περιέχει τις υλοποιήσεις των στοιχείων που υπάρχουν στην επικοινωνία, στα χαμηλά επίπεδα του OSI. Δηλαδή υλοποιούνται πρωτόκολλα όπως το ARP αλλά και οποιοδήποτε άλλο στοιχείο του IPv4

- **Protocols/Applications**

Σε αυτή την κατηγορία, κατατάσσεται ο κώδικας που σχετίζεται με την υλοποίηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

- **Helpers**

Η κατηγορία αυτή περιέχει ένα πλήθος κλάσεων, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των προσομοιώσεων και με σκοπό την απλοποίηση της δημιουργίας αντικειμένων που διαθέτουν κοινές ιδιότητες.

6.3.2 Βασικές δομές του ns-3

Οι βασικότερες δομές του προσομοιωτή Ns-3 είναι οι εξής:

- **Κόμβος (Node)**

Αναπαριστά την σημαντικότερη υπολογιστική συσκευή του NS-3 και μέσω της βιβλιοθήκης του NS-3 αναπαρίσταται από την κλάση Node. Η συγκεκριμένη δομή μπορεί να συνδυασθεί και με άλλες δομές που περιγράφουν το δίκτυο

- **Κανάλι (Channel)**

Συνιστά το κανάλι επικοινωνίας μέσω του οποίου πραγματοποιούνται οι συνδέσεις των κόμβων του δικτύου για την μετάδοση δεδομένων και πληροφοριών. Στην βιβλιοθήκη του προσομοιωτή η κλάση Channel απαρτίζεται από τις μεθόδους διαχείρισης αντικειμένων και σύνδεσης των κόμβων. Κάποιοι βασικοί τύποι καναλιών είναι οι εξής:

CSMA/CA

POINT-TO POINT

WIFI

WIMAX

LR-WPAN

LTE

- **Συσκευή δικτύου (NetDevice)**

Αποτελεί τη συσκευή που επιτυγχάνει τη σύνδεση κάθε κόμβου με το κανάλι. Η λειτουργία της συγκεκριμένης συσκευής είναι η εγκατάσταση της σε έναν κόμβο ώστε να επιτευχθεί η σύνδεση του με τους άλλους κόμβους μέσω του καναλιού. Για αυτό το λόγο υπάρχει το αντίστοιχο Net Device όπως:

PointToPointNetDevice

CsmaNetDevice

WifiNetDevice

WimaxNetDevice

LteNetDevice

LrWpanNetDevice

- **Βοηθοί Τοπολογίας (Topology Helpers)**

Η συγκεκριμένη δομή είναι υπεύθυνη για την παροχή βοήθειας στο χρήστη μέσω της απλοποίησης των ενεργειών για την δημιουργία και υλοποίηση της προσομοίωσης. Μερικά χαρακτηριστικά της δομής αυτής είναι:

Η δημιουργία κανόνων σύνδεσης μεταξύ των κόμβων.

Η δημιουργία κανόνων σύνδεσης μεταξύ των κόμβων και καναλιών.

Η δημιουργία κανόνων σύνδεσης μεταξύ των κόμβων και των συσκευών δικτύου.

Η κατανομή διευθύνσεων IP σε όλα τα στοιχεία του δικτύου.

- **Πρωτόκολλα δρομολόγησης του ns-3**

Τα πρωτοκόλλα δρομολόγησης που υποστηρίζει το ns-3 για την μεταφορά των πακέτων είναι τα εξής:

Ipv4StaticRouting (Μονής εκπομπής και πολλαπλής)

IPv4 Optimized Link State Routing (OLSR)

IPv4 Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV)

IPv4 Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)

Dynamic Source Routing (DSR – Απευθύνεται σε δρομολόγηση πακέτων για Ασύρματα δίκτυα)

Ipv4ListRouting (Χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των προτεραιοτήτων των πρωτοκόλλων)

Ipv4GlobalRouting

Ipv4NixVectorRouting

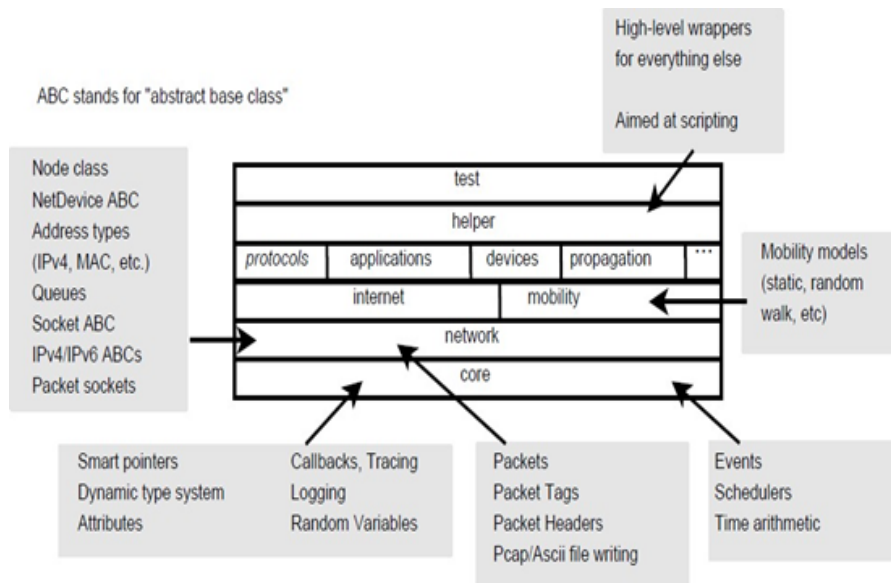
Ipv6ListRouting

Ipv6StaticRouting

- **Καταγραφή(Logging)**

Το ns-3 παρέχει μια προσέγγιση πολλαπλών επιπέδων για την καταγραφή των εξαγόμενων μηνυμάτων μετά το πέρας της προσομοίωσης. Η συγκεκριμένη υπηρεσία είτε μπορεί να απενεργοποιηθεί τελείως είτε να ενεργοποιηθεί μερικώς ή ολικά. Το ns-3 παρέχει επτά επίπεδα καταγραφής μηνυμάτων. Η καταγραφή μηνυμάτων είναι πολύ σημαντική καθώς με αυτό το τρόπο πραγματοποιείται εντοπισμός σφαλμάτων, εντοπίζονται μηνύματα λάθους, και εξάγονται συμπεράσματα από το σενάριο ή το μοντέλο

προσομοίωσης.



Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική Ns-3.[10]

6.4 Σύστημα εντοπισμού (Tracing System)

Το σύστημα εντοπισμού είναι ένας από τους σημαντικότερους μηχανισμούς που πρέπει να κατανοήσουμε στο ns-3. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το υποσύστημα εντοπισμού επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν ένα σύστημα παραγωγής δεδομένων μέσω της οριστικοποίησης των αντικειμένων που θα παράγουν τον εντοπισμό. Με άλλα λόγια, το σημαντικό σημείο της εκτέλεσης μιας προσομοίωσης είναι να παράγει αποτελέσματα για περαιτέρω μελέτη. Στο ns-3, το υποσύστημα που επιτρέπει σε έναν χρήστη να το κάνει αυτό είναι το υποσύστημα ανίχνευσης (Tracing System). Ο ns-3 υποστηρίζει το σύστημα του εντοπισμού ASCII μέσω του helper `AsciiTraceHelper` για την δημιουργία ASCII αρχείων είτε μέσω της δημιουργίας `pcap` (packet capture) αρχείων εντοπισμού.[10]

6.5 Hierarchical Engine for Large-scale Infrastructure Co-Simulation (HELICS)

Το HELICS (Hierarchical Engine for Large-scale Infrastructure Co-Simulation) αποτελεί τον τρίτο προσομοιωτή που χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Συνιστά μια ενωτική πλατφόρμα (federated platform) προσομοιωτών δικτύων επικοινωνίας όπως το Network-Simulator 3 και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας όπως το GridLab-D με σκοπό την παροχή ολοκληρωμένων μέσω προσομοίωσης τόσο σε επίπεδο ενεργειακό και τηλεπικοινωνιακό. Το HELICS

6.5.1 Βασικά χαρακτηριστικά του HELICS

Στην συγκεκριμένη παράγραφο θα πραγματοποιηθεί μια λεπτομερής περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του λογισμικού HELICS. Τα πιο βασικά είναι:

- **Προσομοιωτής**

Ένας προσομοιωτής είναι το εκτελέσιμο εκείνο πρόγραμμα που μπορεί να εκτελέσει κάποια λειτουργία ανάλυσης. Οι προσομοιωτές είναι συγκεκριμένοι με την έννοια ότι σε μεγάλο βαθμό η έννοια αναφέρεται στο λογισμικό σε κατάσταση εκτέλεσης, εντός της συν-προσομοίωσης.

- **Συνενώσεις (Federates)**

Οι «συνενώσεις» (federates) χαρακτηρίζονται ως οι «συν-ενωμένες» παρουσίες των προσομοιωτών στους οποίους έχει ανατεθεί μια συγκεκριμένη λειτουργία. Για παράδειγμα, μπορούμε να έχουμε δέκα μοντέλα ενός κυκλώματος διανομής που συνδέονται για τη συν-προσομοίωση. Το κάθε μοντέλο εκτελείται μέσω του προσομοιωτή GridLAB-D. Για παράδειγμα όταν τρέχουν, γίνονται δέκα μοναδικές «συνενώσεις» (federates) που παρέχουν μοναδικές τιμές ή μία στην άλλη

- **Πυρήνας (Core)**

Ο πυρήνας είναι το λογισμικό που έχει ενσωματωθεί σε έναν προσομοιωτή για να του επιτρέψει να συμμετάσχει σε μία «συνένωση» (Federation) με το HELICS. Σε γενικές γραμμές, κάθε «συνένωση» έχει έναν πυρήνα, καθιστώντας τα δύο, συνώνυμα.

- **Μοντέλο (Model)**

Ένα μοντέλο είναι συνώνυμο με έναν πράκτορα (agent) στη συν-προσομοίωση. Ένας προσομοιωτής περιέχει τους υπολογισμούς για το μοντέλο. Ανάλογα με τις ανάγκες της συν-προσομοίωσης, μια «συνένωση» μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να περιέχει ένα ή πολλά μοντέλα.

- **Μηνύματα**

Τα μηνύματα χαρακτηρίζονται ως οι πληροφορίες που διαβιβάζονται μεταξύ των προσομοιωτών κατά την εκτέλεση της συν-προσομοίωσης. Βασικά, η λειτουργία της συν-προσομοίωσης αφορά ουσιαστικά τη μετάδοση μηνυμάτων. Στο HELICS, υπάρχουν διάφορες τεχνικές και υλοποιήσεις της υποδομής μετάδοσης μηνυμάτων που έχουν υλοποιηθεί στον πυρήνα. Επίσης υπάρχει μια ποικιλία μηχανισμών σε μια συν-προσομοίωση για τον καθορισμό της φύσης των δεδομένων που ανταλλάσσονται (τύπος δεδομένων) και τον τρόπο μετάδοσης των δεδομένων σε όλη την διαδικασία.

- **Ενδιάμεσος (Broker)**

Ο ενδιάμεσος (Broker) είναι ένα ειδικό εκτελέσιμο που διανέμεται με το HELICS το οποίο είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση των δύο βασικών εργασιών μιας συν-προσομοίωσης, τη διατήρηση του συγχρονισμού και στη διευκόλυνση της ανταλλαγής των μηνυμάτων.

6.5.2 Βήματα της διαδικασίας συν-προσομοίωσης με το HELICS

Καθώς η συν-προσομοίωση ορίζεται κατά κάποιο τρόπο, ως ένας συνδυασμός δυο προσομοιώσεων, απαιτούνται δύο επίπεδα διαμόρφωσης: η διαμόρφωση των μεμονωμένων προσομοιωτών ώστε να λειτουργούν ξεχωριστά μόνοι τους (προσδιορίζοντας μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν, καθορίζοντας την αρχή και τη διακοπή ώρα της προσομοίωσης, καθορίζοντας πώς θα πρέπει να αποθηκεύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, κ.λπ.) και τη διαμόρφωση του τρόπου με τον οποίο κάθε προσομοιωτής θα συνδεθεί στη συν-προσομοίωση και πώς θα αλληλοεπιδρά με τους υπόλοιπους στη διαδικασία. Ένας από τους στόχους μιας πλατφόρμας συν-προσομοίωσης όπως το HELICS είναι να διαμορφώνει τις κατάλληλες συνθήκες ώστε η παραπάνω διαδικασία να είναι ευκολότερη και πιο αποτελεσματική παρέχοντας μια τυποποιημένη μέθοδο διαμόρφωσης. Για την καλύτερη κατανόηση του γιατί απαιτούνται συγκεκριμένοι τύποι πληροφοριών κατά τη διαμόρφωση πρέπει να εξετάσουμε τα βήματα για το πώς κατασκευάζεται και λειτουργεί μια συν-προσομοίωση που βασίζεται στο HELICS, χρησιμοποιώντας το παράδειγμα μιας γενικής ροής ισχύος μετάδοσης και διανομής.

Το πρώτο βασικό βήμα για την διεξαγωγή της συν-προσομοίωσης αποτελεί η σχεδίαση της διαδικασίας συν-προσομοίωσης. Αυτό το βήμα δεν αποτελεί ένα πραγματικό μέρος της εκτέλεσης της συν-προσομοίωσης αλλά είναι ένα βήμα που συχνά παραβλέπεται. Ουσιαστικά, αυτό το βήμα εξαρτάται από την κατανόηση, την παραδοχή και τις γνώσεις του χρήστη όσο αναφορά τις τεχνικές μοντελοποίησης και τη δυναμική των προσομοιωτών που θα συνδεθούν με την πλατφόρμα του HELICS. Με βάση αυτές τις γνώσεις ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει την τοπολογία ενός μηνύματος μεταφοράς δηλαδή ουσιαστικά θα πρέπει να ορίσει ποιες πληροφορίες μεταδίδονται και σε ποιον και την τοπολογία του ενδιάμεσου (Broker)

δηλαδή την σειρά με την οποία θα συνδεθούν οι προσομοιωτές. Συγκεκριμένα το πιο σημαντικό ζήτημα είναι το θέμα κατανόησης των αλληλεπιδράσεων του συστήματος και ο τρόπος με τον οποίο θα επιτευχθεί η αύξηση της απόδοσης .

Το δεύτερο βήμα είναι η διαμόρφωση ελέγχου των προσομοιωτών. Η παρουσία του κάθε προσομοιωτή στην διαδικασία της συν-προσομοίωσης απαιτεί τη σωστή διαμόρφωση ώστε να ενσωματώνεται ομαλά με την υπόλοιπη διαδικασία. Για τους προσομοιωτές που υποστηρίζει το HELICS η διαμόρφωση του ελέγχου έχει τη μορφή ενός αρχείου json ή toml. Στο συγκεκριμένο αρχείο ουσιαστικά υπάρχουν οι κατάλληλες εντολές ώστε να δημιουργηθεί ο κατάλληλος έλεγχος για τους εκάστοτε προσομοιωτές. Επίσης είναι εφικτό ο έλεγχος να πραγματοποιηθεί μέσω της ανάπτυξης ενός κώδικα σε μια γλώσσα προγραμματισμού. Οι βασικές πληροφορίες τις οποίες ένα αρχείο ελέγχου του HELICS εμπεριέχει είναι οι εξής:[11]

- **Όνομα της συνένωσης (Federate name)**

Το μοναδικό όνομα αυτής της συνένωσης θα είναι γνωστό σε όλη την ομοσπονδία. Είναι σημαντικό αυτό το όνομα να είναι μοναδικό, ώστε τα μηνύματα HELICS να μπορούν να δρομολογηθούν σωστά.

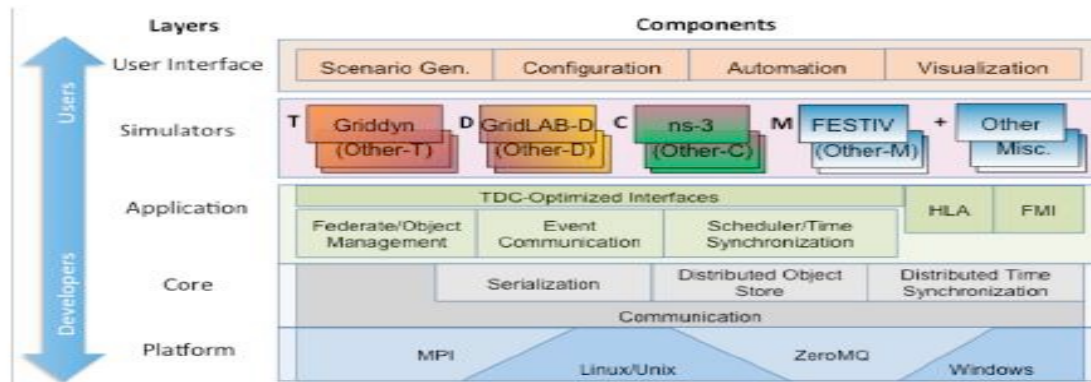
- **Το είδος του πυρήνα**

Ο πυρήνας διαχειρίζεται τη διασύνδεση μεταξύ της ομοσπονδίας και της ομοσπονδίας. Υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες ανταλλαγής μηνυμάτων που υποστηρίζονται από τη HELICS. Όλες οι ομοσπονδίες στην ίδια ομοσπονδία πρέπει να έχουν τον ίδιο βασικό τύπο.

6.5.3 Ανάλυση του HELICS.

Το HELICS ακολουθεί μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική και αποτελείται από πέντε βαθμίδες. Η πρώτη και η κατώτερη βαθμίδα στην ιεραρχία είναι η βαθμίδα της πλατφόρμας (Platform layer) και είναι υπεύθυνη για η λειτουργία του HELICS σε πολλά λειτουργικά συστήματα μέσω της βιβλιοθηκών ZeroMQ για την πλατφόρμα των Linux και της βιβλιοθήκης MPI για την πλατφόρμα των Windows. Το δεύτερο επίπεδο είναι το επίπεδο του πυρήνα (Core Layer), όπου σε αυτό βρίσκονται οι κατάλληλες συναρτήσεις που ορίζουν δυο βασικούς μηχανισμούς του Helics οι οποίοι είναι: η ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των προσομοιωτών καθώς και ο χρόνος διαχείρισης του συγχρονισμού των προσομοιωτών. Η τρίτη βαθμίδα ονομάζεται επίπεδο εφαρμογής (Application Layer) στο οποίο βρίσκονται όλες οι κατάλληλες μέθοδοι για την ομαλότερη διεξαγωγή της συν-προσομοίωσης. Στη προτελευταία βαθμίδα η οποία είναι η βαθμίδα των προσομοιωτών (Simulators Layer) ομαδοποιούνται όλες εκείνες οι βιβλιοθήκες στις γλώσσες

προγραμματισμού ώστε να είναι συμβατές με του διάφορους προσομοιωτές που συνεργάζεται το HELICS. Και τέλος στο πέμπτο και τελευταίο επίπεδο το οποίο είναι το επίπεδο της διεπαφής του χρήστη κατατάσσονται οι εντολές εκείνες που πληκτρολογεί ο χρήστης ώστε να χρησιμοποιήσει το HELICS.



