



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ  
ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Γεώργιος Δ. Κατσούρης

**Επιβλέπων :** Πάυλος Σ. Γεωργιάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

# ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Δ. Κατσούρης

**Επιβλέπων :** Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15<sup>η</sup> Ιουλίου 2013.

.....  
Παύλος Γεωργιλάκης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....  
Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....  
Γεώργιος Δ. Κατσούρης

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

Copyright © Γεώργιος Κατσούρης, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, η συμφόρηση των γραμμών μεταφοράς και οι πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν στρέψει το ενδιαφέρον στην αλλαγή της δομής του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με την διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση ανεμογεννητριών σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την τυχαία συμπεριφορά της ταχύτητας του ανέμου και της ζήτησης φορτίου, ώστε να μεγιστοποιηθεί το οικονομικό όφελος της επένδυσης.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία βασίζεται στην δημιουργία ενός πιθανοτικού μοντέλου για την παραγωγή και την ζήτηση που συνδυάζει όλες τις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας των ανεμογεννητριών και της ζήτησης φορτίου με τις αντίστοιχες πιθανότητες τους και στην ενσωμάτωση του πιθανοτικού μοντέλου σε ένα ντετερμινιστικό πρόβλημα σχεδιασμού. Το πρόβλημα σχεδιασμού εκφράζεται ως πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού, με αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης την μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους και περιορισμούς τα όρια της τάσης των ζυγών, τα θερμικά όρια των γραμμών, την μέγιστη επιτρεπόμενη διείσδυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο και το διαθέσιμο κεφάλαιο της επένδυσης.

Στα πλαίσια της εργασίας, αναπτύχθηκε λογισμικό στο περιβάλλον βελτιστοποίησης GAMS, το οποίο εφαρμόστηκε σε δίκτυα διανομής 4, 15 και 34 ζυγών. Για κάθε δίκτυο, υπολογίζεται η βέλτιστη θέση εγκατάστασης και το βέλτιστο μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος των ανεμογεννητριών και πραγματοποιείται η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου συγκρίνονται με αυτά της ντετερμινιστικής προσέγγισης, κατά την οποία η παραγόμενη ισχύς από τις ανεμογεννήτριες και η ζήτηση φορτίου θεωρούνται σταθερές, και εξάγονται συμπεράσματα. Τέλος, προτείνονται ενδεχόμενες επεκτάσεις της εργασίας.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Δίκτυα διανομής, ταχύτητα του ανέμου, ζήτηση φορτίου, ανεμογεννήτριες, βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση, οικονομικό όφελος, πιθανοτικό μοντέλο, GAMS.



## **ABSTRACT**

Power system deregulation, the continuously growing energy demand, the shortage of transmission capacities and recent development in renewable generation technologies have drawn attention to possible changes in the distribution system infrastructure by deploying distributed generation in distribution systems.

The scope of this thesis is the optimal siting and sizing of wind-based distributed generation in distribution systems, considering the random behavior of wind speed and load demand, so as to maximize the investment's economic benefits.

The methodology developed in this work is based on generating a probabilistic generation-load model that combines all possible operating conditions of wind turbines and load levels with their probabilities and accommodating the probabilistic model in a deterministic planning problem. The planning problem is formulated as a non-linear programming, with an objective function for the maximization of the economic benefits and the constraints include voltage limits at different buses of the system, feeder capacity, maximum penetration limit of wind power and available capital investment.

In this work, software has been developed on the optimization platform GAMS, which was applied to distribution networks of 4, 15 and 34 buses. For each network, the optimal location and the optimal size of the installed capacity of wind turbines are calculated and the economic evaluation of investment is made. Then, the results of the proposed method are compared with those of the deterministic approach, where the output power of wind turbines and the load demand are considered constant, and conclusions are drawn. Finally, possible extensions of the work are proposed.

## **KEY WORDS**

Distribution networks, wind speed, load demand, wind turbines, optimal siting and sizing, economic benefit, probabilistic model, GAMS.





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιλάκη, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, τις συμβουλές και τις επισημάνσεις του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καλό μου φίλο Παναγιώτη Κολιό για την πολύτιμη βοήθειά του στη συγγραφή του τελικού κειμένου της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη συμπαράσταση τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	2
1.3	Ηλεκτρικές απώλειες δικτύων διανομής	2
1.4	Ανάλυση ροών φορτίου	3
1.5	Αντικείμενο και δομή της εργασίας	5
1.6	Βιβλιογραφία	5

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

2.1	Εισαγωγή	7
2.2	Ορισμός Διεσπαρμένης Παραγωγής	8
2.3	Τεχνολογίες Διεσπαρμένης Παραγωγής	9
2.3.1	Μονάδες εσωτερικής καύσης	10
2.3.2	Αεριοστρόβιλοι	10
2.3.3	Μικροτουρμπίνες	11
2.3.4	Κυψέλες καυσίμου	11
2.3.5	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	11
2.3.5.1	Υδροηλεκτρική ενέργεια	11
2.3.5.2	Ηλιακή ενέργεια	12
2.3.5.3	Αιολική ενέργεια	12
2.3.5.4	Γεωθερμική ενέργεια	12
2.3.5.5	Ενέργεια από τη Βιομάζα	13
2.3.6	Τεχνολογίες αποδοτικής χρήσης ενέργειας	13
2.4	Πλεονεκτήματα της Διεσπαρμένης Παραγωγής	14
2.5	Μειονεκτήματα της Διεσπαρμένης Παραγωγής	15
2.6	Βιβλιογραφία	16

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

3.1	Εισαγωγή	17
3.2	Μέθοδοι σχεδιασμού συστήματος διανομής με διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής	17
3.2.1	Ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος	18
3.2.2	Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους	19

3.2.3	Μεγιστοποίηση της διείσδυσης της Διεσπαρμένης Παραγωγής	20
3.3	Βιβλιογραφία	21

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ**

4.1	Εισαγωγή	25
4.2	Μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου	26
4.2.1	Χαρακτηριστικά του ανέμου	26
4.2.2	Ταχύτητα του ανέμου	26
4.2.3	Μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου με χρήση συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας	27
4.2.3.1	Ετήσια μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου	29
4.2.3.2	Ωριαία μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου	29
4.2.4	Μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου με χρήση χρονοσειρών	30
4.3	Εκτίμηση ενεργειακής απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας	31
4.3.1	Δομή των ανεμογεννητριών	31
4.3.2	Παραγόμενη ισχύς μιας ανεμογεννήτριας	32
4.4	Μοντελοποίηση της ζήτησης φορτίου	36
4.4.1	Μοντελοποίηση της ετήσιας ζήτησης φορτίου	37
4.4.2	Μοντελοποίηση της ωριαίας ζήτησης φορτίου	37
4.5	Βιβλιογραφία	39