Εικόνα 10: Η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική του HELICS.[11]

6.6 Netanim

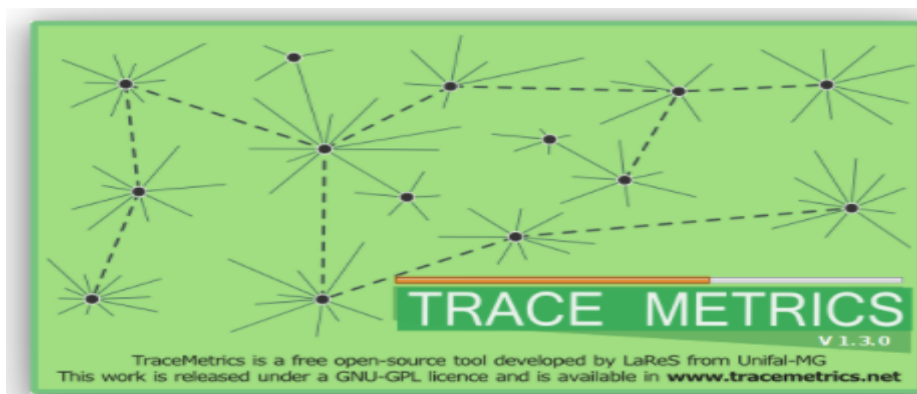
Το Netanim αποτελεί ένα εργαλείο του προσομοιωτή ns-3 το οποίο παρέχει παραθυρικό περιβάλλον γραμμένο σε Qt, που χρησιμοποιεί xml trace αρχεία και βοηθάει στην αναπαράσταση των τοπολογιών, των πακέτων και γενικά την οπτική αναπαράσταση όλων των αντικειμένων του δικτύου.



Εικόνα 11: Το μοντέλο της προσομοίωσης στο πρόγραμμα NetAnim

6.7 Tracemetrics

Το εργαλείο Tracemetrics είναι ένας ελεύθερης χρήσης(open-source) αναλυτής αρχείων ανίχνευσης για τον προσομοιωτή ns-3 ανεπτυγμένος σε γλώσσα προγραμματισμού Java. Ο σκοπός αυτού του εργαλείου είναι να εκτελέσει μια πρακτική ανάλυση του αρχείου ανίχνευσης(trace file) που παράγεται από μια προσομοίωση και, ως εκ τούτου, η εξαγωγή μετρήσεων για την απόδοση του προσομοιωμένου σεναρίου.[12]

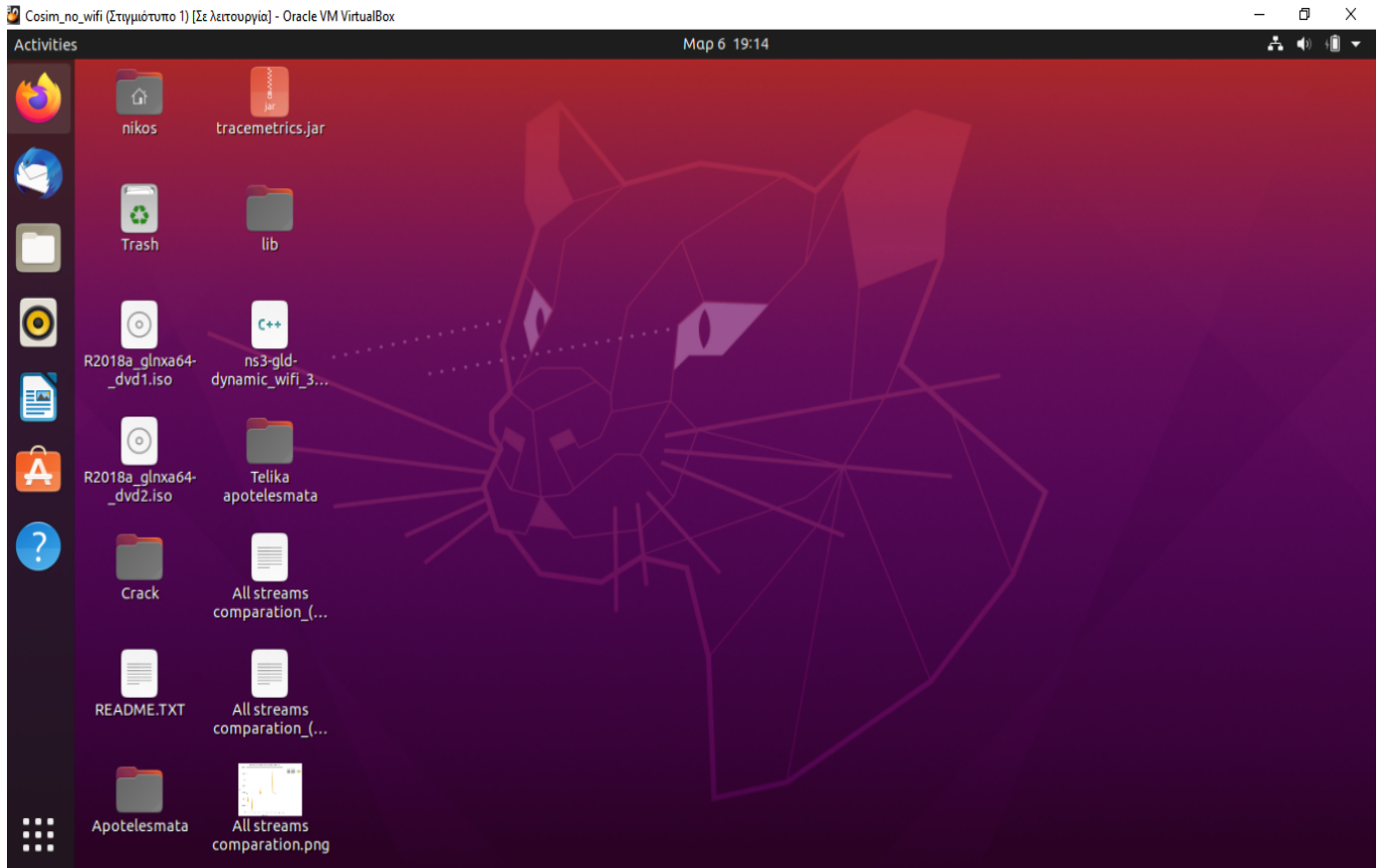


Εικόνα 12: Αρχικό παράθυρο TraceMetrics [12]

Κεφάλαιο 7^ο Ανάπτυξη και περιγραφή της προσομοίωσης του μοντέλου διεσπαρμένης παραγωγής

7.1 Εγκατάσταση του περιβάλλοντος συν-προσομοίωσης

Στην παρούσα παράγραφο θα αναλυθεί εκτενώς ο τρόπος υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά για την κατασκευή της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερης χρήσης λογισμικό , Linux και συγκεκριμένα η έκδοση Ubuntu-16.04 LTS. Το λογισμικό εγκαταστάθηκε σε μια εικονική μηχανή μέσω του προγράμματος Virtual Box το οποίο παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας εικονικού μηχανήματος (Virtual Machine).



Εικόνα 13: Εγκατάσταση Linux

7.1.1 Εγκατάσταση της βιβλιοθήκης ZeroMQ

Αρχικά πραγματοποιείται η εγκατάσταση της πρώτης βασικής βιβλιοθήκης του επιπέδου του πυρήνα του HELICS η οποία ονομάζεται ZeroMQ. Οι εντολές εγκατάστασης είναι οι ακόλουθες:

```
# create the folders needed
```

```
mkdir -p $HOME/software
```

```
mkdir -p $HOME/repositories
```

```
# navigate to the repositories folder
```

```
cd $HOME/repositories
```

```
# get the latest ZMQ version
```

```
wget https://github.com/zeromq/libzmq/releases/download/v4.2.5/zeromq-4.2.5.tar.gz
```

```
tar -zxvf zeromq-4.2.5.tar.gz
```

```
rm zeromq-4.2.5.tar.gz
```

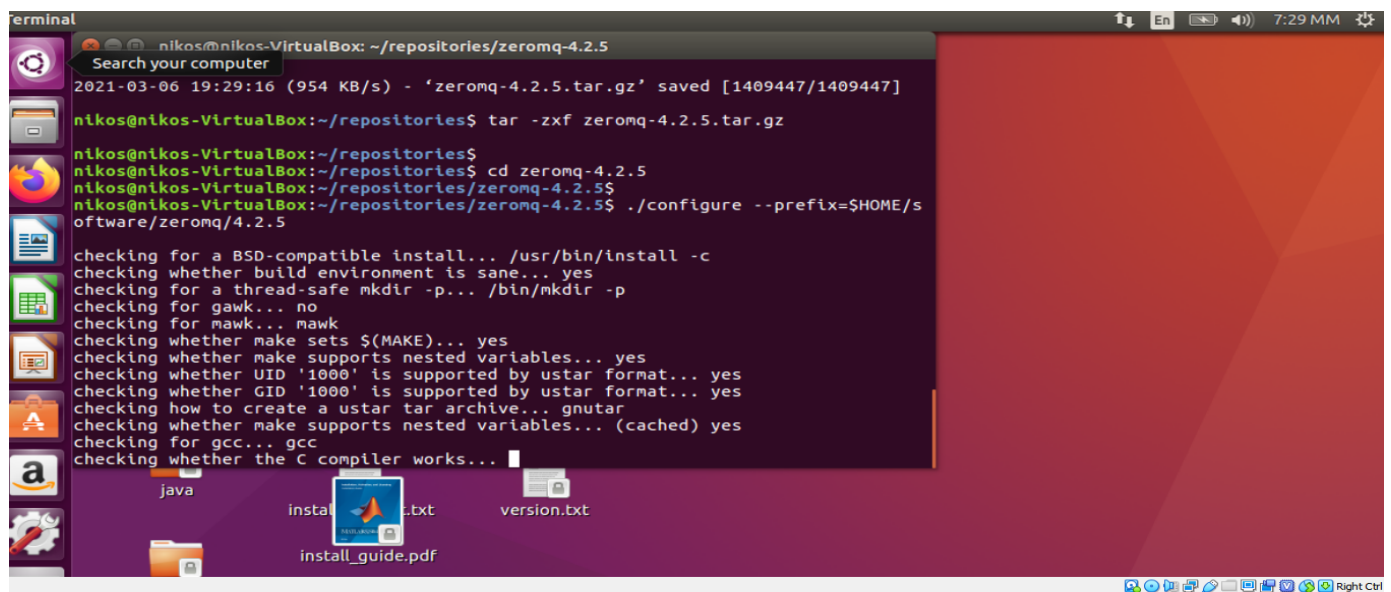
```
cd zeromq-4.2.5
```

```
# build ZMQ
```

```
./configure --prefix=$HOME/software/zeromq/4.2.5
```

```
make
```

```
make install
```



Εικόνα 14: Επιτυχής εγκατάσταση της βιβλιοθήκης ZeroMQ

7.1.2 Εγκατάσταση βιβλιοθήκης Boost

Στην συνέχεια θα πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση της πιο σημαντικής βιβλιοθήκη του HELICS που ονομάζεται boost. Οι εντολές είναι οι ακόλουθες:

```
# navigate to the repositories folder
```

```
cd $HOME/repositories
```

```
# get Boost version 1.6.1
```

```
# download from here: https://sourceforge.net/projects/boost/files/boost/1.61.0/
```

```
tar -zxvf boost_1_61.tar.gz
```

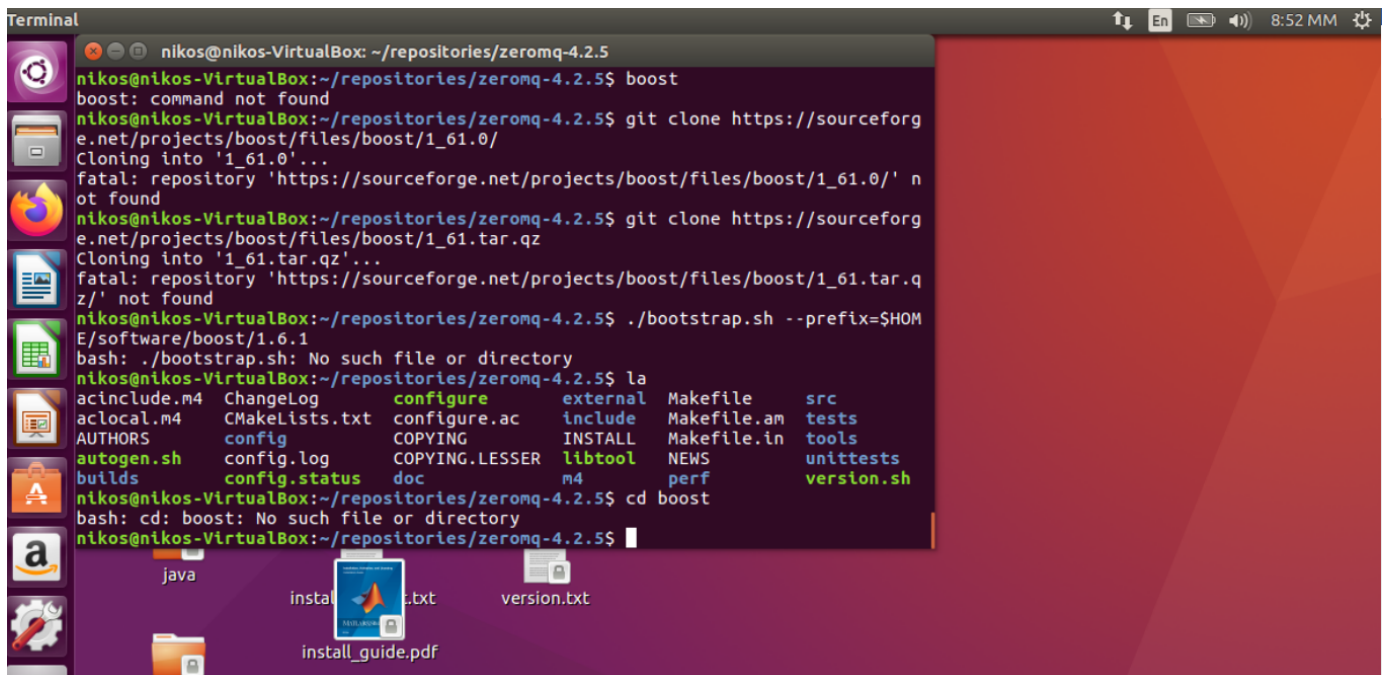
```
rm boost_1_61.tar.gz
```

```
cd boost_1_61
```

```
# build boost
```

```
./bootstrap.sh --prefix=$HOME/software/boost/1.6.1
```

```
./bjam cxxflags='-fPIC' cflags='-fPIC' -a link=dynamic,static install
```



```
nikos@nikos-VirtualBox: ~/repositories/zeromq-4.2.5
nikos@nikos-VirtualBox:~/repositories/zeromq-4.2.5$ boost
boost: command not found
nikos@nikos-VirtualBox:~/repositories/zeromq-4.2.5$ git clone https://sourceforge
e.net/projects/boost/files/boost/1_61.0/
Cloning into '1_61.0'...
fatal: repository 'https://sourceforge.net/projects/boost/files/boost/1_61.0/' n
ot found
nikos@nikos-VirtualBox:~/repositories/zeromq-4.2.5$ git clone https://sourceforg
e.net/projects/boost/files/boost/1_61.tar.qz
Cloning into '1_61.tar.qz'...
fatal: repository 'https://sourceforge.net/projects/boost/files/boost/1_61.tar.q
z/' not found
nikos@nikos-VirtualBox:~/repositories/zeromq-4.2.5$ ./bootstrap.sh --prefix=$HOM
E/software/boost/1.6.1
bash: ./bootstrap.sh: No such file or directory
nikos@nikos-VirtualBox:~/repositories/zeromq-4.2.5$ la
acinclude.m4  ChangeLog          configure      external      Makefile      src
aclocal.m4    CMakeLists.txt  configure.ac  include      Makefile.am  tests
AUTHORS       config          COPYING       INSTALL      Makefile.in  tools
autogen.sh    config.log      COPYING.LESSER libtool       NEWS          unittests
builds        config.status   doc           m4           perf          version.sh
nikos@nikos-VirtualBox:~/repositories/zeromq-4.2.5$ cd boost
bash: cd: boost: No such file or directory
nikos@nikos-VirtualBox:~/repositories/zeromq-4.2.5$
```

Εικόνα 15:Επιτυχής εγκατάσταση της βιβλιοθήκης Boost

7.1.3 Εγκατάσταση του βασικού προσομοιωτή HELICS

navigate to the repositories folder

```
cd $HOME/repositories
```

clone the HELICS repository

```
git clone https://github.com/GMLC-TDC/HELICS-src.git -b HELICS_2_0
```

```
git checkout tags/v2.0.0-beta.1
```

build helics

```
mkdir build
```

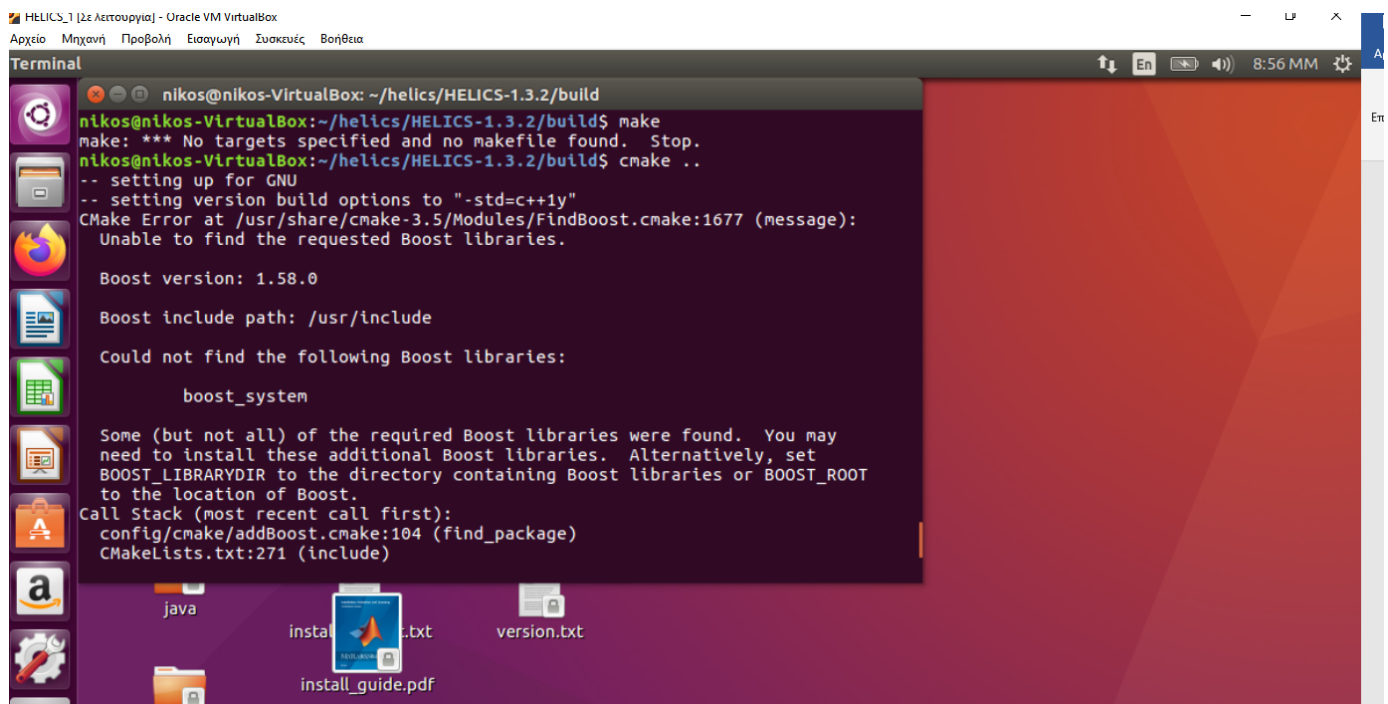
```
cd build
```

```
cmake.-/DCMAKE_INSTALL_PREFIX=$HOME/software/helics/2.0.0-beta.1
```

```
DZeroMQ_ROOT_DIR=$HOME/software/zeromq/4.2.5 -DBOOST_ROOT=$HOME/software/boost/1.6.1
```

```
make
```

make install



Εικόνα 16:Επιτυχής εγκατάσταση Helics

7.1.4 Εγκατάσταση του προσομοιωτή GridLAB-D

Έπειτα θα πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση του προγράμματος GridLAB-D. Οι εντολές είναι:

```
cd $HOME/repositories
```

```
# GridLAB-D is already cloned so move to that folder
```

```
cd gridlab-d
```

```
# build GridLAB-D
```

```
autoreconf -ifs
```

```
./configure --prefix=$HOME/software/gridlabd/develop --with-xerces=$HOME/software/xerces/3.2.0 --with-helics=\"$HOME/software/zeromq/4.2.5 $HOME/software/boost/1.6.1 $HOME/software/helics/2.0.0-beta.1\" --enable-silent-rules 'CFLAGS=-w -O3 -fno-inline-functions' 'CXXFLAGS=-w -O3 -fno-inline-functions -std=c++14' 'LDFLAGS=-w -O3'
```

```
make
```

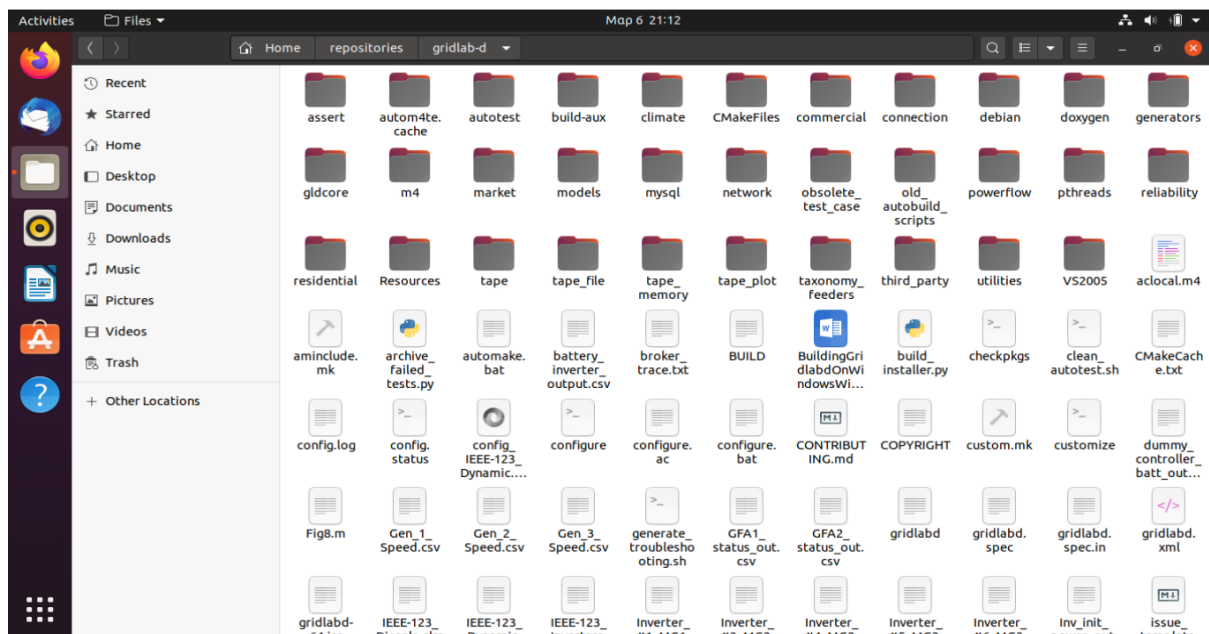
make install

add helics to the path environment

```
echo "export PATH=PATH:$HOME/software/gridlabd/develop/bin" >> /etc/profile.d/userAddedPaths.sh  
echo "export
```

```
GLPATH=$HOME/software/gridlabd/develop/lib/gridlabd:$HOME/software/gridlabd/develop/share/grid  
labd" >> /etc/profile.d/userAddedPaths.sh
```

```
echo "export  
LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:$HOME/software/zeromq/4.2.5/lib:$HOME/software/boost/  
1.6.1/lib" >> /etc/profile.d/userAddedPaths.sh
```



Εικόνα 17:Επιτυχής εγκατάσταση Gridlab-d

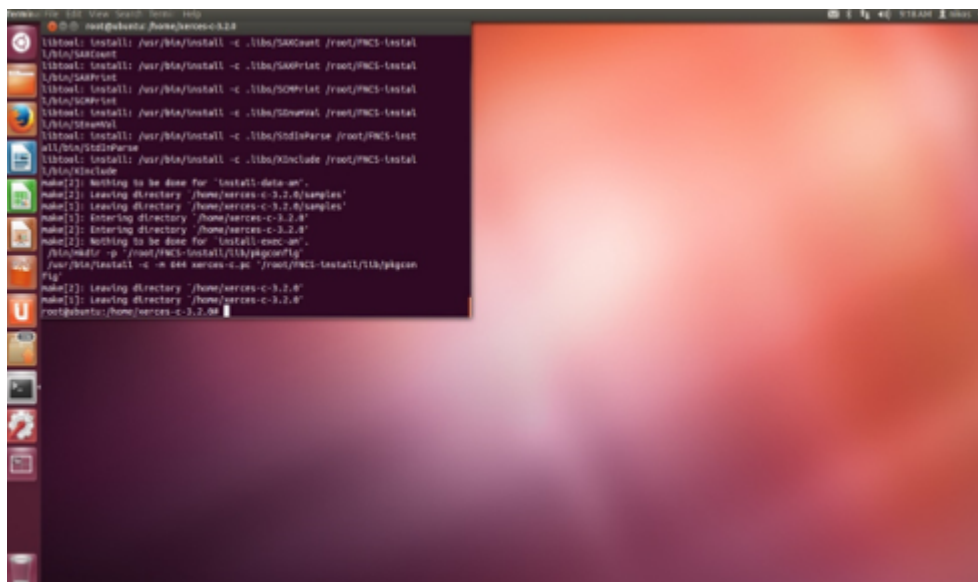
7.1.5 Εγκατάσταση του προγράμματος Xerces-C++

Το επόμενο στοιχείο που εγκαταστάθηκε είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης XML αρχείων υλοποιημένος σε γλώσσα C++ που ονομάζεται Xerces-C++. Το Xerces-C ++ παρέχει τη δυνατότητα ανάγνωσης και εγγραφής δεδομένων XML. Οι εντολές εγκατάστασης είναι οι ακόλουθες:

navigate to the repositories folder

```
cd $HOME/repositories
```

```
# get the correct version of Xerces by cloning the GridLAB-D repository
git clone https://github.com/gridlab-d/gridlab-d.git
cd gridlab-d/third_party
tar -zxvf xerces-c-3.2.0.tar.gz
cd xerces-c-3.2.0
# build Xerces
./configure --prefix=$HOME/software/xerces/3.2.0
make
make install
```



Εικόνα 18:Επιτυχής εγκατάσταση του Xerces-c

7.1.6 Εγκατάσταση του NS-3

Το τελευταίο στοιχείο της εγκατάστασης των απαραίτητων προσομοιωτών είναι η εγκατάσταση του προσομοιωτή για τηλεπικοινωνιακό επίπεδο, ο NS-3. Η έκδοση του NS-3 που χρησιμοποιήθηκε είναι η NS-3.25 η οποία περιέχει τις κατάλληλες βιβλιοθήκες ώστε να υποστηρίξει την συνένωση με το προσομοιωτή HELICS. Οι κατάλληλες εντολές είναι :

```
# get the correct version of NS-3
git clone https://gitlab.com/nsnam/ns-3-dev.git
cd ns-3-dev/
git clone https://github.com/GMLC-TDC/helics-ns3 contrib/helics
```

./waf configure --with-helics=/usr/local --disable-werror --enable-examples --enable-tests

build NS-3

./waf build

```
BRITE Integration : not enabled (BRITE not enabled (see option --with-h-brite))
DES Metrics event collection : not enabled (defaults to disabled)
DPDK NetDevice : not enabled (libdpdk not found, $RTE_SDK and/or $RTE_TARGET environment variable not set or incorrect)
Emulation FdNetDevice : enabled
Examples : enabled
File descriptor NetDevice : enabled
GNU Scientific Library (GSL) : not enabled (GSL not found)
Gcrypt library : not enabled (libgcrypt not found: you can use libgcrypt-config to find its location.)
GtkConfigStore : not enabled (library 'gtk+-3.0 >= 3.0' not found)
HELICS Integration : enabled
HELICS Integration : enabled
MPI Support : not enabled (option --enable-mpi not selected)
NS-3 Click Integration : not enabled (nsclick not enabled (see option --with-nsclick))
NS-3 OpenFlow Integration : not enabled (OpenFlow not enabled (see option --with-openflow))
Netmap emulation FdNetDevice : not enabled (needs net/netmap_user.h)
Network Simulation Cradle : not enabled (NSC not found (see option --with-nsc))
PlanetLab FdNetDevice : not enabled (PlanetLab operating system not detected)
```

```
nikos@nikos-VirtualBox: ~/ns-3-dev
'build' finished successfully (52m17.482s)

Modules built:
antenna          aodv          applications
bridge          buildings    config-store
core            csma         csma-layout
fd-net-device   dsr          energy
helics (no Pyth
internet        internet-apps lr-wpan
lte            mesh         mobility
netanim        network     nix-vector-rout
olsr           point-to-point point-to-point-
layout
propagation     sixlowpan   spectrum
stats          tap-bridge  test (no Python
)
topology-read   traffic-control uan
virtual-net-device wave        wifi
wimax

Modules not built (see ns-3 tutorial for explanation):
brite          click        dpdk-net-device
```

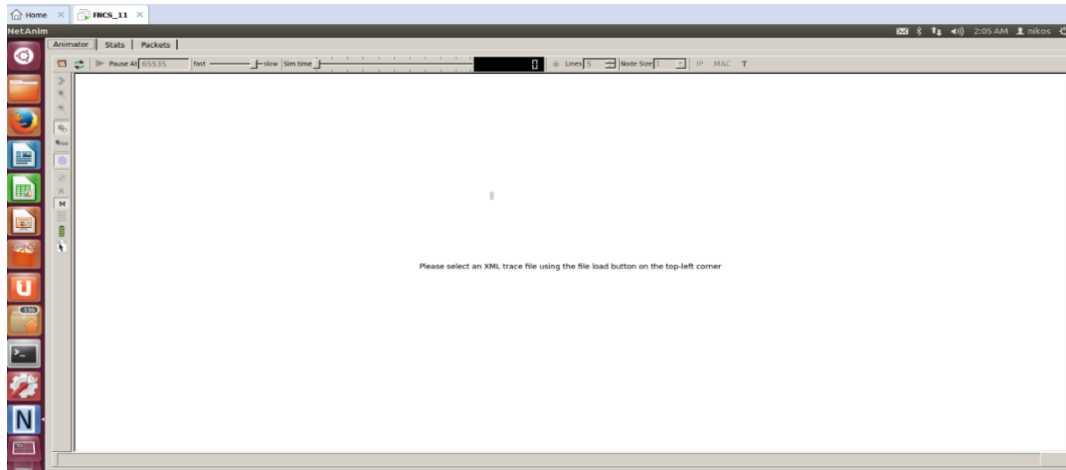
Εικόνα 19: Επιτυχής εγκατάσταση του NS-3

7.1.7 Εγκατάσταση του προγράμματος NetAnim

Στη παρούσα έκδοση του ns-3 δηλαδή δεν υπήρχε το εργαλείο NetAnim οπότε πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση του ακολουθώντας τις παρακάτω εντολές:

```
# we are entering in our Ns-3 directory
cd ns-3.24
#install necessary tools for NetAnim
apt-get install mercurial
apt-get install qt4-dev-tools
# download Netanim tool
hg clone -r 002086a646c6 http://code.nsnam.org/netanim
# change to NetAnim directory
cd netanim
```

```
# make NetAnim
qmake NetAnim.pro
# install NetAnim
Make
```



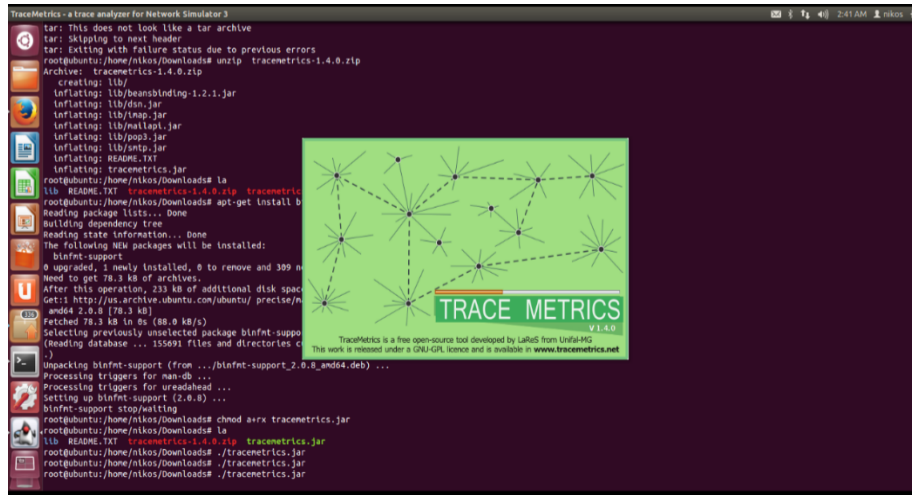
Εικόνα 20: Αρχικό παράθυρο του NetAnim

7.1.8 Εγκατάσταση του εργαλείου TraceMetrics

Το τελευταίο εργαλείο προς εγκατάσταση είναι το εργαλείο TraceMetrics για την ανάλυση των αρχείων trace. Οι εντολές εγκατάστασης του εργαλείου είναι οι είναι οι ακόλουθες:

```
# we should download java JDK on Ubuntu
sudo apt-get install openjdk-7-jdk
# download Tracemetrics-1.4.0
git clone http://sourceforge.net/projects/tracemetrics/
# unzip the zip file of Tracemetrics
Unzip tracemtrics-1.4.0.zip
#make the jar file of Tracemetrics executable
apt-get install binfmt-support
chmod a+rx tracemetrics.jar
```

```
# run TraceMetrics jar file  
./tracemetrics.jar
```



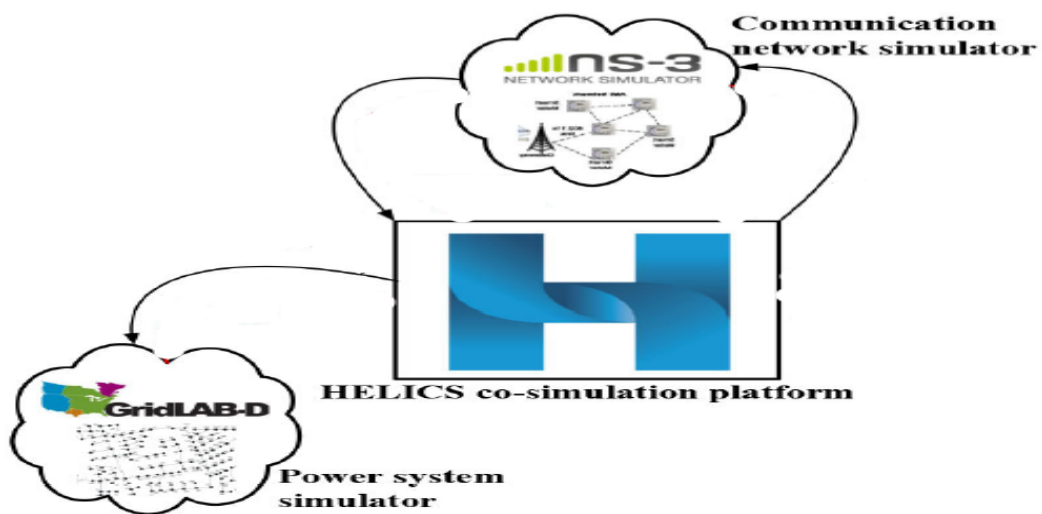
Εικόνα 21: Αρχικό παράθυρο του Tracemetrics

7.2 Υλοποίηση σεναρίου προσομοίωσης

Στην παρούσα παράγραφο θα ασχοληθούμε με το σχεδιασμό και την διαδικασία υλοποίησης του σεναρίου προσομοίωσης. Οι βασικές συνιστώσες της υλοποίησης του σεναρίου είναι το GridLAB-D, το NS-3 και το HELICS, τα οποία αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Για να διερευνήσουμε τον τρόπο με τον οποίο ο σχεδιασμός των υβριδικών συστημάτων επικοινωνίας επηρεάζει την απόδοση των μονάδων της διεσπαρμένης παραγωγής, ακολουθήθηκε η διαδικασία της συν-προσομοίωση του δικτύου διανομής και του συστήματος επικοινωνίας.

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε αποτελείται από το φυσικό δίκτυο ισχύος το οποίο απαρτίζεται από 5 σετ φωτοβολταϊκών μονάδων και φωτοβολταϊκών μετατροπέων καθώς και από τρεις γεννήτριες diesel.