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

5.1	Εισαγωγή	41
5.2	Αντικειμενική συνάρτηση	42
5.3	Συνδυασμένο μοντέλο παραγωγής-ζήτησης	44
5.4	Σχεδιασμός του προβλήματος	49
5.4.1	Μαθηματική έκφραση του προβλήματος	50
5.4.1.1	Αντικειμενική συνάρτηση	50
5.4.1.2	Περιορισμοί του συστήματος	52
5.5	Βιβλιογραφία	54

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS**

6.1	Εισαγωγή	55
-----	----------	----

6.2	Χαρακτηριστικά του συστήματος	56
6.2.1	Βασικές αρχές	56
6.2.2	Επεξήγηση εντός του κώδικα	57
6.2.3	Φορητότητα	58
6.2.4	Περιβάλλον εργασίας-User interface	58
6.3	Δομή ενός μοντέλου στο GAMS	58
6.3.1	Σύνολα (Sets)	59
6.3.2	Σταθερές (Scalars)	61
6.3.3	Παράμετροι και Πίνακες (Parameters & Tables)	61
6.3.4	Μεταβλητές ( Variables)	62
6.3.5	Εξισώσεις (Equations)	62
6.3.6	Μοντέλο (Model)	63
6.3.7	Επίλυση ( Solve)	63
6.3.8	Έξοδος στο GAMS ( GAMS Output)	64
6.3.9	Δηλώσεις υπό συνθήκη	64
6.4	Μη γραμμικός προγραμματισμός	64
6.4.1	Επιλυτής SNOPT	65
6.5	Βιβλιογραφία	66

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

7.1	Εισαγωγή	67
7.2	Εφαρμογή σε δίκτυο 4 ζυγών	67
7.2.1	Διατύπωση του προβλήματος και δεδομένα του συστήματος	67
7.2.2	Ανάλυση ροών φορτίου του δικτύου	68
7.2.3	Ντετερμινιστική προσέγγιση	69
7.2.4	Πιθανοτική προσέγγιση	71
7.2.5	Σύγκριση των δυο προσεγγίσεων	74
7.3	Εφαρμογή σε δίκτυο 15 ζυγών	76
7.3.1	Διατύπωση του προβλήματος και δεδομένα του συστήματος	76
7.3.2	Ανάλυση ροών φορτίου του δικτύου	78
7.3.3	Ντετερμινιστική προσέγγιση	79
7.3.4	Πιθανοτική προσέγγιση	81
7.3.5	Σύγκριση των δυο προσεγγίσεων	83
7.4	Εφαρμογή σε δίκτυο 34 ζυγών	85
7.4.1	Διατύπωση του προβλήματος και δεδομένα του συστήματος	85

7.4.2	Ανάλυση ροών φορτίου του δικτύου	89
7.4.3	Ντετερμινιστική προσέγγιση	90
7.4.4	Πιθανοτική προσέγγιση	92
7.4.5	Σύγκριση των δυο προσεγγίσεων	95

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

8.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	99
8.2	Επεκτάσεις της εργασίας	100

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΖΗΤΗΣΗΣ**

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης .

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του ΣΗΕ : την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και επειδή η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες με οικονομικό τρόπο, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που χρειάζεται η κατανάλωσή της.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Κύριοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι θερμικοί και οι υδροηλεκτρικοί. Τελευταία παρατηρείται ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) κυρίως με την εκμετάλλευση του αέρα και του ήλιου.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης .

Η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ώρου και από τη χωροταξική της κατανομή. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60Hz, χρησιμοποιούνται όμως και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση λειτουργίας πρέπει να παραμένει σταθερή στην ονομαστική τιμή. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν επίσης και τον ουδέτερο αγωγό.

Οι πελάτες που είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητά τους βιομηχανικοί καταναλωτές ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης [1.1].

## 1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. Τα δίκτυα διανομής είναι τριφασικά και φτάνουν μέχρι τον μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά τον μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, η οποία περιλαμβάνει το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης.

Διακρίνονται δυο βαθμίδες διανομής, η διανομή μέσης τάσης ή αλλιώς πρωτεύουσα διανομή, και η διανομή χαμηλής τάσης ή αλλιώς δευτερεύουσα διανομή. Τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης τροφοδοτούνται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, από υψηλή σε μέση, και τροφοδοτούν τους υποσταθμούς διανομής και τους καταναλωτές μέσης τάσης. Οι καταναλωτές μέσης τάσης είναι κατά κύριο λόγο βιομηχανικοί καταναλωτές με τριφασικές παροχές και οι γραμμές διανομής που τους τροφοδοτούν αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσεων. Τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης έχουν σαν αφετηρία τους υποσταθμούς διανομής, όπου η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή μέσω μετασχηματιστών διανομής, που αποτελούν τον βασικό εξοπλισμό των υποσταθμών. Στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες εμπορικής και οικιακής χρήσης, που ενίοτε έχουν μονοφασικές παροχές, που δημιουργούν ασύμμετρες φορτίσεις. Οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσεων και διαθέτουν, επιπλέον, και ουδέτερο αγωγό.

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των δικτύων διανομής σχετίζεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των περιοχών, και γενικότερα, του τρόπου χωροταξικής διαμόρφωσης κάθε χώρας. Κατηγοριοποιούνται σε εναέρια και υπόγεια, με κριτήριο τον τρόπο κατασκευής τους. Τα εναέρια δίκτυα είναι φθηνότερα στην κατασκευή τους και έχουν καλύτερη αποκατάσταση βλαβών σε σχέση με τα υπόγεια, καταλαμβάνουν, όμως, σημαντικό χώρο, η διάθεση του οποίου είναι συχνά αδύνατη σε σχετικά πυκνοκατοικημένες περιοχές. Τα υπόγεια δίκτυα έχουν ελάχιστη επίπτωση στην αισθητική του περιβάλλοντος χώρου, σε αντίθεση με τα εναέρια που επιβαρύνουν αισθητικά το περιβάλλον.