7.2.1 Ανάπτυξη σεναρίου μέσω του GridLAB-D

Με το GridLAB – D πραγματοποιούμε το ενεργειακό σενάριο προσομοίωσης. Το ενεργειακό σενάριο στηρίζεται πάνω στην διεσπαρμένη παραγωγή και ειδικότερα στην χρήση ΑΠΕ στην ανάπτυξη του Έξυπνου Ενεργειακού Δικτύου. Συγκεκριμένα η ανάπτυξη του κώδικα διαμέσου του GridLAB-D περιλαμβάνει την ανάπτυξη και υλοποίηση Φωτοβολταϊκών Πάρκων σε συνδυασμό με Συμβατική Ενεργειακή παραγωγή που βασίζεται σε τετράχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Ειδικότερα το συγκεκριμένο σενάριο εστιάζει την ομαλή εισαγωγή των ΑΠΕ στην ενεργειακή παραγωγή με απώτερο σκοπό την χρήση πράσινων πηγών ενέργειας προς τους καταναλωτές. Για το παρών σενάριο αρχικά σχεδιάστηκαν οι συμβατικές μονάδες παραγωγής και εν συνεχεία σχεδιάστηκαν οι μονάδες ΑΠΕ. Στον σχεδιασμό και την υλοποίηση πραγματοποιείται παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικό τρόπο και παράλληλα υλοποιείται παραλληλισμός των μονάδων ΑΠΕ με την συμβατική παραγωγή. Οι μονάδες ΑΠΕ ακολουθούν τον κανόνα του παραλληλισμού αναφορικά με την ενεργειακή εισαγωγή στο δίκτυο. Συγκεκριμένα οι μονάδες ΑΠΕ έχουν διαφορά φάσης κατά 120° μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι η έγχυση του τριφασικού ρεύματος γίνεται συμφασικά με την συμβατική παραγωγή. Ως εκ τούτου αυτό σημαίνει ότι το παραγόμενο ρεύμα δεν χρειάζεται να περάσει διαμέσου των τριφασικών γεννητριών και μπορεί να διοχετευτεί άμεσα προς τους καταναλωτές την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται.

7.2.2 Ανάπτυξη σεναρίου μέσω Ns-3

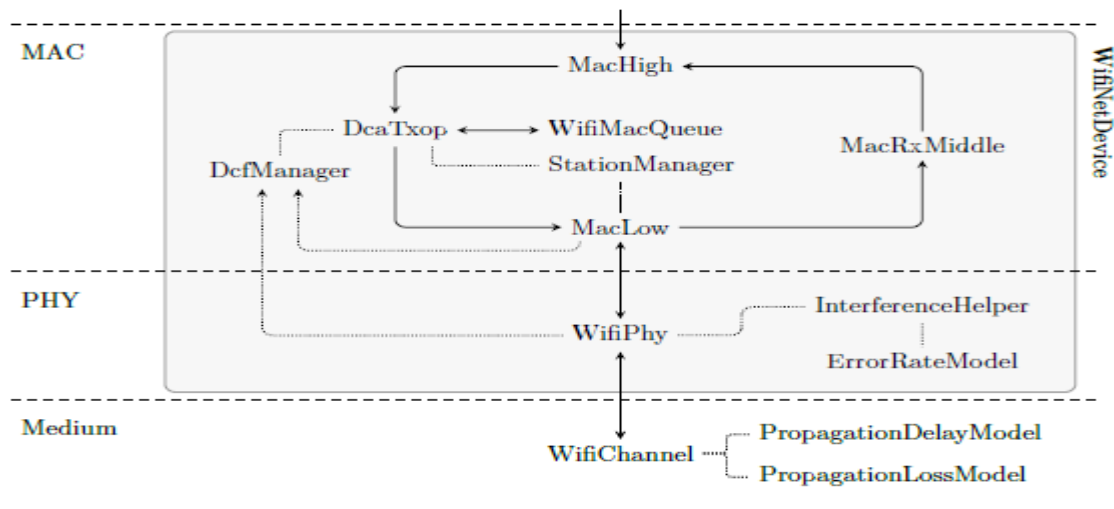
Στη δεύτερη φάση της δημιουργίας του σεναρίου της προσομοίωσης καθορίζεται η τηλεπικοινωνιακή υποδομή του μοντέλου μέσω του προσομοιωτή Ns-3. Η έκδοση η οποία χρησιμοποιούμε είναι η Ns-3.26. Πιο συγκεκριμένα αναπτύχθηκε ένα υβριδικό μοντέλο επικοινωνίας για το μοντέλο μας.

Μέσω του Ns-3 δημιουργήθηκαν τρεις τηλεπικοινωνιακές δομές για την σχεδίαση του σεναρίου. Αρχικά η πρώτη τηλεπικοινωνιακή υποδομή που δημιουργήθηκε είναι αυτή του προτύπου IEEE 802.11 (Wifi). Το πρότυπο IEEE 802.11 όπως ειπώθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι μέρος της οικογένειας προτύπων IEEE 802, που ασχολείται με τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα. Τα πρότυπα 802 ορίζουν υπηρεσίες και πρωτόκολλα για τα δύο κατώτερα επίπεδα της πυραμίδας του OSI τα οποία είναι το επίπεδο ζεύξης δεδομένων και το φυσικό επίπεδο.

Αρχικά θα δημιουργήσουμε τους κόμβους που χρειαζόμαστε οι οποίοι είναι 11 σε αριθμό. Ουσιαστικά θα δημιουργήσουμε 8 κόμβους αρχικά στο Ns-3 οι οποίοι θα απεικονίζουν τους κόμβους της διεσπαρμένης παραγωγής δηλαδή οι 5 πέντε κόμβοι θα αντιστοιχούν στα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι υπόλοιποι 3 θα αντιστοιχούν στις γεννήτριες συμβατικής παραγωγής diesel. Αυτοί οι 8 κόμβοι θα επικοινωνούν μέσω του προτύπου Wifi με ένα ενδιάμεσο σημείο πρόσβασης (Access point) το οποίο θα είναι υπεύθυνο για την διαλογή και διαχείριση των μηνυμάτων. Τα δεδομένα τα οποία μεταδίδονται σε κάθε σενάριο περιέχουν στοιχεία που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας της κάθε συσκευής δηλαδή τάση και ρεύμα. Το πρότυπο του συστήματος Wifi το οποίο χρησιμοποιήσαμε για την δημιουργία του μοντέλου είναι το 802.11a το οποίο λειτουργεί στα 5Ghz με μέγιστο θεωρητικό ρυθμό μετάδοσης τα 50Mbps.[14]

Στον προσομοιωτή Ns-3 η κλάση η οποία είναι υπεύθυνη για την εισαγωγή και τη διαχείριση του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 ονομάζεται WifiNetDevice και είναι μια από τις πιο πολύπλοκες κλάσεις του Ns-3.

Η δημιουργία της συγκεκριμένης κλάσης βασίστηκε σε μια κλάση του προσομοιωτή που θεωρείται προκάτοχος του Ns-3 ο οποίος ονομάζεται Ns-2. Στην συγκεκριμένη κλάση βρίσκονται όλες εκείνες οι κατάλληλες μέθοδοι περιγραφής και μοντέλου PHY/MAC για το πρότυπο 802.11. και γενικότερα που συντονίζουν τη μετάδοση και τη λήψη πακέτων. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η αρχιτεκτονική του προτύπου 802.11 στο προσομοιωτή NS-3.



Εικόνα 22: Αρχιτεκτονική του 802.11 στο Ns-3. [14]

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η διαδρομή ενός πακέτου το οποίο μεταδίδεται στο σενάριο της προσομοίωσης μέσω του Ns-3. Συγκεκριμένα όταν ένα νέο πακέτο δεδομένων εισέρχεται από τα ανώτερα επίπεδα μέσω της γενικής διεπαφής του WifiNetDevice. Το πακέτο χαρακτηρίζεται με μια τυπική LLC SNAP επικεφαλίδα και αποστέλλεται στην υποκλάση MacHigh (το πραγματικό της όνομα είναι WifiMac).

Η αφηρημένη κλάση MacHigh (στην πραγματικότητα ονομάζεται WifiMac) είναι υπεύθυνη για λειτουργίες διαχείρισης υψηλού επιπέδου MAC όπως η έρευνα (probing) και συσχέτιση (association) με ένα σημείο πρόσβασης (Access point). Στις μέχρι τώρα εκδόσεις του προσομοιωτή έχουν δημιουργηθεί τρεις υποκλάσεις της κλάσης WifiMac, που είναι υπεύθυνες για probing και association και περιέχουν διαφορετικές δυνατότητες διαχείρισης, αυτές είναι οι AdhocWifi-Mac, NqstaWifiMac και NqapWifiMac

Όλες οι παράμετροι μετάδοσης, όπως ο ρυθμός δεδομένων ωφέλιμου φορτίου, η ανταλλαγή RTS / CTS, η σύντομη και μακρά αναμετάδοση συντονίζονται από την υποκλάση StationManager του WifiNetDevice και καθορίζονται σύμφωνα με διαφορετικούς αλγόριθμους ρυθμού ελέγχου. [14]

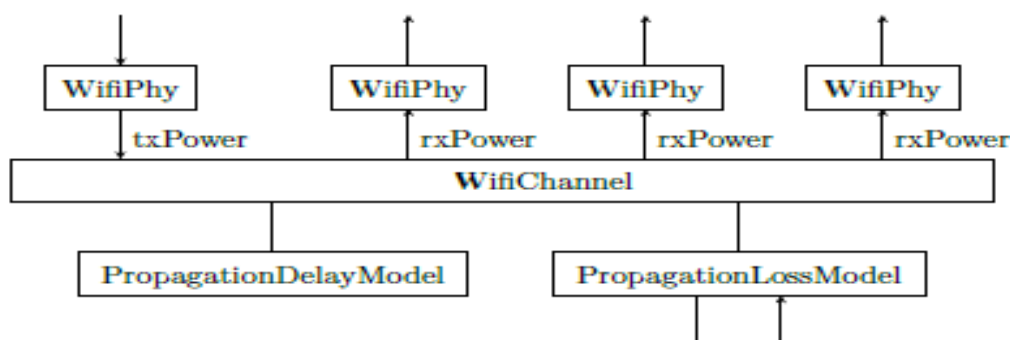
Επίσης από το παραπάνω σχήμα διακρίνεται η υποκλάση WifiPhy η οποία διαμορφώνει τον ασύρματο πομποδέκτη. Στο Ns-3.26 υπάρχει μια υλοποίηση της κλάσης WifiPhy μέσω της συνάρτησης YansWifiPhy η οποία δημιουργεί ένα μοντέλο όπου υπάρχει λευκός προσθετικός θόρυβος στο κανάλι επικοινωνίας.

Η μετάδοση σήματος διαμορφώνεται με την αποστολή ενός πακέτου μέσω του WifiChannel στο Ns-3. Το WifiChannel καθυστερεί το εισερχόμενο πακέτο σύμφωνα με ένα μοντέλο καθυστέρησης διάδοσης το

οποίο στο Ns-3 βασίζεται στην μέθοδο της κλάσης WifiChannel που ονομάζεται PropagationDelayMode και η ισχύς λήψης διαμορφώνεται από ένα μοντέλο απωλειών διάδοσης το οποίο βασίζεται στην μέθοδο που ονομάζεται PropagationLossModel.

Ένα σοβαρό ζήτημα στην ανάπτυξη του τηλεπικοινωνιακού μοντέλου στον Ns-3 αποτελεί η μετάδοση του σήματος. Σε γενικό βαθμό στις προσομοιώσεις ενός ασύρματου δικτύου ίσως το πιο σύνθετο υποπρόβλημα είναι εκείνο της ομαλής προσομοίωσης της διάδοσης του σήματος. Το βασικό πρόβλημα είναι πως ένας δέκτης καταλαβαίνει το σήμα που μεταδίδεται από έναν πομπό. Η διάδοση του σήματος (signal propagation) καθορίζει την χρονική στιγμή και με ποια ισχύ λήψης ένα σήμα φτάνει σε έναν δέκτη. Ωστόσο, η επιλογή ενός κατάλληλου μοντέλου διάδοσης είναι δύσκολη λόγω των πολλών παραγόντων που επηρεάζουν διάδοση σήματος. Επιπλέον, οι ιδιότητες του μοντέλου έχουν καθοριστική επίδραση στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης και μπορεί να σημαίνει τη διαφορά μεταξύ επιτυχίας και αποτυχίας.

Τα μοντέλα διάδοσης στο Ns-3 υπολογίζεται στην κλάση WifiChannel, Τα πακέτα προωθούνται στο WifiChannel από συνδεδεμένα αντικείμενα της κλάσης WifiPhy όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 23: Το μοντέλο της διάδοσης μέσω του WifiChannel.[14]

Η υποκλάση η οποία είναι υπεύθυνη για την είσοδο των μοντέλων της διάδοσης είναι η κλάση YanswifiPhy. Στο Ns-3 εμπεριέχονται δύο μοντέλα καθυστέρησης διάδοσης τα οποία ονομάζονται, RandomPropagationDelayModel και ConstantSpeedPropagationDelayModel. Στο πρώτο μοντέλο η καθυστέρηση διάδοσης είναι εντελώς τυχαία και αλλάζει κάθε φορά που καλείται το μοντέλο. Σε αυτό το μοντέλο όλα τα πακέτα, ακόμη και αυτά που αποστέλλονται μεταξύ δύο σταθερών κόμβων ακολουθούν μια τυχαία καθυστέρηση κατά συνέπεια, η σειρά των μεταδιδόμενων πακέτων διατηρείται.

Στο δεύτερο μοντέλο το σήμα κινείται με σταθερά ταχύτητα, ίση με την ταχύτητα του φωτός. Η καθυστέρηση υπολογίζεται σύμφωνα με τις θέσεις του πομπού και δέκτη. Χρησιμοποιείται η ευκλείδεια

απόσταση μεταξύ των κεραιών Tx και Rx. Αυτό το μοντέλο θεωρεί ότι η Γη είναι επίπεδη.

Στην ανάπτυξη του δικού μας μοντέλου επιλέχθηκε η χρήση του δεύτερου μοντέλου καθυστέρησης διάδοσης. Βάζοντας ουσιαστικά τις default τιμές για το μοντέλο καθυστέρησης του σήματος η οποία εμπεριέχει τη χρήση του δεύτερου μοντέλου δηλαδή του ConstantSpeedPropagationDelayModel και η καθυστέρηση λοιπόν βασίζεται στον τύπο $tdelay = \frac{d}{c}$ όπου το d είναι η απόσταση των κόμβων και το c είναι η ταχύτητα του φωτός. Ο κώδικας υλοποίησης σε C++ απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.[14]

```
//set physical channel layer for wifi  
YansWifiChannelHelper channel = YansWifiChannelHelper::Default ();  
YansWifiPhyHelper phy;  
phy.SetChannel (channel.Create ());
```

Εικόνα 24: Κώδικας για το μοντέλο καθυστέρησης διάδοσης.[14]

Στη συνέχεια όσο αναφορά το μοντέλο απωλειών διάδοσης, στην έκδοση του ns-3.26 υπάρχουν διαθέσιμα πέντε μοντέλα τα οποία βασίζονται σε διαφορετικούς μαθηματικούς τύπους για την εύρεση των απωλειών. Τα οποία είναι τα εξής:

- ***Cost231PropagationLossModel***

Αυτό το μοντέλο εκτείνεται στην περιοχή από 1500 MHz έως 2000 MHz. Είναι σχεδιασμένο για προσομοίωση αστικής περιοχής.

- ***FixedRssLossModel***

Καθιερώνει ένα σταθερό επίπεδο ισχύος λήψης ανεξάρτητο της ισχύος μετάδοσης.

- ***FriisPropagationLossModel***

Εφαρμόζει το μοντέλο απώλειας διάδοσης του Friis.

- ***LogDistancePropagationLossModel***

Η ισχύς λήψης υπολογίζεται με τη λογαριθμική μέθοδο του μοντέλου απόστασης.

- ***TwoRayGroundPropagationLossModel***

Εφαρμόζει ένα μοντέλο διάδοσης απώλειας σε οπτική γωνία.

Το μοντέλο απωλειών διάδοσης που χρησιμοποιούμε στην δική μας προσομοίωση είναι το μοντέλο *LogDistancePropagationLossModel* και βασίζεται στο μαθηματικό τύπο

$$L = L_0 + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

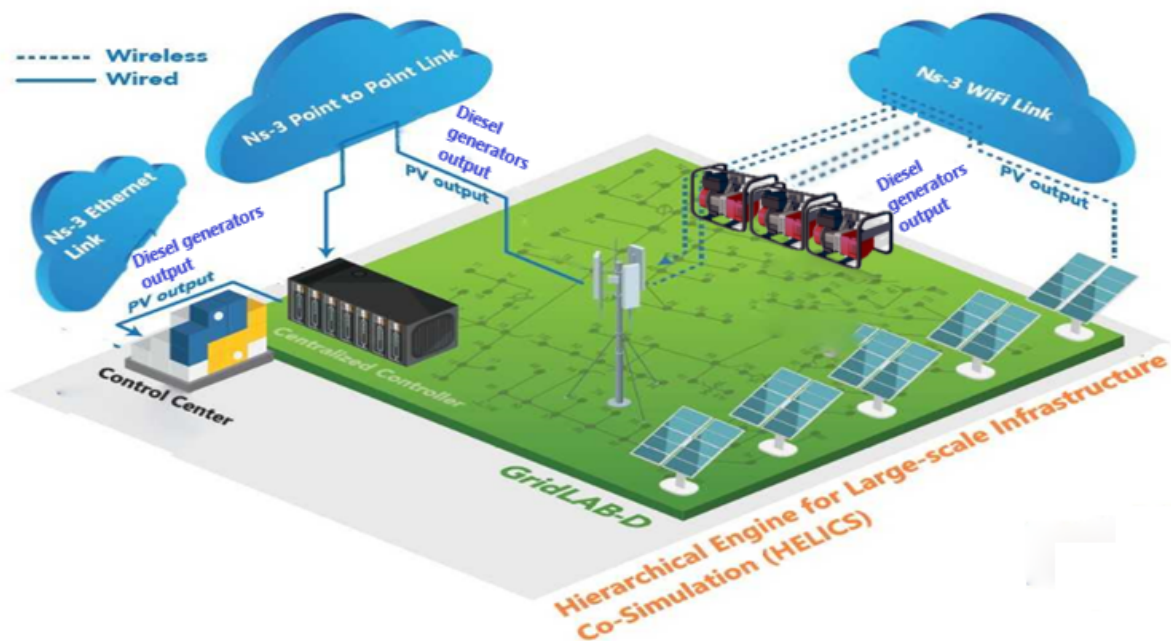
Όπου το n είναι μια μεταβλητή που απεικονίζει την εκθετική απόσταση απώλειας διαδρομής και η τιμή που δίνει ο Ns-3 σε αυτή τη μεταβλητή εξ ορισμού είναι η τιμή 3 και η μεταβλητή d απεικονίζει την απόσταση των κόμβων που επικοινωνούν. [14]

Στη συνέχεια δημιουργήσαμε την δεύτερη τηλεπικοινωνιακή δομή η οποία χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του κόμβου που απεικονίζει σημείου πρόσβασης (Access point) στο Ns-3 με ένα κόμβο που απεικονίζει ένα Data Aggregation Point (DAP). Το συγκεκριμένο κανάλι επικοινωνίας βασίζεται στην κλάση PointToPointChannel του ns-3 και χαρακτηρίζει μια επικοινωνία Point-to-Point η οποία εμπεριέχει επίσης τα χαρακτηριστικά "DataRate" και "Delay" αλλά αντιπροσωπεύει μια πλήρη αμφίδρομη επικοινωνία (Full-Duplex).

Και τέλος η τελευταία τηλεπικοινωνιακή δομή αποτελεί το κανάλι επικοινωνίας CSMA/CA το οποίο στο Ns-3 βασίζεται στην κλάση CsmChannel διαμορφώνει ένα ρυθμό αποστολής δεδομένων και θεσπίζει μια καθυστέρηση στο κανάλι και ουσιαστικά είναι η κλάση που αντικατοπτρίζει το Ethernet. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά προσεγγίζονται μέσω των μεταβλητών "DataRate" και "Delay" αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη δομή χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του κόμβου του DAP στο Ns-3 με ένα κεντρικό τελικό κόμβο που απεικονίζεται ως Data Synchronization Point. Ο ρυθμός μετάδοσης ορίζεται ίσος με 100Mbps προσομοιώνοντας έτσι ένα καλώδιο Ethernet 100BASE-T2. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση της Point-to-Point επικοινωνίας θέτοντας τις ίδιες τιμές στη μεταβλητή Data Rate.

Ο λόγος δημιουργίας και προσομοίωσης των συγκεκριμένων σεναρίων είναι η παραγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα τρία κανάλια επικοινωνίας και η εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά το ρυθμό διακίνησης των δεδομένων για κάθε κόμβο (απόδοση-throughput), το ρυθμό διακίνησης των ωφέλιμων δεδομένων(goodput), την καθυστέρηση στο κανάλι (end-to-end delay) καθώς και τη διακύμανση της καθυστέρησης (jitter).[14]

Η τοπολογία που δημιουργήθηκε στο Ns-3 απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 25: Τοπολογία μοντέλου στο Ns-3. [14]

7.2.3 Επεξήγηση της λειτουργίας του HELICS.

Στο τρίτο στάδιο της εκτέλεσης του σεναρίου προσομοίωσης το λογισμικό HELICS ορίζεται ως υπεύθυνο της διασύνδεσης των δύο προηγούμενων προσομοιωτών καθώς και της ανταλλαγής μηνυμάτων και αποτελεσμάτων μεταξύ τους. Αυτή η διαδικασία υλοποιείται από τις κλάσεις `value federate()`, `message federate()` και `message filter federate()`.

Ουσιαστικά μέσω της χρήσης των τελικών σημείων (end-points) τα οποία είναι διεπαφές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση πακέτων δεδομένων ή μπλόκ μηνυμάτων. Αυτά τα μηνύματα μπορούν αντιπροσωπεύουν πακέτα επικοινωνίας ή συμβάντα. Ένα τελικό σημείο μπορεί να στείλει δεδομένα σε οποιοδήποτε άλλο τελικό σημείο.

Τα βήματα για την έναρξη της συν-προσομοίωσης είναι τρία. Αρχικά πρέπει να ξεκινήσει ο broker του HELICS ώστε δεχθεί την έναρξη των υπόλοιπων δύο προσομοιωτών, η εντολή για να γίνει αυτό είναι η εξής: **`helics_broker --federates 2 --loglevel 9.`**

Στο επόμενο βήμα πρέπει να ξεκινήσει η μεταγλώττιση του κώδικα του Gridlab-d, η εντολή για να γίνει αυτό είναι: **`gridlabd IEEE-123_Dynamic.glm`**

Στο τελευταίο στάδιο πρέπει να ξεκινήσει η εκτέλεση του κώδικα του Ns-3, αυτό γίνεται με την παρακάτω εντολή: **`./waf --run scratch/ns3-gld-dynamic`**

Με τις παραπάνω εντολές το Linux θα ανοίξει ουσιαστικά τρία καινούργια παράθυρα στο καθένα από αυτά θα βρίσκονται η εξέλιξη της προσομοίωσης όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα

```
nikos@nikos-VirtualBox: ~/repos...  
Model profiler results  
=====
```

Class	Time (s)	Time (%)	msec/obj
helics_msg	36.707	97.8%	36707.0
climate	0.378	1.0%	378.0
node	0.356	0.9%	7.7
player	0.026	0.1%	26.0
recorder	0.020	0.1%	1.1
overhead_line	0.020	0.1%	0.2
load	0.010	0.0%	0.1
eventgen	0.001	0.0%	0.2
HelicsSimulator	0.001	0.0%	0.1
underground_line	0.001	0.0%	0.2
diesel_dg	0.001	0.0%	0.3
inverter	0.001	0.0%	0.2
Total	37.522	100.0%	106.3

```
Inner:  
Inner:  
Inner: Granted time helics: +5.5548e+09ns  
Inner: nextTime <= grantedTime: 0  
Request: Requesting time: 5.5548  
Request: Granted time helics: 5.5548  
Request: Granted time ns-3: +5.5548e+09ns  
Outer: m_events->IsEmpty(): 0  
Outer: m_stop: 0  
Outer: Next time ns-3: +5.5548e+09ns  
Outer: Granted time helics:
```

Εικόνα 26: Τελικό περιβάλλον προσομοίωσης

Κεφάλαιο 8^ο Ανάλυση αποτελεσμάτων διεργασιών συν-προσομοίωσης

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η απεικόνιση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης καθώς και η επεξήγηση των αποτελεσμάτων για το σενάριο της προσομοίωσης που υλοποιήσαμε.

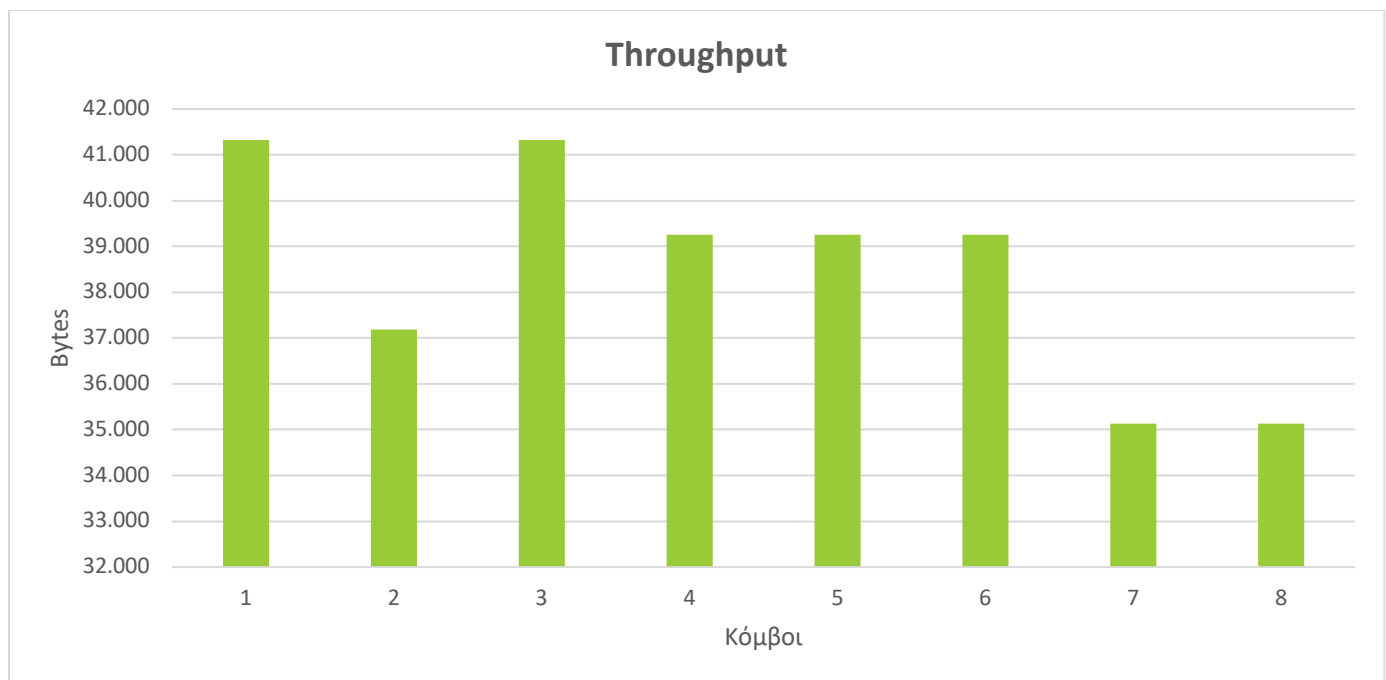


Table 1: Wifi Channel Throughput

Αρχικά στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται ο ρυθμός διακίνησης των δεδομένων (throughput) όσο αναφορά το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας. Παρατηρείται ότι ο κόμβος με το μεγαλύτερο throughput είναι ο πρώτος κόμβος ο οποίος αντιστοιχεί στο σημείο το οποίο είναι τοποθετημένη η πρώτη πηγή ΑΠΕ δηλαδή το πρώτο φωτοβολταϊκό. Στο συγκεκριμένο κόμβο το throughput είναι μεγαλύτερο από τα υπόλοιπα για το συγκεκριμένο κόμβο διότι το συγκεκριμένο σημείο βρίσκεται χωρικά πιο κοντά στο Access point του σεναρίου μας. Τα δεδομένα που στέλνονται στο παραπάνω γράφημα απεικονίζονται σε bits per second και ορίζονται ως το ποσό της παραγωγής ενέργειας του κάθε κόμβου δηλαδή της συμβατικής παραγωγής και τους κόμβους των ΑΠΕ. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια αισθητή μείωση στον αμέσως επόμενο κόμβο το 2, διότι αυτός ο κόμβος βρίσκεται πιο μακριά από το Access Point. Επίσης παρατηρούμε μια μεγάλη μείωση στο throughput των κόμβων 7,8 όπου σε αυτούς τους κόμβους είναι τοποθετημένες οι γεννήτριες συμβατικής παραγωγής.

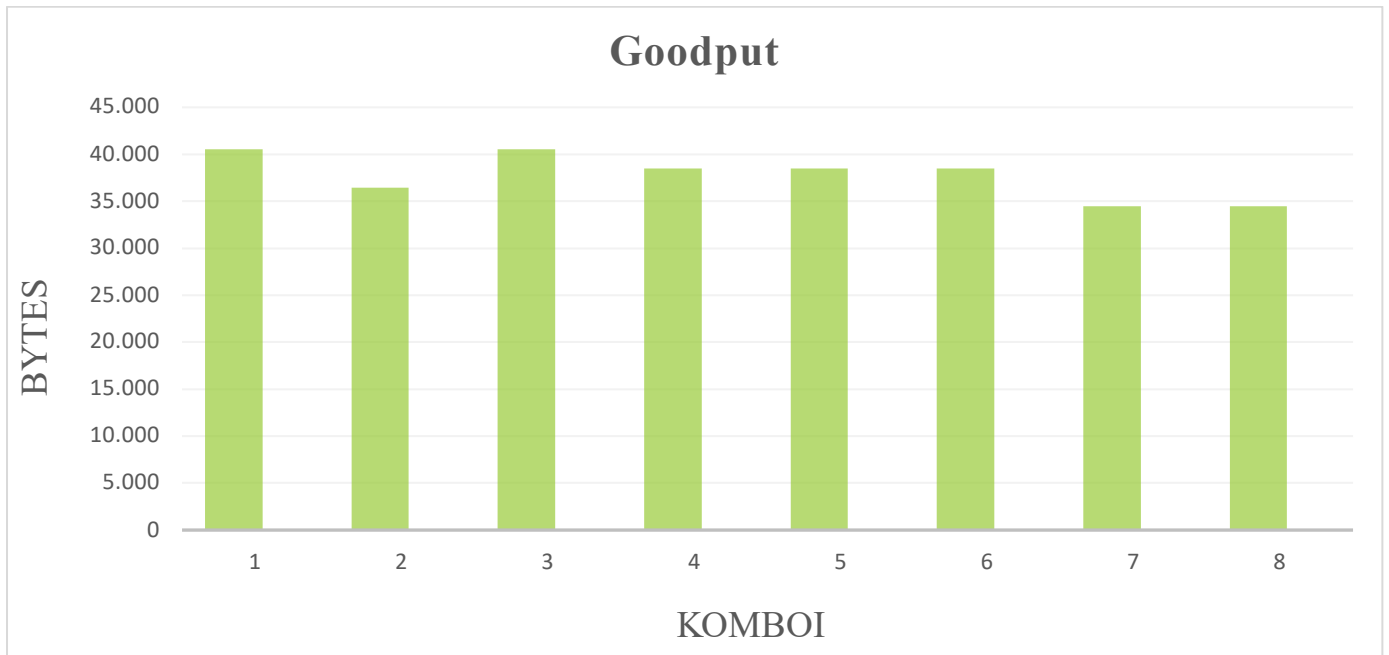


Table 2:Wifi Channel Goodput

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται ο ωφέλιμος ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων (goodput) για το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας. Και εδώ διακρίνεται ότι το μεγαλύτερο goodput το έχει ο πρώτος κόμβος.

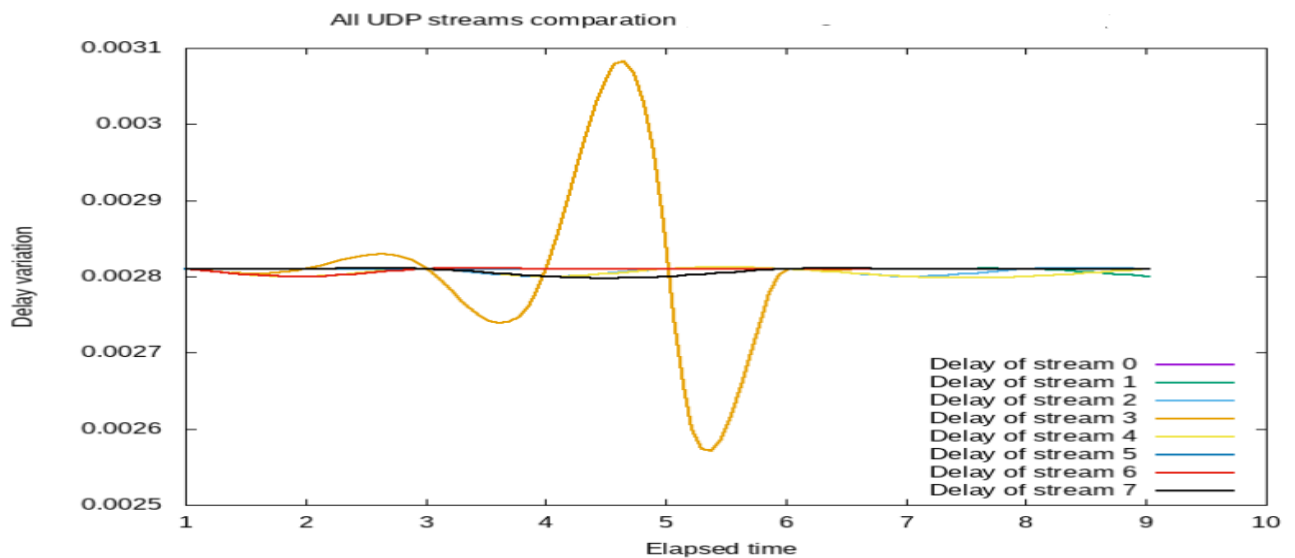


Table 3:Wifi Channel Delay all nodes

Στο τρίτο σχήμα απεικονίζεται σχηματικά η καθυστέρηση (Delay) που προκύπτει στο ασύρματο κανάλι επικοινωνίας. Παρατηρείται ότι για σχεδόν όλους τους κόμβους η τιμή της καθυστέρησης είναι σταθερή και κοντά στην τιμή 0.0028bits/s. Ενώ στο κόμβο 3 ο οποίος εδώ στο παρόν σχήμα είναι ο κόμβος ο οποίος βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από το access point βλέπουμε ότι η τιμή της καθυστέρησης παρουσιάζει μια διακύμανση σε σχέση με το χρόνο της προσομοίωσης.

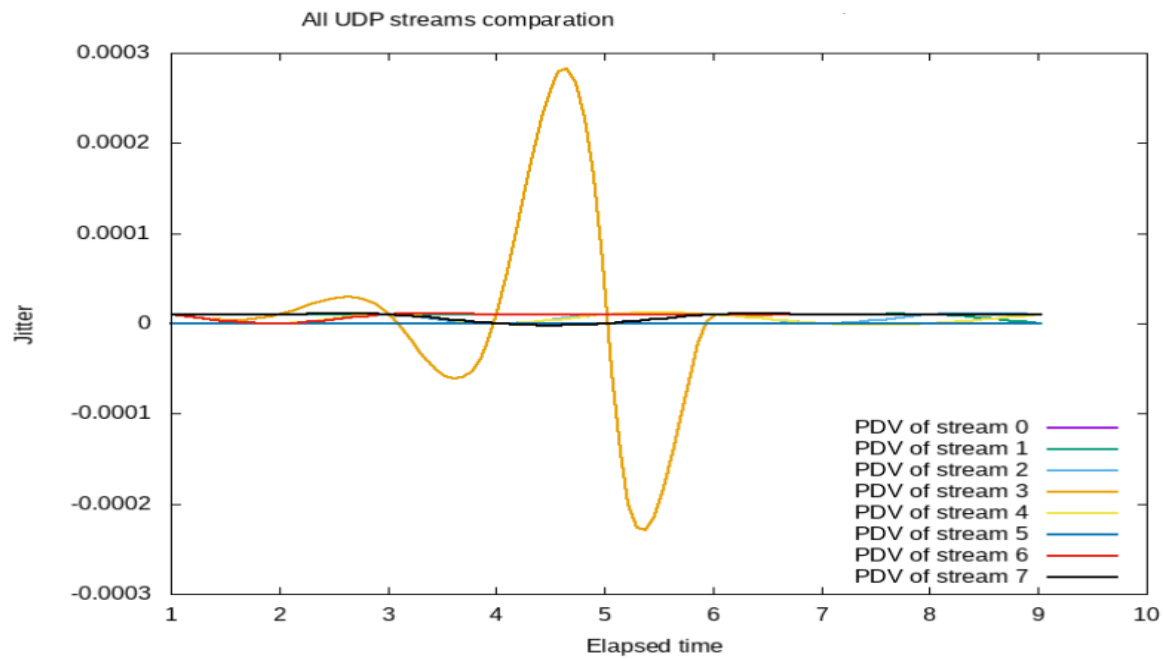


Table 4:Wifi Channel Jitter all nodes

Στο τέταρτο σχήμα απεικονίζεται η μεταβολή της καθυστέρησης (jitter). Ο συγκεκριμένος όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μεταβολή της καθυστέρησης η οποία μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες ενέργειες στη μετάδοση των δεδομένων στο δικό μας σενάριο, τα οποία είναι η παραγωγή ενέργειας της κάθε πηγής. Παρατηρούμε όπως και πριν τη διακύμανση του jitter για το κόμβο 3.