Η μορφή των δικτύων διανομής είναι κατά κανόνα ακτινική (radial) ή βροχοειδής (meshed). Η ακτινική λειτουργία του δικτύου διανομής έγκειται στο γεγονός ότι όλα τα φορτία του δικτύου τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο τους. Έτσι, οι κλάδοι του δικτύου δεν συνδέονται μεταξύ τους, αλλά διαδίδονται ακτινικά από την κεντρική τροφοδοσία προς τα υπόλοιπα σημεία του δικτύου. Αντίθετα, στη βροχοειδή λειτουργία, τα δίκτυα διανομής είναι κλειστά, μέσω των βρόχων που σχηματίζουν οι γραμμές. Η βροχοειδής μορφή επιτρέπει οικονομία των γραμμών για τον ίδιο βαθμό εξυπηρέτησης και προσφέρει εναλλακτική τροφοδότηση σε περίπτωση βλαβών, ενώ η ακτινική απλοποιεί και διευκολύνει ζητήματα προστασίας του δικτύου και ροής της ενέργειας. Σημειώνεται, ότι πολλά δίκτυα διανομής έχουν σχεδιαστεί έτσι, ώστε να μετατρέπονται από ακτινικά σε βροχοειδή και αντίστροφα, με το χειρισμό κατάλληλων διακοπών ή αποζευκτών [1.2].

## 1.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Οι απώλειες των δικτύων διανομής μέσης και χαμηλής τάσης αποτελούν ένα σχετικά μικρό ποσοστό της διανεμόμενης προς τους καταναλωτές ενέργειας αλλά είναι ιδιαίτερα σημαντικές λόγω των μεγάλων ποσών της διακινούμενης ενέργειας. Για παράδειγμα, στο



Ελληνικό σύστημα οι ετήσιες απώλειες ενέργειας των δικτύων μέσης και χαμηλής τάσης της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), εκφραζόμενες ως ποσοστά της εισερχόμενης ενέργειας από τα δίκτυα μεταφοράς, ανέρχονται περίπου σε ποσοστό 6.5%. Το αντίστοιχο ποσοστό για τα δίκτυα μεταφοράς (150kV και 400kV) είναι περίπου 4% [1.2].

Το μεγαλύτερο ποσοστό των απωλειών των δικτύων διανομής οφείλεται κυρίως στις ηλεκτρικές απώλειες ή αλλιώς απώλειες ενεργού ισχύος. Λόγω του ότι τα καλώδια των αγωγών των τριφασικών γραμμών διανομής και τα τυλίγματα των μετασχηματιστών διανομής παρουσιάζουν ωμική αντίσταση, κατά την διαρροή τους από ρεύματα που οφείλονται στις ροές ισχύος παράγονται θερμικές απώλειες, οι οποίες υπολογίζονται στη σχέση (1.1).

$$P_{\text{απ}} = 3 * I^2 * R \quad (1.1)$$

όπου  $I$  το ρεύμα και  $R$  η αντίσταση ανά φάση της γραμμής διανομής.

Στα δίκτυα διανομής, λοιπόν, οι απώλειες ενεργού ισχύος αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της παραγόμενης ισχύος και για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντική η μείωση τους. Ο λόγος είναι ότι τα δίκτυα διανομής συνδέουν τους καταναλωτές με το σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης και έτσι, λόγω της χαμηλής τάσης που βρίσκονται, έχουν μεγαλύτερη τιμή ρεύματος, με αποτέλεσμα οι απώλειες ενεργού ισχύος να είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες στα δίκτυα υψηλής τάσης.

Κάποιοι τρόποι μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος στα δίκτυα διανομής είναι:

- Μείωση του ρεύματος με διόρθωση του συντελεστή ισχύος μέσω αντιστάθμισης με πυκνωτές.
- Αύξηση της διατομής των αγωγών των γραμμών διανομής.
- Ανασχηματισμός της τοπολογίας δικτύων διανομής μέσω διακοπτικών κινήσεων.
- Μείωση των φορτίσεων των γραμμών μέσω διεύθυνσης διεσπαρμένης παραγωγής.

#### 1.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

Σε κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) πραγματοποιούνται κάποιες μελέτες με απώτερο σκοπό να επιτευχθεί η σωστή σχεδίαση, αλλά και η καλή και αξιόπιστη λειτουργία του κάθε ΣΗΕ. Οι μελέτες αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες που είναι οι μελέτες μόνιμης κατάστασης ή κανονικής λειτουργίας και οι μελέτες μεταβατικής κατάστασης ή μη κανονικής λειτουργίας ή ανώμαλης λειτουργίας. Η ανάλυση ροών φορτίου ανήκει στην πρώτη κατηγορία και με αυτήν υπολογίζονται οι τάσεις κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς, το ρεύμα, οι ροές ενεργού και αέργου ισχύος σε όλες τις γραμμές και τέλος, οι απώλειες του συστήματος.

Η μελέτη ροών φορτίου σε ένα δίκτυο είναι αναγκαία και προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες, από τις οποίες οι κυριότερες είναι:

- Γίνεται έλεγχος των τάσεων και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος ώστε να διατηρούνται εντός των επιτρεπόμενων ορίων λειτουργίας.

- Είναι απαραίτητη στον προσδιορισμό των επιπτώσεων πιθανών διαταραχών, όπως είναι η απώλεια μιας γεννήτριας ή μιας γραμμής.
- Χρειάζεται για τις μελέτες ανάπτυξης και επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας όπως για παράδειγμα μετά την εισαγωγή νέων φορτίων ή την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής, τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα ή την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς [1.1].

Για την ανάλυση της ροής φορτίου χρησιμοποιούνται επαναληπτικές μέθοδοι (Newton-Raphson, Gauss κ.ά.) καθώς δεν υπάρχει κάποια αναλυτική μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος. Οι εξισώσεις ροής φορτίου διατυπώνονται ως εξής:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i \sum_{j \in A(i)} V_j (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad \forall i \quad (1.2)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i \sum_{j \in A(i)} V_j (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad \forall i \quad (1.3)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + B_{ij} \quad (1.4)$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (1.5)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (1.6)$$

όπου:

$P_i$  η έγχυση ενεργού ισχύος στο ζυγό  $i$

$Q_i$  η έγχυση αέργου ισχύος στο ζυγό  $i$

$P_{Gi}$  η παραγωγή ενεργού ισχύος στο ζυγό  $i$

$Q_{Gi}$  η παραγωγή αέργου ισχύος στο ζυγό  $i$

$P_{Di}$  η κατανάλωση ενεργού ισχύος στο ζυγό  $i$

$Q_{Di}$  η κατανάλωση αέργου ισχύος στο ζυγό  $i$

$V_i$  το μέτρο της τάσης στο ζυγό  $i$

$V_j$  το μέτρο της τάσης στο γειτονικό ζυγό  $j$

$j \in A(i)$  το σύνολο  $A(i)$  περιλαμβάνει όλους τους ζυγούς που συνδέονται στο ζυγό  $i$

$Y_{ij}$  το στοιχείο του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών

$\delta_i$  η γωνία της τάσης του ζυγού  $i$ .