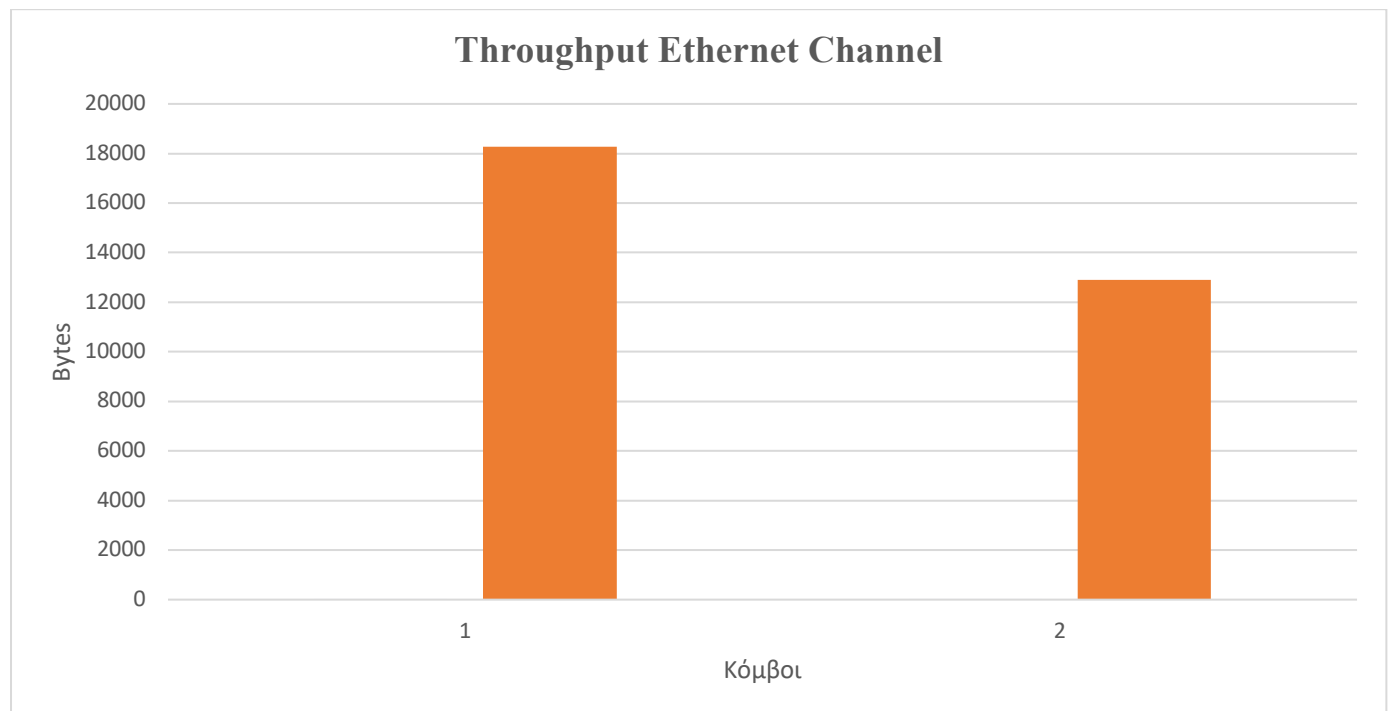


Table 5: Throughput Ethernet Channel

Στο σχήμα πέντε απεικονίζεται το throughput για το τρίτο κομμάτι της τηλεπικοινωνιακής μας. Το οποίο είναι η σύνδεση με το ενδιάμεσο Data Aggregation Point με το τελικό Data Synchronization Point (ουσιαστικά η σύνδεση με έναν ενδιάμεσο controller με τον τελικό controller). Στο συγκεκριμένο κομμάτι έχουμε θεσπίσει το ρυθμό μετάδοσης ίσο με 100Mbps. Ο κόμβος με το μεγαλύτερο throughput είναι ο κόμβος που ορίζεται ως ο ενδιάμεσος controller (επικοινωνεί με το Access Point στο τρίτο κομμάτι του τηλεπικοινωνιακού μας μοντέλου).και για αυτό το λόγο έχει το μεγαλύτερο throughput καθώς συνδέεται με το Access Point και λαμβάνει τα δεδομένα.

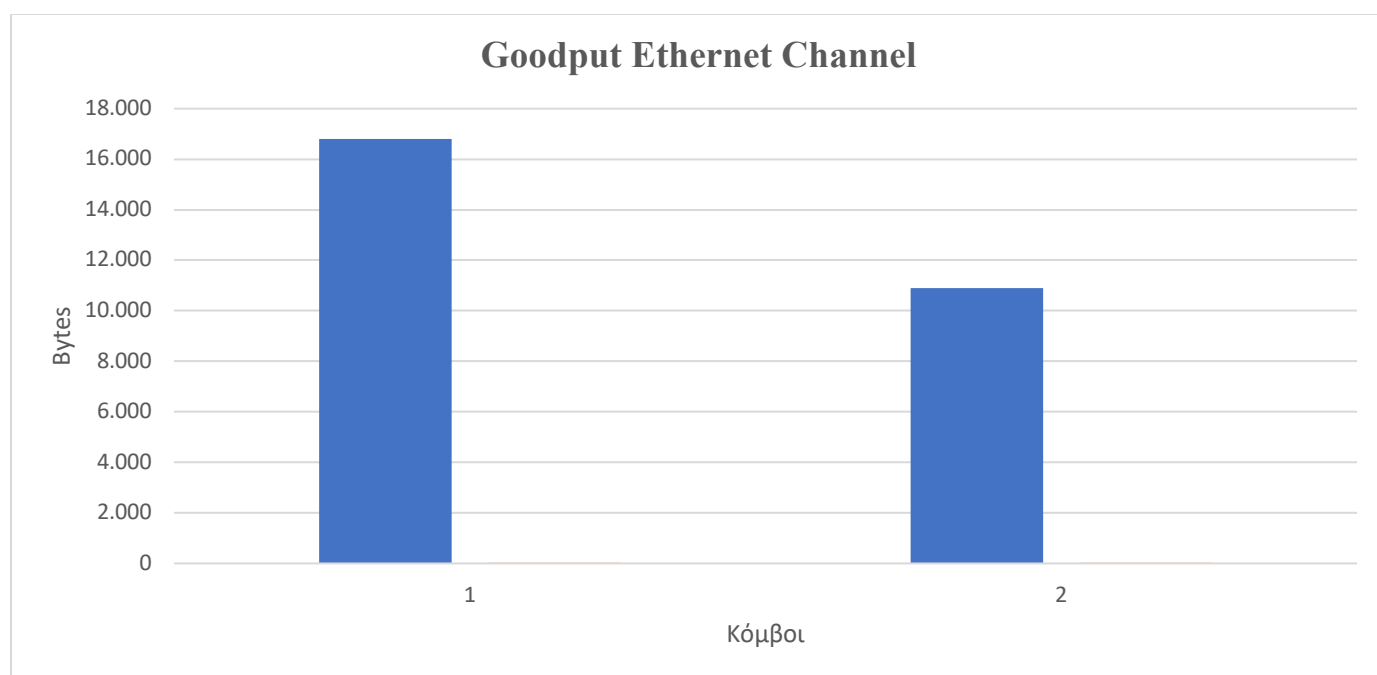


Table 6: Goodput Ethernet Channel

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται το goodput για τους δύο κόμβους. Το οποίο όπως παρατηρούμε έχει την ίδια διακύμανση με το throughput.

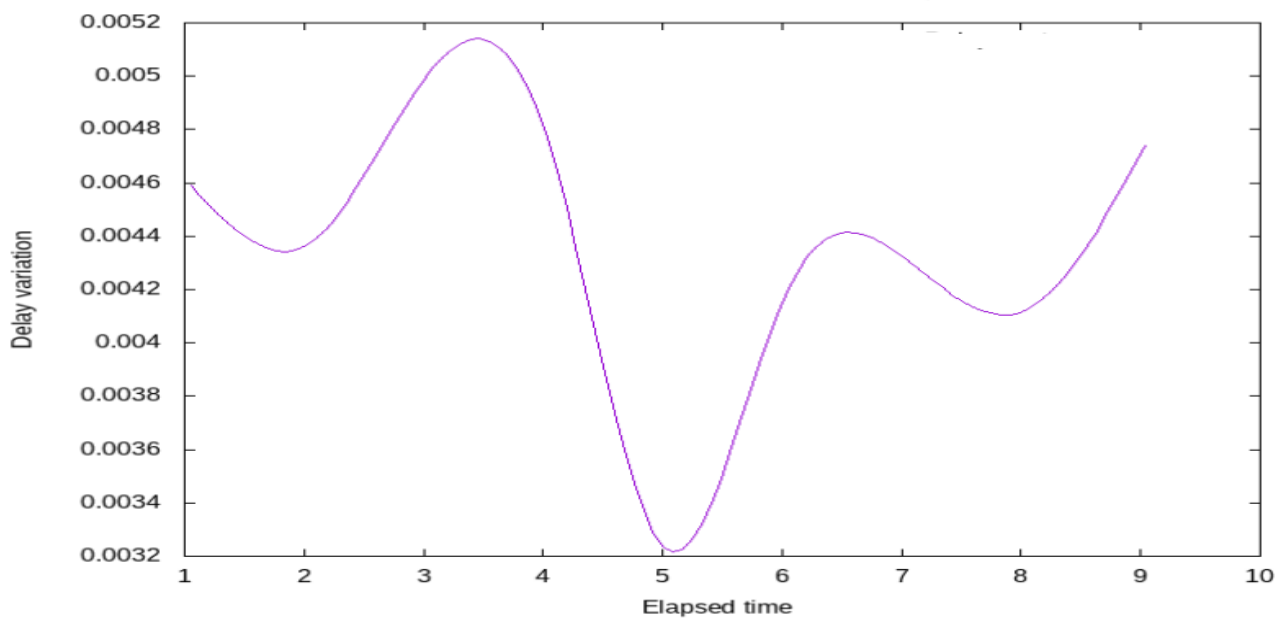


Table 7: Delay Ethernet Channel

Στο έβδομο σχήμα απεικονίζεται το delay το οποίο παρατηρείται στο κανάλι επικοινωνίας του Ethernet. Παρατηρείται μια διακύμανση στο 5s της προσομοίωσης όπου το delay αγγίζει την χαμηλότερη τιμή καθώς και στο 2s της προσομοίωσης το delay αγγίζει την υψηλότερη τιμή.

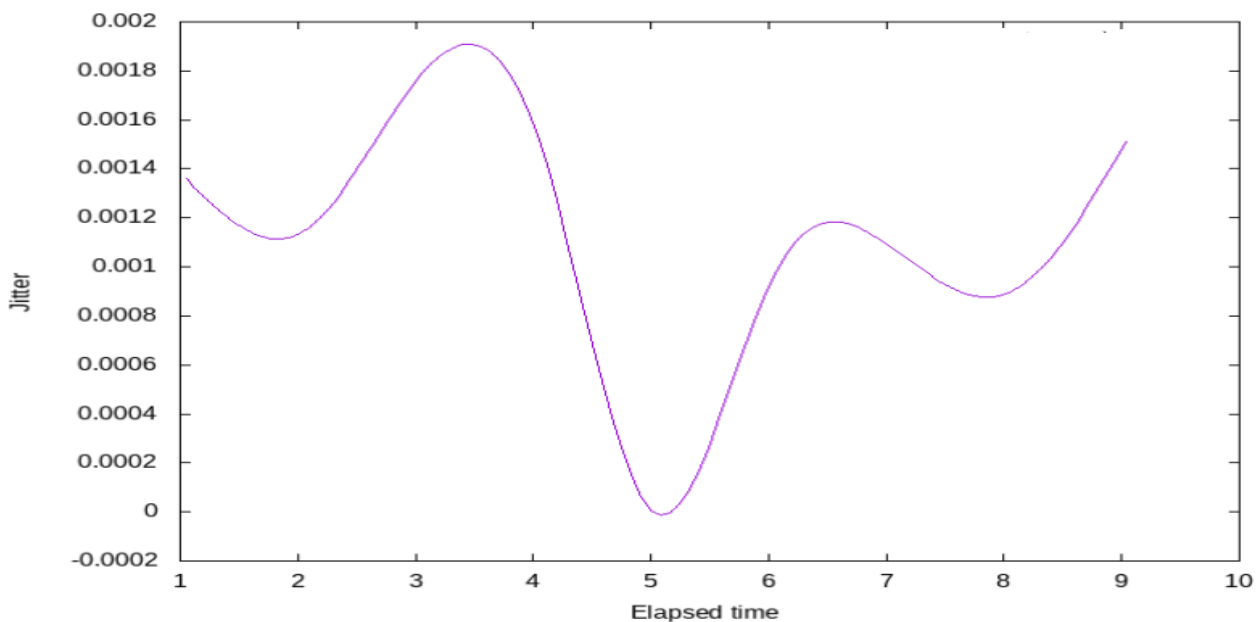


Table 8: Jitter Ethernet Channel

Στο σχήμα οκτώ απεικονίζεται το jitter που έχουμε στο προκύπτει στο κανάλι επικοινωνίας του Ethernet μεταξύ των δύο κόμβων. Παρατηρούμε και εδώ παρόμοια αυξομείωση της καμπύλης με αυτή της καμπύλης του Delay.

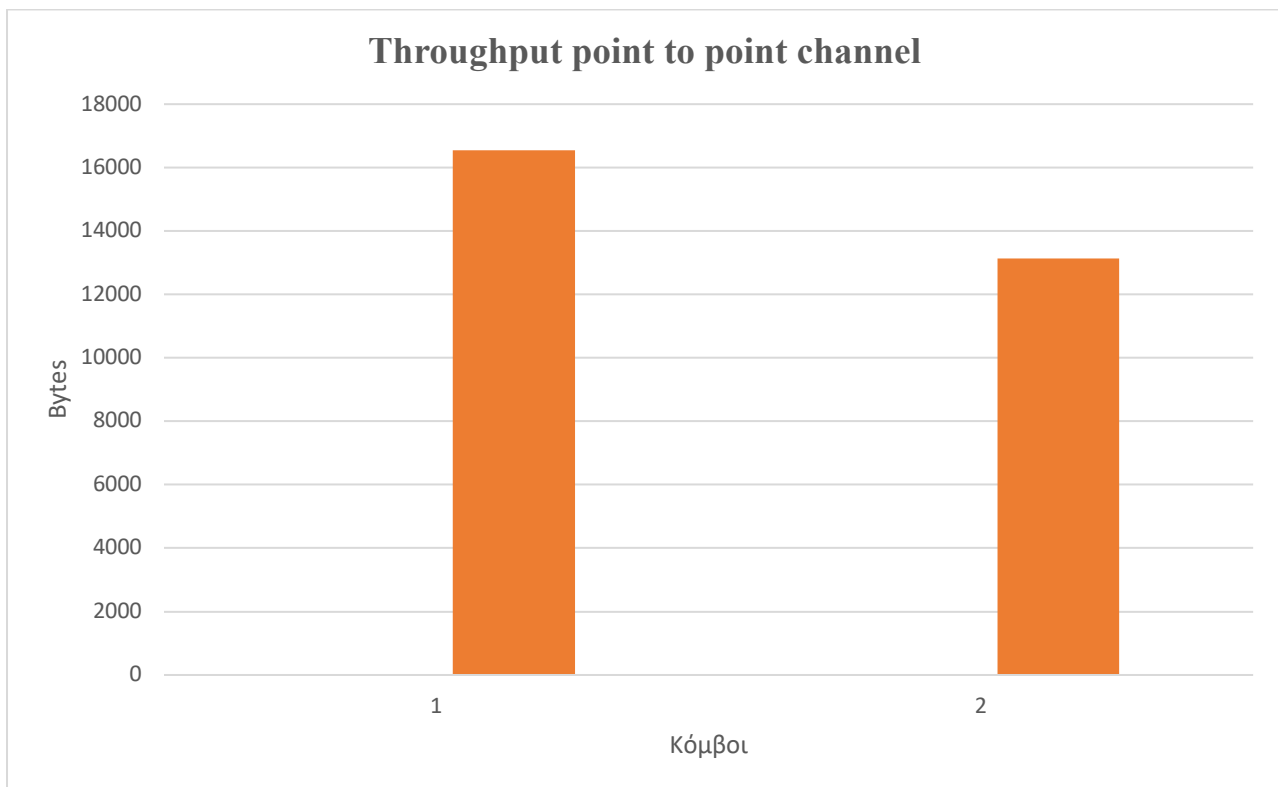


Table 9: Delay Of Point-Point Channel

Στο σχήμα 9 απεικονίζεται το throughput των κόμβων που συνδέονται με Point-to-Point επικοινωνία. Αυτοί οι κόμβοι είναι ο ενδιάμεσος controller (DAP) καθώς και το Access point από το ασύρματο κανάλι. Όπως παρατηρούμε το μεγαλύτερο throughput έχει ο πρώτος κόμβος ο οποίος απεικονίζει το Access Point στην δική μας προσομοίωση.

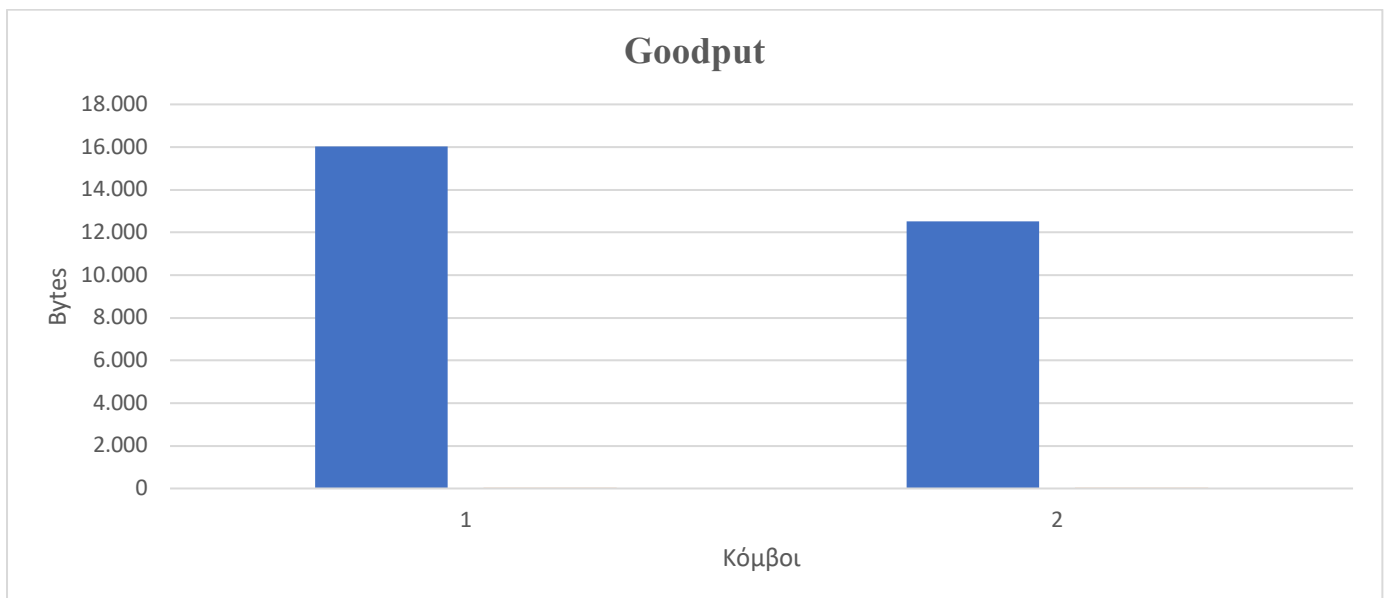


Table 10: Goodput Of Point - Point Channel

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται το goodput για την συγκεκριμένη επικοινωνία. Και σε αυτό το σχήμα παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο goodput έχει ο πρώτος κόμβος ο οποίος είναι το Access Point.

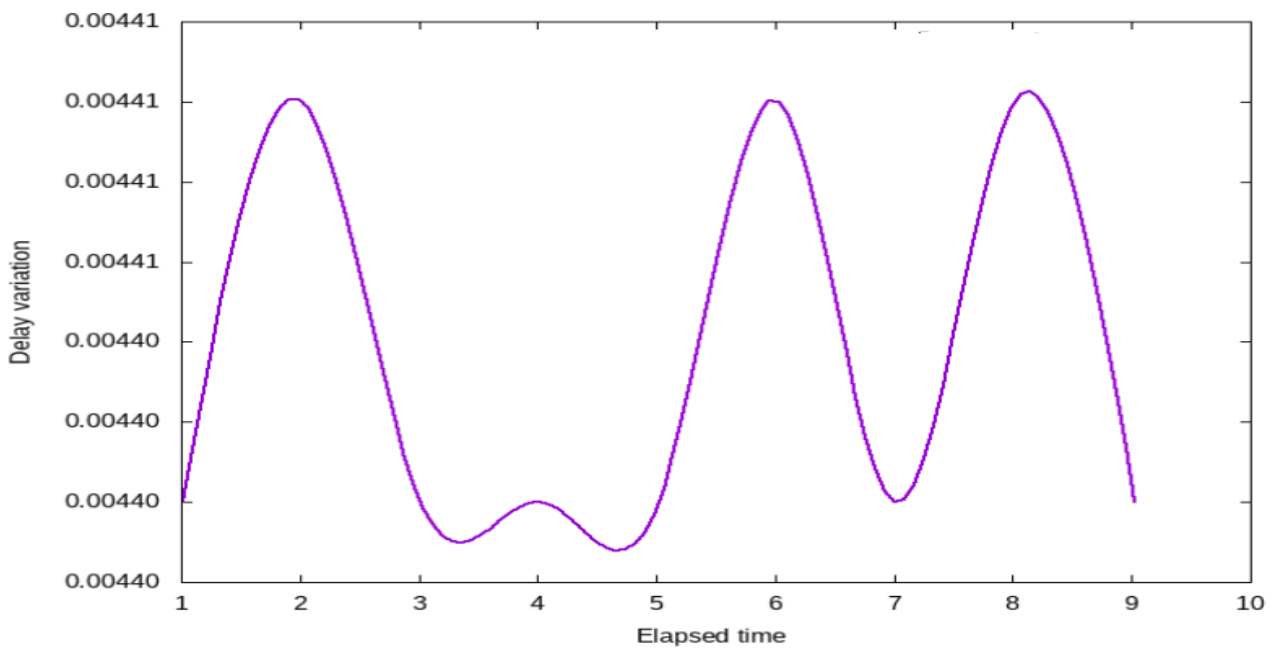


Table 11: Delay Of Point -Point Channel

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται το delay στην επικοινωνία του καναλιού Point-to-Point. Παρατηρείται ότι το delay έχει αρκετά μεγάλη διακύμανση και σε πολλές στιγμές αυξάνεται και μειώνεται.

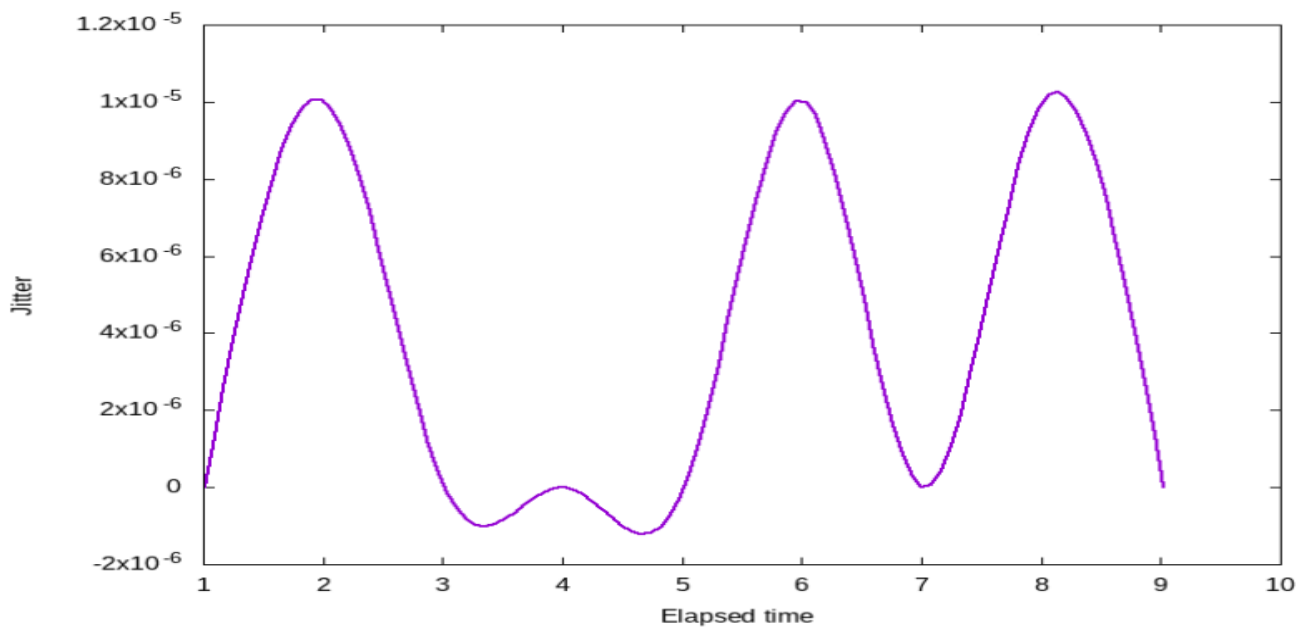


Table 12: Jitter Of Point-Point Channel

Στο σχήμα 12 απεικονίζεται το jitter για το κανάλι επικοινωνίας Point-to-Point, στο οποίο παρατηρείται και εδώ μια μεγάλη διακύμανση.