Γνωρίζοντας την παραγωγή ισχύος και τα φορτία των ζυγών του ΣΗΕ, μπορεί να υπολογιστεί η τάση  $V_i$  και η γωνία  $\delta_i$  σε κάθε ζυγό, λύνοντας τις παραπάνω μη-γραμμικές εξισώσεις. Στη συνέχεια, με γνωστές τις  $V_i$  και  $\delta_i$  σε κάθε ζυγό, υπολογίζεται η ροή ισχύος σε κάθε κλάδο  $i$ - $j$  (μεταξύ των ζυγών  $i$  και  $j$ ) του δικτύου.

## 1.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση ανεμογεννητριών σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους της επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη την τυχαία συμπεριφορά της ταχύτητας του ανέμου και της ζήτησης φορτίου.

Αναλυτικότερα, η δομή της εργασίας οργανώνεται σε οκτώ κεφάλαια:

- **Κεφάλαιο 1:** Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, περιγράφονται συνοπτικά τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και οι ηλεκτρικές απώλειες που παρουσιάζονται σε αυτά και διατυπώνεται το πρόβλημα της ροής φορτίου. Επιπλέον, αναφέρεται το αντικείμενο και η δομή της εργασίας.
- **Κεφάλαιο 2:** Διατυπώνεται ο ορισμός της Διεσπαρμένης Παραγωγής, παρουσιάζονται οι κύριες τεχνολογίες μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προκύπτουν από την διείσδυση τους στα δίκτυα διανομής.
- **Κεφάλαιο 3:** Γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, όσον αφορά την βέλτιστη κατανομή των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στα δίκτυα διανομής και κατηγοριοποιούνται οι διάφοροι μέθοδοι.
- **Κεφάλαιο 4:** Παρουσιάζονται οι τρόποι μοντελοποίησης της τυχαίας συμπεριφοράς της ταχύτητας του ανέμου και της ζήτησης φορτίου, καθώς και ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύς μιας ανεμογεννήτριας.
- **Κεφάλαιο 5:** Παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος που αναπτύχθηκε για την βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση ανεμογεννητριών σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, που βασίζεται στην δημιουργία του συνδυασμένου μοντέλου παραγωγής-ζήτησης. Επιπλέον, πραγματοποιείται η μαθηματική έκφραση του προβλήματος και παρουσιάζεται η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης και οι περιορισμοί του συστήματος.
- **Κεφάλαιο 6:** Γίνεται παρουσίαση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του, η δομή των προγραμμάτων του και οι βασικές εντολές του. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στο μη γραμμικό προγραμματισμό και στον επιλυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.
- **Κεφάλαιο 7:** Παρουσιάζονται εφαρμογές της μεθόδου που αναπτύχθηκε στην εργασία σε δίκτυα 4,15 και 34 ζυγών. Υπολογίζονται τόσο το βέλτιστο μέγεθος, όσο και η θέση εγκατάστασης των ανεμογεννητριών στα τρία δίκτυα και πραγματοποιείται οικονομική αξιολόγηση των επενδύσεων, για διάφορες περιπτώσεις.
- **Κεφάλαιο 8:** Γίνεται μια σύνοψη της εργασίας, παρουσιάζονται συμπεράσματα και προτείνονται ενδεχόμενες επεκτάσεις.

## 1.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Κ. Βουρνάς, και Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας,” Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001, σελ. 5-16, 229.

- [1.2] Μ. Π. Παπαδόπουλος, Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, том Ι. Αθήνα: Εκδόσεις, Ε.Μ.Π., 1994, σελ 7-33, 138.

## **ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή αποτελεί μια νέα ιδέα στην αγορά του ηλεκτρισμού, αλλά στην πραγματικότητα ως ιδέα είναι κάθε άλλο παρά καινούρια. Όταν η ηλεκτρική παραγωγή βρισκόταν σε εμβρυακό στάδιο, η Διεσπαρμένη Παραγωγή ήταν ο κανόνας και όχι η εξαίρεση. Τα πρώτα εργοστάσια παραγωγής ισχύος παρείχαν ηλεκτρισμό σε φορτία-πελάτες που βρίσκονταν σε μικρή ακτίνα από αυτούς.

Τα πρώτα ηλεκτρικά δίκτυα ισχύος ήταν συνεχούς ρεύματος (Direct Current, DC), οπότε η τάση παροχής ήταν σχετικά περιορισμένη, όπως και η απόσταση μεταξύ σταθμού παραγωγής και καταναλωτή. Η εξισορρόπηση ζήτησης και προμήθειας υλοποιούνταν μερικώς με τη χρήση τοπικής αποθήκευσης ενέργειας, όπως για παράδειγμα με τη χρήση συσσωρευτών, οι οποίοι είχαν τη δυνατότητα άμεσης ηλεκτρικής σύνδεσης με το DC δίκτυο ισχύος. Παράλληλα, με τη μικρής κλίμακας παραγωγή, επιστρέφουν στο προσκήνιο και οι μονάδες τοπικής αποθήκευσης [2.1].

Με το πέρασμα του χρόνου, τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η εμφάνιση των δικτύων ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος (Alternate Current, AC), έδωσαν ώθηση στην ανάπτυξη του τομέα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, επιτρέποντας τη μεταφορά του ηλεκτρισμού σε μεγάλες πλέον αποστάσεις. Επιπλέον, οι οικονομίες κλίμακας στην παραγωγή ηλεκτρισμού οδήγησαν σε μια αύξηση της παραγόμενης ισχύος των εργοστασίων, καθώς και στη μείωση του κόστους ανά μονάδα. Κατασκευάστηκαν μαζικά ηλεκτρικά συστήματα, που αποτελούνταν από τεράστια δίκτυα μεταφοράς και διανομής, καθώς και μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ισορροπία προσφοράς και ζήτησης επιτεύχθηκε από τη μέση επίδραση του συνδυασμού μεγάλων ποσοτήτων ακαριαία μεταβαλλόμενων φορτίων. Η ασφάλεια της παροχής αυξήθηκε αφού, η μερική ή πλήρης ανεπάρκεια κάποιας μονάδας παραγωγής σε ένα χρονικό διάστημα αντισταθμίστηκε από τις υπόλοιπες μονάδες παραγωγής εντός του διασυνδεδεμένου συστήματος. Στην πραγματικότητα, αυτή η διασύνδεση του συστήματος υψηλής τάσης είχε ως αποτέλεσμα να γίνει εφικτή η οικονομία κλίμακας.

Την τελευταία δεκαετία, οι τεχνολογικές καινοτομίες και οι αλλαγές στο οικονομικό και στο ρυθμιστικό περιβάλλον έφεραν στο προσκήνιο την Διεσπαρμένη Παραγωγή. Αυτό επιβεβαιώνεται από την IEA (International Energy Agency, 2003) όπου παραθέτει τους πέντε βασικούς λόγους που συνετέλεσαν σε αυτό:

1. Ανάπτυξη των τεχνολογιών Διεσπαρμένης Παραγωγής.
2. Περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς.
3. Αυξημένη ζήτηση παροχής ηλεκτρισμού υψηλής αξιοπιστίας.
4. Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
5. Προβληματισμοί για τις κλιματικές αλλαγές.

Επιπλέον, καθώς το τωρινό σύστημα παραγωγής ηλεκτρισμού στρέφεται προς καθαρές και ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, γίνονται ολοένα και περισσότερο ελκυστικές σε όλο τον κόσμο.

Εν τούτοις, τα συστήματα διανομής, είτε πρόκειται για ακτινικά δίκτυα που βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε αγροτικές περιοχές, ή για βροχοειδή δίκτυα που βρίσκονται σε αστικές περιοχές, είναι σχεδιασμένα για να λειτουργούν χωρίς καμία παραγωγή ισχύος μέσα σε αυτά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για δεκαετίες, το υπάρχον σύστημα βασιζόταν σε μεγάλο βαθμό στο κεντρικό μοντέλο παραγωγής ηλεκτρισμού από μεγάλους σταθμούς παραγωγής. Λόγω της απαίτησης δαπανηρών ενισχύσεων των δικτύων, οι Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής πρέπει να προσαρμοστούν στα υφιστάμενα συστήματα ώστε να γίνει εφικτή η σύνδεσή τους στο δίκτυο.

Η εισαγωγή Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στα υφιστάμενα συστήματα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ροή ισχύος, τις συσκευές προστασίας, την αξιοπιστία του συστήματος και την διακύμανση της τάσης. Όλες αυτές οι επιδράσεις, θετικές ή αρνητικές, αλλάζουν σε μεγάλο βαθμό τη σχεδίαση των συστημάτων διανομής, την εκτίμηση της αξιοπιστίας τους και τη λειτουργία τους και παράλληλα αυξάνουν την πολυπλοκότητα και τις παραμέτρους τους. Επιπλέον, οι έντονες διακυμάνσεις και η αβεβαιότητα που συνοδεύουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δημιουργούν ακόμα μεγαλύτερες προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν ώστε να αναπτυχθούν ευρέως οι Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής.

## 2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή είναι ουσιαστικά τόσο νέα προσέγγιση στο πεδίο της ηλεκτρικής βιομηχανίας, ώστε είτε με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία είτε στις νομοθεσίες των διαφόρων κρατών να μην έχει δοθεί κάποιος γενικά αποδεκτός ορισμός αυτής. Έτσι, γίνεται προσπάθεια εξασφάλισης ενός κοινώς αποδεκτού ορισμού, εγχείρημα δύσκολο καθώς αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό ζήτημα.

Κάποια κράτη ορίζουν τη Διεσπαρμένη Παραγωγή με βάση το επίπεδο της τάσης, ενώ άλλα βασίζονται στην αρχή, ότι η Διεσπαρμένη Παραγωγή είναι συνδεδεμένη σε δίκτυα από τα οποία οι καταναλωτές εξυπηρετούνται άμεσα. Άλλα κράτη ορίζουν τη Διεσπαρμένη Παραγωγή με βάση κάποια χαρακτηριστικά της, όπως χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπαραγωγής ή μη κατανομή φορτίου στις εγκαταστάσεις παραγωγής [2.2]. Στην ενότητα αυτή γίνεται ανασκόπηση των ορισμών της Διεσπαρμένης Παραγωγής όπως έχουν προταθεί από διαφορετικά ινστιτούτα, ενώσεις και ερευνητές.

Το Ινστιτούτο των Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE), καθορίζει τη Διεσπαρμένη Παραγωγή, ως παραγωγή ηλεκτρισμού από εγκαταστάσεις οι οποίες είναι σαφώς μικρότερες από τα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να είναι δυνατή η διασύνδεσή τους σχεδόν σε κάθε σημείο του συστήματος ισχύος.

Το Διεθνές Συμβούλιο Μεγάλων Ηλεκτρικών Συστημάτων (CIGRE International Council on Large Electric Systems) ορίζει ως Διεσπαρμένη Παραγωγή τις μονάδες παραγωγής που δεν υπερβαίνουν τα 100MW, είναι συνήθως συνδεδεμένες στο δίκτυο διανομής και η κατανομή φορτίου στις εγκαταστάσεις παραγωγής δεν γίνεται κεντρικά [2.3].

Ο Chambers επίσης ορίζει τη Διεσπαρμένη Παραγωγή ως σχετικά μικρές μονάδες παραγωγής, με δυναμικότητα έως 30MW, τοποθετημένες κοντά στους καταναλωτές έτσι ώστε να ικανοποιούν συγκεκριμένες ανάγκες τους και να υποστηρίζουν την οικονομική λειτουργία του συστήματος διανομής [2.4].