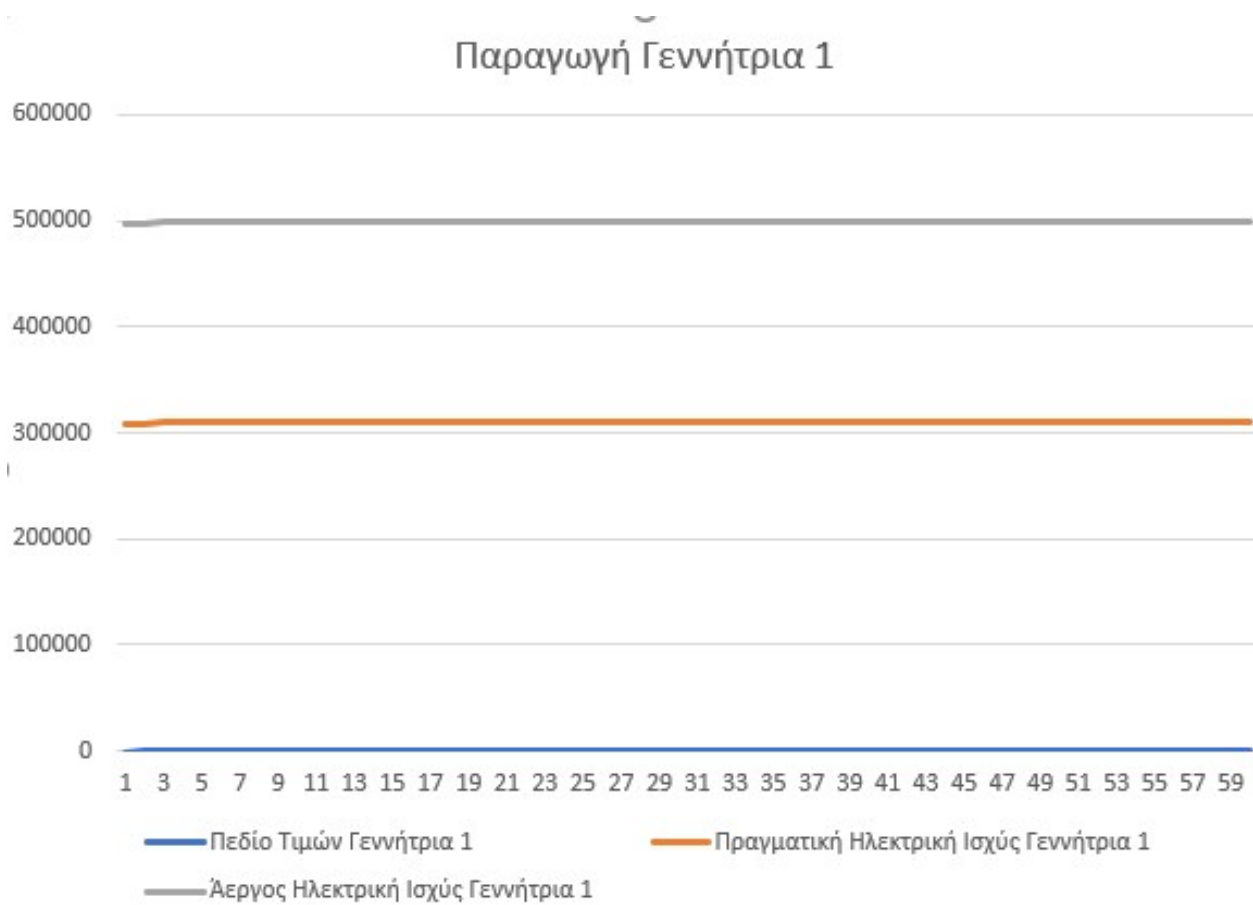


Table 13: Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 1

Παραγωγή Γεννήτρια 2

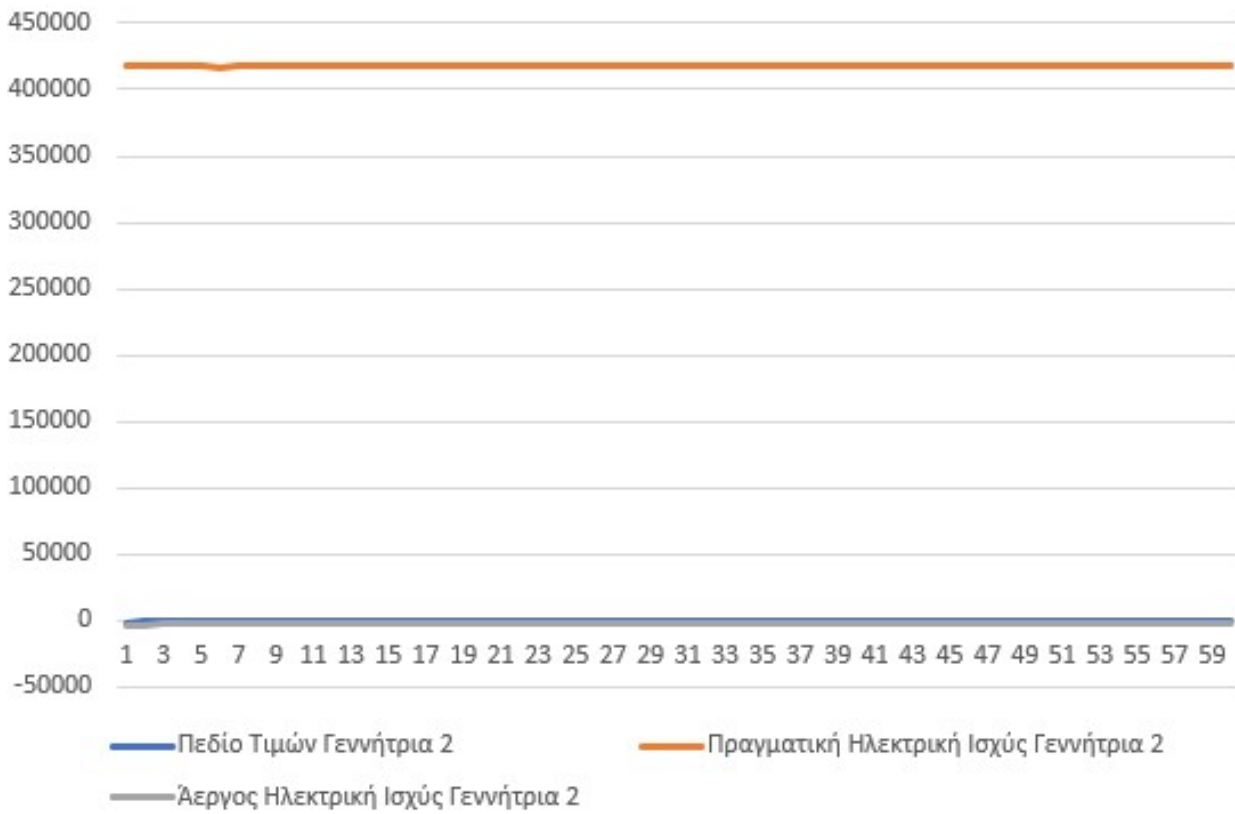


Table 14: Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 2

Παραγωγή Γεννήτρια 3

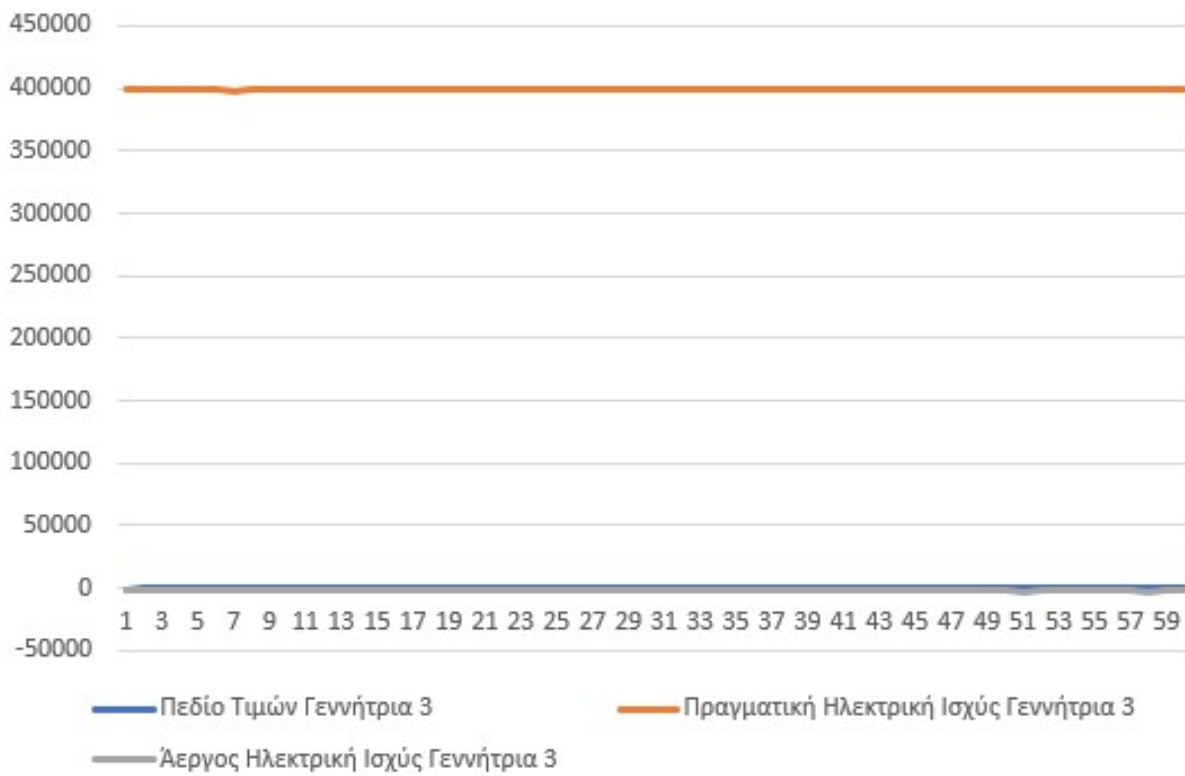


Table 15: Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 3

Γεννήτρια 1 και ΑΠΕ

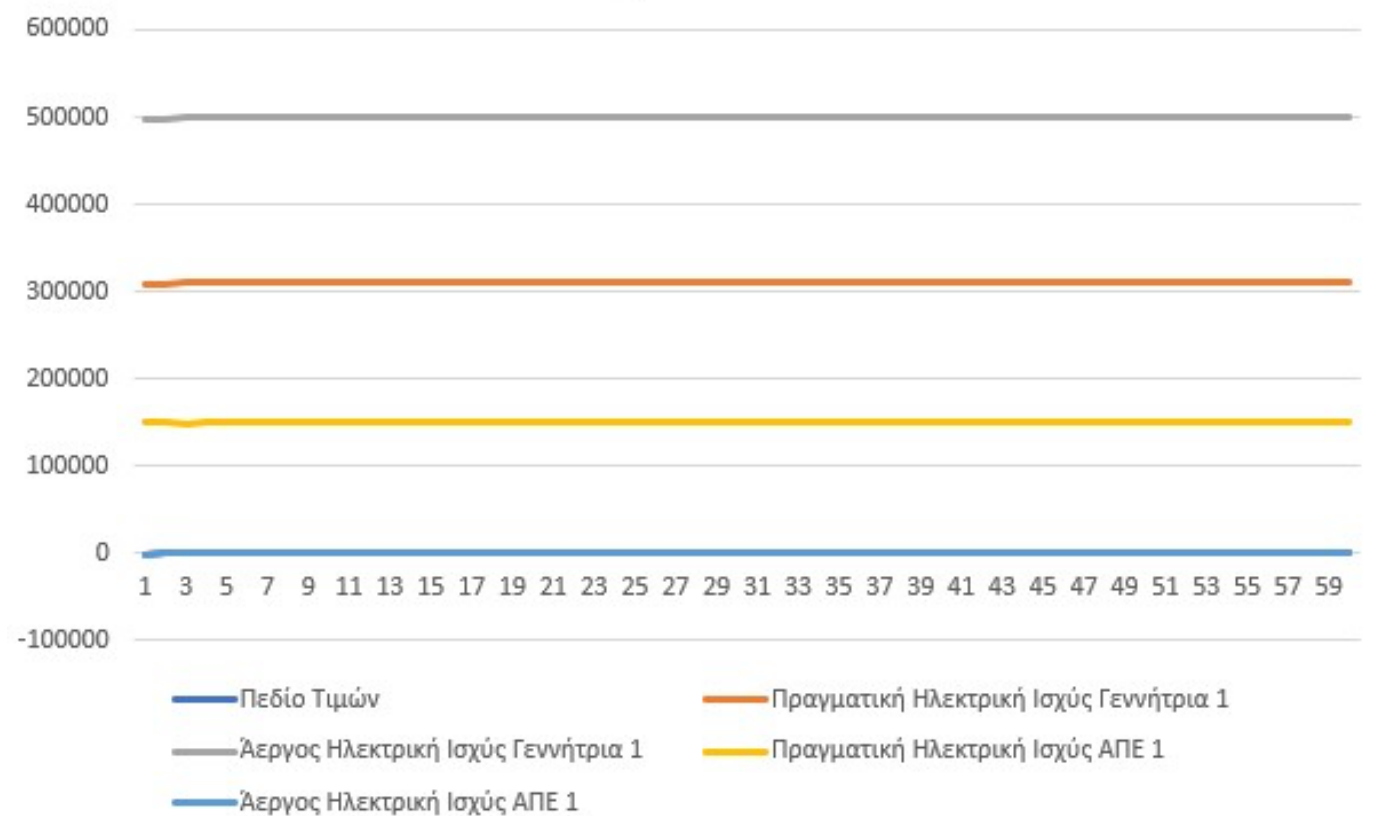


Table 16: Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 1 και ΑΠΕ

Γεννήτρια 2 και ΑΠΕ

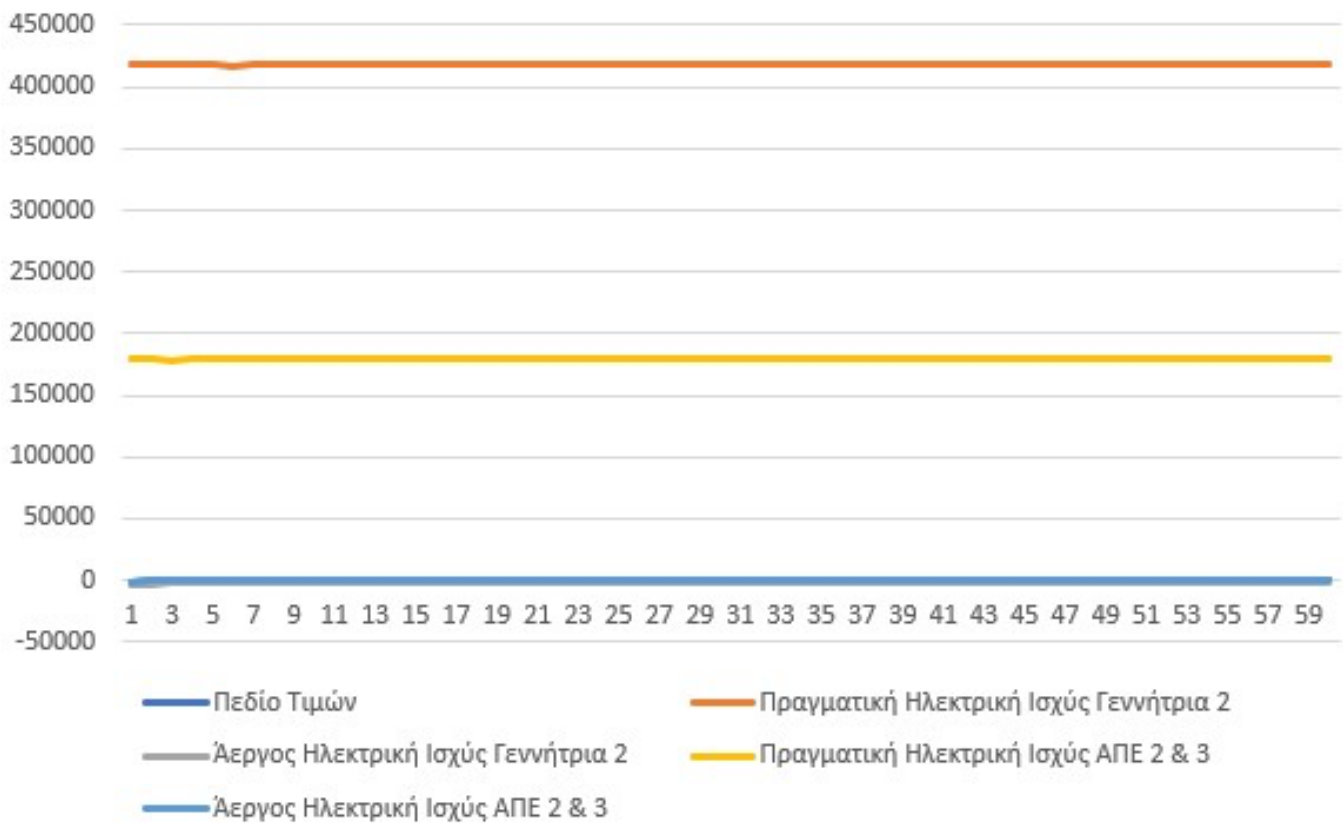


Table 17: Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 2 και ΑΠΕ

Γεννήτρια 3 και ΑΠΕ

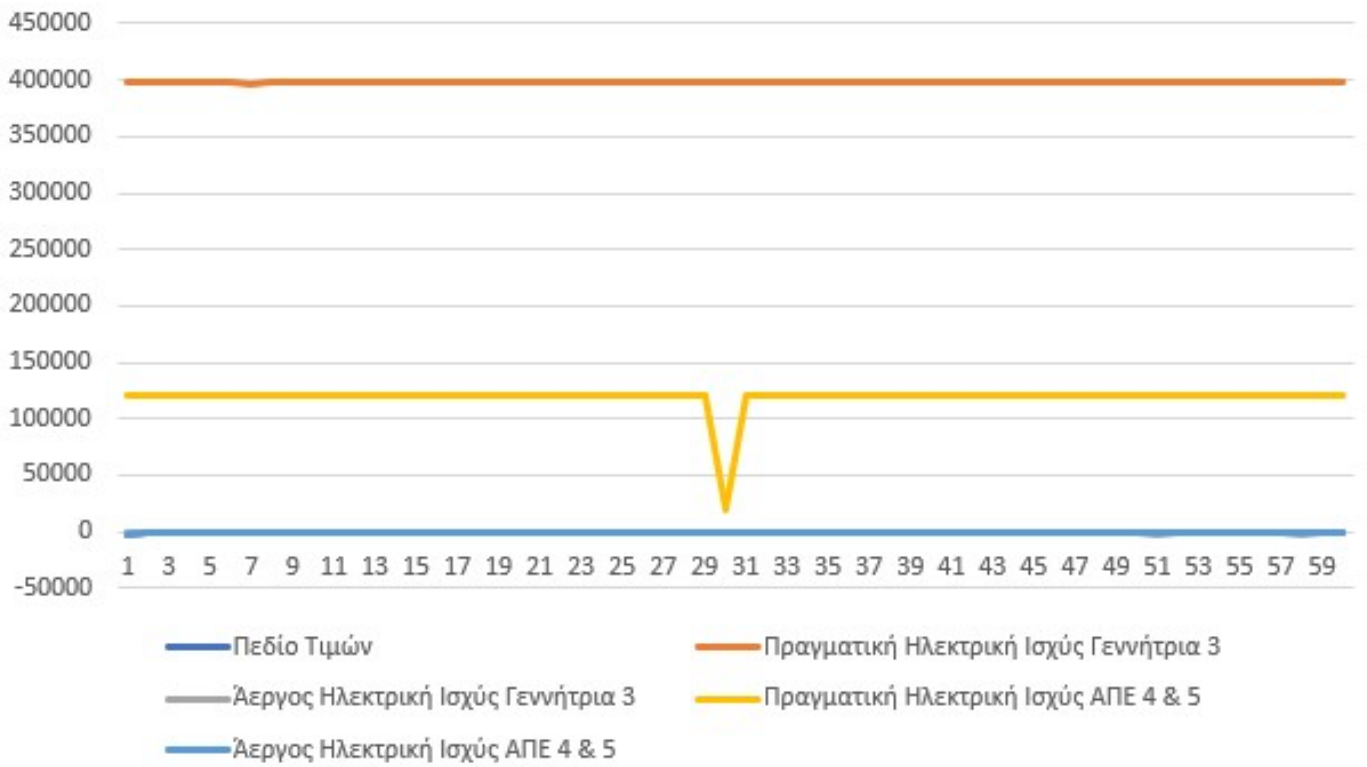


Table 18: Ενεργειακή παραγωγή γεννήτριας 3 και ΑΠΕ

Συμφασικότητα Μικροδικτύου

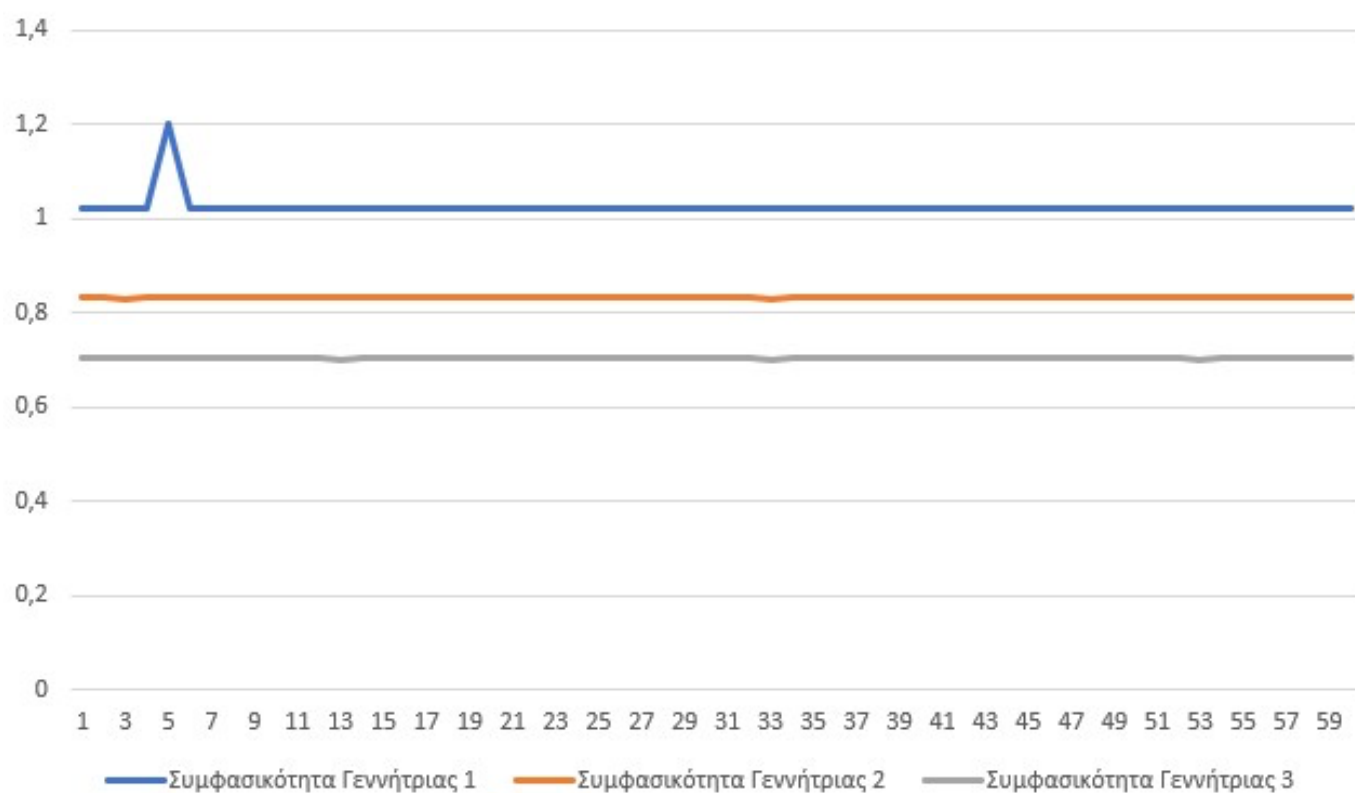


Table 19: Συμφασικότητα Μικροδικτύου

Κεφάλαιο 9° Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να επεκταθούν και να μελετηθούν περαιτέρω από μελλοντικές μελέτες. Αρχικά, θα μπορούσαν να δημιουργηθούν διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης όσο αναφορά το ενεργειακό επίπεδο. Δηλαδή, εκτός από πηγές παραγωγής συμβατικής ενέργειας αλλά και πηγές εναλλακτικής παραγωγής ενέργειας θα μπορούσαν να μοντελοποιηθούν και άλλες οντότητες. Στη συνέχεια, όσον αναφορά το τηλεπικοινωνιακό κομμάτι, μπορεί να υλοποιηθεί με διαφορετικά συστήματα επικοινωνίας και συγκεκριμένα με ασύρματο τρόπο, για παράδειγμα με την τεχνολογία ενός εναλλακτικού προτύπου WiFi είτε με μια κυψελωτή τεχνολογία. Ακόμη, μπορεί να πραγματοποιηθούν περαιτέρω προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας διαφορετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, ώστε να παρατηρηθούν διαφορετικά αποτελέσματα για την κίνηση του καναλιού

Βιβλιογραφία

- [1]. Bishnu Bhattarai, Laurentiu Marinovici, Md Touhiduzzaman, Francis K. Tuffner, Kevin P. Schneider, Jing Xie, Priya Thekkumparambath Manal, Wei Du, Andrew Fisher, “Studying impacts of communication system performance on dynamic stability of networked microgrid”, IET Journals for Smart Grid, 8/4/2020.
- [2]. Jianhua Zhang, S. M. Shafiul Alam, Anthony Florita, Adarsh Hasandka, Jin Wei-Kocsis, Dexin Wang, Liuqing Yang, and Bri-Mathias Hodge, “Opportunistic Hybrid Communications Systems for Distributed PV Coordination”, NREL Technical Report, March 2020.
- [3]. Priya Thekkumparambath Mana, Student Member, IEEE, Kevin P. Schneider, Fellow, IEEE, Wei Du, Member, IEEE, Monish Mukherjee, Student Member, IEEE, Trevor Hardy, Member, IEEE, and Francis K. Tuffner, Member, IEEE, “Study of Microgrid Resilience through Co-Simulation of Power System Dynamics and Communication Systems”, 5/5/2020
- [4]. “Hierarchical Engine for Large-scale Infrastructure Co-Simulation,” <https://www.helics.org/>, accessed August 2019. Z. Liu, Q. Wang, Y. Tang, and M. Ni, “The real-time co-simulation platform with hardware-in-loop for cyber-attack in smart grid,” in 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), May 2018, pp. 845–849.
- [5]. B. Palmintier, D. Krishnamurthy, P. Top, S. Smith, J. Daily, and J. Fuller, “Design of the helics high-performance transmission-distribution communication- market co-simulation framework,” in 2017 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), April 2017, pp. 1–6.
- [6]. Bhattarai, B.P., Lévesque, M., Bak Jensen, B., et al.: ‘Design and cosimulation of hierarchical architecture for demand response control and coordination’, IEEE Trans. Ind. Inf., 2016, 13, (4), pp. 1806–1816
- [7]. Palmintier, B., Krishnamurthy, D., Top, P., et al.: ‘Design of the HELICS high-performance transmission-distribution-communication-market cosimulation framework’. Workshop on Modeling and Simulation of Cyber- Physical Energy Systems (MSCPES), 2017, pp. 1–6
- [8]. D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Canizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke, G. A. Jimenez-Estevez, and N. D. Hatziargyriou, “Trends in Microgrid Control,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, July 2014
- [9]. R. H. Lasseter, J. H. Eto, B. Schenkman, J. Stevens, H. Vollkommer, D. Klapp, E. Linton, H. Hurtado, and J. Roy, “CERTS Microgrid Laboratory Test Bed,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 1, pp. 325–332, 2011.
- [10]. S. Bolognani, R. Carli, G. Cavraro, and S. Zampieri, “On the need for communication for voltage regulation of power distribution grids,” IEEE Transactions on Control of Network Systems, pp. 1–1, 2019.
- [11]. “Framework for Network Co-simulation,” <https://github.com/FNCS/fncs>, accessed August 2019.

- [12]. “Hierarchical Engine for Large-scale Infrastructure Co-Simulation,” <https://www.helics.org/>, accessed August 2019.
- [13]. E. A. A. Coelho, D. Wu, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, T. Dragicevic, C. Stefanovic, and P. Popovski, “Small-signal analysis of the microgrid secondary control considering a communication time delay,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6257–6269, Oct 2016.
- [14]. H. Liang, B. J. Choi, W. Zhuang, and X. Shen, “Stability Enhancement of Decentralized Inverter Control Through Wireless Communications in Microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 321–331, March 2013.
- [15]. Kyle Anderson, Jimmy Du, Amit Narayan, and Abbas El Gamal, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 201, “GridSpice: A Distributed Simulation Platform for the Smart Grid”
- [16]. http://www.gridlabd.org/documents/doxygen/1.1/user_manual.html
- [17]. TraceMetrics Manual, https://sourceforge.net/projects/tracemetrics/?source=typ_redirect
- [18]. B. Palmintier, D. Krishnamurthy, P. Top, S. Smith, J. Daily, and J. Fuller, “Design of the helics high-performance transmission-distributioncommunication- market co-simulation framework,” in *2017 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, April 2017, pp. 1–6.
- [19]. I. Ahmad, J. H. Kazmi, M. Shahzad, P. Palensky, and W. Gawlik, “Cosimulation framework based on power system, ai and communication tools for evaluating smart grid applications,” *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, pp. 1–6, 2015.
- [20]. M. Garau, G. Celli, E. Ghiani, F. Pilo, and S. Corti, “Evaluation of smart grid communication technologies with a co-simulation platform,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 2, pp. 42–49, April 2017.