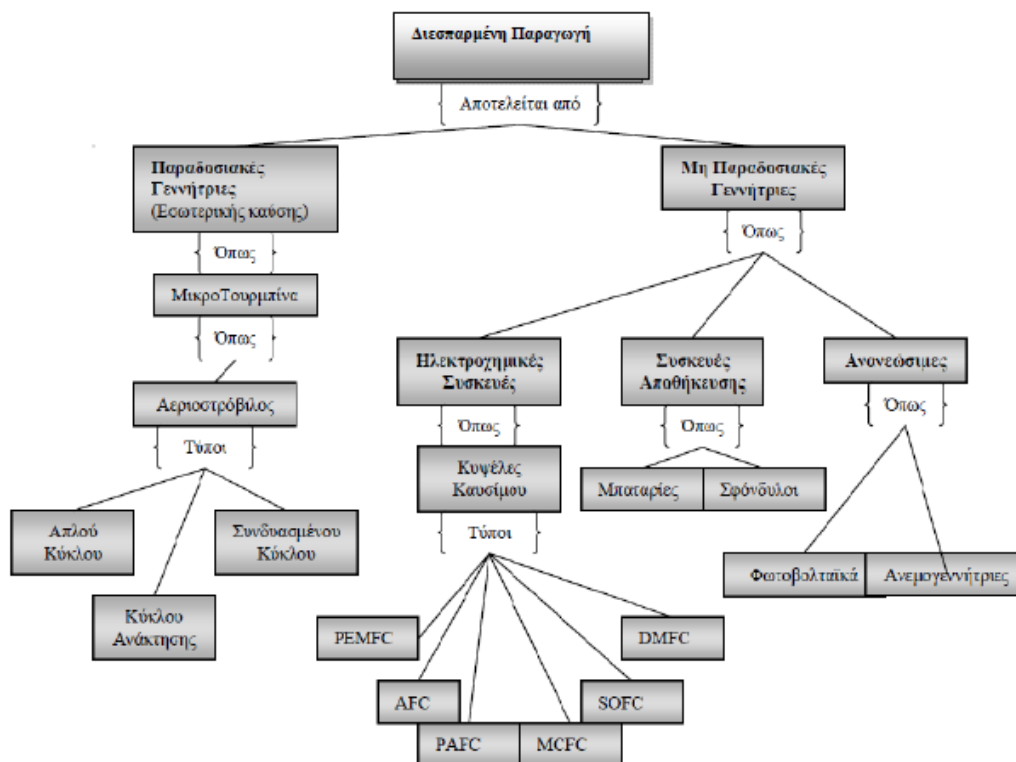
Οι Dondi et al., (2002), ορίζουν τη Διεσπαρμένη παραγωγή ως μικρή πηγή, ηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας, ή αποθήκευσης (όπου τυπικά εκτείνεται από μερικά kW έως δεκάδες MW) που δεν είναι μέρος της μεγάλης κεντρικής πηγής ενέργειας, και εγκαθίστανται κοντά στο φορτίο. Επιπλέον, στον ορισμό αυτό περιλαμβάνουν και εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας, στοιχείο που δεν είναι ιδιαίτερα τυπικό στη βιβλιογραφία .

Από όλους αυτούς τους ορισμούς αφήνεται να εννοηθεί ότι τουλάχιστον οι μικρές κλίμακας μονάδες παραγωγής που συνδέονται στο δίκτυο διανομής ισχύος πρέπει να θεωρούνται μέρος της Διεσπαρμένης Παραγωγής (Κριτήριο 1). Επιπλέον, οι μονάδες παραγωγής που εγκαθίστανται κοντά στο φορτίο ή στην πλευρά του πελάτη- μετρητή μπορούν να αναγνωριστούν ως μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής (Κριτήριο 2). Το τελευταίο κριτήριο επικαλύπτει μερικώς το πρώτο καθώς, οι περισσότερες μονάδες παραγωγής που είναι εγκατεστημένες στον μετρητή, είναι επίσης συνδεδεμένες στο δίκτυο διανομής. Εντούτοις, το τελευταίο κριτήριο μπορεί να συμπεριλάβει και μεγαλύτερες μονάδες, εγκατεστημένες στην πλευρά του πελάτη, αλλά συνδεδεμένες στο δίκτυο μεταφοράς ισχύος [2.2]. Τα παραπάνω οδηγούν στον ορισμό που συμφωνεί με των Ackerman, Andersson, και Soder [2.5]. Σύμφωνα με αυτόν, η Διεσπαρμένη Παραγωγή καθορίζεται με βάση τη φύση σύνδεσής της στο δίκτυο, παρά με την δυναμικότητα παραγωγής. Ορίζεται ως πηγή Διεσπαρμένης Παραγωγής, η πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος που συνδέεται απ' ευθείας στο δίκτυο διανομής ή στην πλευρά του μετρητή του πελάτη.

### 2.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Κάποιες από τις συσκευές που χρησιμοποιούνται στη Διεσπαρμένη Παραγωγή, όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης και οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, υπάρχουν από τη δημιουργία της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, βελτιώσεις στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν οι συσκευές αυτές, παράλληλα με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών υπόσχονται την ευρεία διεξόδυση της Διεσπαρμένης Παραγωγής στα συστήματα διανομής.

Οι τεχνολογίες που εντάσσονται στη Διεσπαρμένη Παραγωγή είναι μονάδες που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα, όπως μηχανές εσωτερικής καύσης, αεριοστρόβιλοι, μικροτουρμπίνες και κυψέλες καυσίμου, μονάδες που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια αλλά και τεχνολογίες διαχείρισης της ενέργειας. Οι κυριότερες μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής δίνονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Τύποι και τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής [2.6].

### 2.3.1 Μονάδες εσωτερικής καύσης

Μια μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή. Μια γεννήτρια συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι διαθέσιμες από μικρά μεγέθη (5kW για εφεδρική γεννήτρια σε κατοικίες) μέχρι μεγάλες γεννήτριες (7 MW). Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν διαθέσιμα καύσιμα όπως βενζίνη, φυσικό αέριο και diesel.

### 2.3.2 Αεριοστρόβιλοι

Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται από τις εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως για την παροχή ισχύος αιχμής, εξαιτίας της χαμηλής σχετικά απόδοσής τους, αλλά και του μικρού χρόνου εκκίνησης και μεταβολής του φορτίου. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί ένα μείγμα συμπιεσμένου αέρα και καυσίμου, έτσι ώστε όταν αυτό εκτονωθεί, σε συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, να παραχθεί μηχανικό έργο με αποτέλεσμα την κίνηση κάποιας γεννήτριας. Για τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων χρησιμοποιείται συνήθως φυσικό αέριο, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ελαφρά κλάσματα πετρελαίου.



### 2.3.3 Μικροτουρμπίνες

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικροί αεριοστρόβιλοι με ισχύες που κυμαίνονται από 25 έως 300 kW. Οι περισσότερες μικροτουρμπίνες είναι σήμερα σχεδιασμένες για κύριες μηχανές παραγωγής και κάνουν χρήση προθερμαντήρα αέρα καύσης για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων, ενώ αυτές που δεν προθερμαίνουν τον αέρα παράγουν υψηλότερης θερμοκρασίας καυσαέρια και γίνονται έτσι κατάλληλες για βιομηχανικές εφαρμογές, παρά το μικρότερο βαθμό ηλεκτρικής απόδοσής τους. Τυπικά, λειτουργούν με φυσικό αέριο, αλλά δέχονται για λειτουργία και άλλα βιομηχανικά καύσιμα όπως προπάνιο, diesel και κηροζίνη. Είναι επίσης ικανές να παράγουν ανανεώσιμη ενέργεια αν τροφοδοτηθούν με βιοαέριο.

### 2.3.4 Κυψέλες καυσίμου

Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβα, καθαρά και αποδοτικά τοπικά συστήματα παραγωγής που χρησιμοποιούν μια ηλεκτροχημική διεργασία για τη μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρισμό. Επιπροσθέτως της παροχής ενέργειας, μπορούν να προσφέρουν μια πηγή θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση του χώρου και του νερού ή για ψύξη απορρόφησης. Σε κάποιες έρευνες έχει αποδειχθεί ότι οι κυψέλες καυσίμου μειώνουν το κόστος για τις υπηρεσίες ηλεκτρισμού 20 με 40%. Οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμων χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Πολυμερών Ηλεκτρολυτών (PEMFC)
- Φωσφορικού Οξέος (PAFC)
- Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MCFC)
- Στερεών Οξειδίων (SOFC)
- Αλκαλικές (AFC)
- Άμεσης Μεθανόλης (DMFC) [2.7].

### 2.3.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)

Ανανεώσιμη ενέργεια είναι η ενέργεια που αντλείται από πηγές, οι οποίες δεν εξαντλούνται ή αντικαθίστανται, όπως η αιολική, η ηλιακή, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική και η ενέργεια από βιομάζα. Οι ΑΠΕ πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν ρυπαίνει το περιβάλλον και η αξιοποίησή τους έγκειται μόνο στην ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα δεσμεύουν το δυναμικό τους.

#### 2.3.5.1 Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται ευρέως σε μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής και απαιτεί την κατασκευή μεγάλων φραγμάτων σε ποτάμια, κάτι το

οποίο μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρό, αλλά και να έχει ποικίλες περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις. Ωστόσο, ως Διεσπαρμένη Παραγωγή χρησιμοποιούνται μικρά υδροηλεκτρικά, για τα οποία δεν απαιτούνται μεγάλα έργα αποθηκείωσης. Η συμβολή τους στις ενεργειακές ανάγκες μιας περιοχής μπορεί να είναι σημαντική, όμως σε εθνικό επίπεδο παραμένει περιορισμένη.

### 2.3.5.2 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια, η οποία εκμεταλλεύεται τη φωτεινή και τη θερμική ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο, αξιοποιείται σήμερα για την παραγωγή απευθείας ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται σχεδόν αποκλειστικά μέσω των Φωτοβολταϊκών συστημάτων, ενώ περιορισμένη είναι ακόμα η χρήση ηλιοθερμικών σταθμών. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες, ή αλλιώς ηλιακές κυψέλες, μετατρέπουν απευθείας το φως του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεντρώνονται σε επίπεδα πάνελ τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε ταράτσες ή άλλες ηλιόλουστες περιοχές. Παράγουν ηλεκτρισμό χωρίς να έχουν κινούμενα μέρη, λειτουργούν αθόρυβα και χωρίς εκπομπές. Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί συγκεντρώνουν τις ηλιακές ακτίνες μέσω ηλιακών συλλεκτών, ώστε να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες και τελικά να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια.

### 2.3.5.3 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αξιοποιείται μέσω των Ανεμογεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Μια τουρμπίνα με πτερωτές τοποθετείται στην κορυφή ενός ψηλού πύργου. Ο πύργος είναι ψηλός ούτως ώστε να αξιοποιείται η μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου, απαλλαγμένη από τις αναταράξεις που προέρχονται από τη μεσολάβηση εμποδίων όπως δέντρα, λόφοι και κτίρια. Όπως περιστρέφεται η τουρμπίνα με τον άνεμο, μια γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να ποικίλλει σε μέγεθος από λίγα kW σε οικιακές εφαρμογές έως πάνω από 5 MW. Παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, λόγω της υψηλής της διακύμανσης και γιατί είναι η μόνη από τις ΑΠΕ με την οποία παράγεται ηλεκτρική ενέργεια σε τιμές συγκρίσιμες με των συμβατικών πηγών και σε μεγάλες σχετικά ισχύες.

### 2.3.5.4 Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα εσωτερικών στρωμάτων της γης, η οποία γίνεται εκμεταλλεύσιμη όταν υπάρχουν κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες. Υπάρχει ένα πλήθος εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμική ενέργεια, το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται από 10MW μέχρι και άνω των 100MW.

### 2.3.5.5 Ενέργεια από τη Βιομάζα

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 παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη βιομάζα έχει ποικίλα περιβαλλοντολογικά οφέλη και για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί αρκετές μελέτες, οι περισσότερες εκ των οποίων χρησιμοποιούν γεωργικά απόβλητα, λύνοντας παράλληλα το πρόβλημα της αποκομιδής τους. Ωστόσο, η ενέργεια της βιομάζας μετατρέπεται σε ηλεκτρική κατά κανόνα μέσω ενδιάμεσων προϊόντων και έτσι το κόστος της παραμένει αρκετά υψηλό [2.8].

### 2.3.6 Τεχνολογίες αποδοτικής χρήσης ενέργειας

Τα αποδοτικά ενεργειακά συστήματα έχουν ως στόχο τη χρησιμοποίηση της ενέργειας με τον οικονομικά αποτελεσματικότερο τρόπο. Τεχνολογίες, όπως η αποθήκευση ενέργειας, η συμπαραγωγή θερμότητας-ηλεκτρισμού και ο έλεγχος φορτίου, μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση πρωτογενών ενεργειακών πόρων και να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ειδικά σε μικρά δίκτυα ή δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας ποικίλουν από παραδοσιακές μπαταρίες μολύβδου-οξέος και νικελίου-καδμίου, μέχρι προηγμένα ηλεκτροχημικά συστήματα (επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου και αναστρέψιμες κυψέλες καυσίμου), σύνθετους σφονδύλους και υπεραγωγίσιμους μαγνήτες. Χρησιμοποιούνται κυρίως για τη διόρθωση πτώσεων τάσης, flicker και έντονης κυμάτωσης. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως Συστήματα Αδιάλειπτου Παροχής Ενέργειας (UPS). Σαν τέτοια, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται τεχνολογίες Διεσπαρμένης Παραγωγής. Οι μπαταρίες (οι οποίες είναι ηλεκτροχημικά συστήματα) μπορούν να καλύψουν ένα ευρύτερο φάσμα αναγκών, από ορισμένα MW σε διάστημα κάποιων ωρών έως λίγα kW εντός μερικών δευτερολέπτων. Οι σφόνδυλοι τείνουν να έχουν μικρότερη ενεργειακή χωρητικότητα, αλλά σχετικά καλό χρόνο απόκρισης ενώ οι υπεραγωγίσιμοι μαγνήτες μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλή ενέργεια για ένα μικρό χρονικό διάστημα, αλλά με εξαιρετικά υψηλό χρόνο απόκρισης.

Η συμπαραγωγή θερμότητας-ηλεκτρισμού χρησιμοποιεί τη θερμότητα που αποβάλλεται από μια ποικιλία πηγών παραγωγής (συμπεριλαμβανομένων μηχανών καύσης, γεννητριών diesel ακόμα και ορισμένων συστημάτων κυψελών καυσίμων), για να παρέχει ζεστό νερό, θέρμανση του χώρου ή θερμική ενέργεια για βιομηχανικές διαδικασίες, αυξάνοντας έτσι, τη συνολική απόδοση χρήσης της ενέργειας στην εγκατάσταση συμπαραγωγής.

Σύγχρονα δίκτυα έχουν χρησιμοποιήσει συσκευές ελέγχου φορτίου, για να μειώσουν φορτία αιχμής, όπως ο κλιματισμός. Τέτοιοι έλεγχοι θα μπορούσαν να βοηθήσουν διαχειριστές δικτύων μικρότερης κλίμακας ώστε να προσαρμόσουν την κατανομή φορτίου ή για να αντισταθμίσουν την ισχύ εξόδου μιας εγκατάστασης ΑΠΕ.

## 2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή παρουσιάζει ένα πλήθος πλεονεκτημάτων όσον αφορά θέματα οικονομικής και περιβαλλοντολογικής φύσεως, αλλά και όσον αφορά θέματα τεχνικής φύσεως, καθώς προσφέρει ποικίλα οφέλη στη λειτουργία του δικτύου. Συγκεντρωτικά, τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την εισαγωγή μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στα δίκτυα διανομής, είναι [2.6] :

- Η Διεσπαρμένη Παραγωγή καλύπτει μία πολύ ευρεία ομάδα τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου πολλών ανανεώσιμων τεχνολογιών που παρέχουν ισχύ μικρής κλίμακας, σε τοποθεσία κοντά στους χρήστες. Όλες αυτές οι τεχνολογίες δημιουργούν νέες ευκαιρίες στην αγορά και αυξημένο βιομηχανικό ανταγωνισμό.
- Η παραγωγή της ενέργειας κοντά στην τοποθεσία κατανάλωσης, ελαχιστοποιεί τις απώλειες μεταφοράς, όπως επίσης και το κόστος μεταφοράς, που αποτελεί ένα σημαντικό μέρος (πάνω από το 30%) του συνολικού κόστους του ηλεκτρισμού.
- Η τροφοδότηση των φορτίων από τις μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής, μειώνει σημαντικά τις απώλειες ισχύος στις γραμμές διανομής, όπως θα φανεί και από την ανάλυση που πραγματοποιείται στα πλαίσια της εργασίας αυτής.
- Η Διεσπαρμένη Παραγωγή βοηθά στην αποσυμφόρηση των ήδη υπαρχόντων δικτύων. Επιπρόσθετα, αυξάνει τη συνολική απόδοση του συστήματος, επιτρέποντας τη χρήση της θερμικής ενέργειας σε εφαρμογές συμπαραγωγής.
- Η διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής σε ένα δίκτυο μπορεί να βελτιώσει το προφίλ της τάσης του δικτύου, μειώνοντας τις διακυμάνσεις της τάσης των διαφόρων ζυγών, ενώ παράλληλα μειώνεται η ισχύς αιχμής του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι ένα μέρος του φορτίου θα τροφοδοτείται από τη Διεσπαρμένη Παραγωγή και επομένως η ισχύς που απαιτείται από τους σταθμούς διανομής, ή αλλιώς από την πηγή, θα είναι μειωμένη, άρα μικρότερες θα είναι και οι πτώσεις τάσεις κατά μήκος κάποιων γραμμών του συστήματος.
- Όσο αυξάνεται η ζήτηση για περισσότερη και καλύτερης ποιότητας ηλεκτρική ενέργεια, η Διεσπαρμένη Παραγωγή παρέχει εναλλακτικές λύσεις για αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία σε νοικοκυριά και επιχειρήσεις. Μπορεί να εξασφαλίσει στους πελάτες ότι η παροχή είναι συνεχόμενη και αξιόπιστη, αποκαθιστώντας την ηλεκτρική ενέργεια σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, σε περιπτώσεις όπου υπάρχει διακοπή ηλεκτροδότησης.
- Η Διεσπαρμένη Παραγωγή παρέχει επίσης πολλά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές που έχουν θερμικά φορτία, μέσω των εφαρμογών συμπαραγωγής, καθώς επίσης και σε εκείνους που έχουν πρόσβαση σε φτηνά καύσιμα, όπως για παράδειγμα φυσικό αέριο. Επίσης δίνουν την δυνατότητα σε καταναλωτές που ευνοούνται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής που κατοικούν, να αξιοποιήσουν τις ανανεώσιμες πηγές.
- Η εκτεταμένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βοηθάει στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου αλλά και σε επιβλαβείς εκπομπές, όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου, συνεισφέροντας έτσι με ουσιαστικό τρόπο στην προστασία του περιβάλλοντος.

- Προσφέρει ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η επιλογή των παραδοσιακών γραμμών διανομής είναι πολύ δαπανηρή λύση. Τέτοιες περιοχές όπως πύργοι κεραιών, μικρά απομακρυσμένα χωριά ή πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου στον ωκεανό βρίσκονται εκτός του ηλεκτρικού δικτύου και επωφελούνται από τη Διεσπαρμένη Παραγωγή ως βασική πηγή ενέργειας.
- Είναι πρακτικά πιο εύκολο να βρεθούν τοποθεσίες για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλες Διεσπαρμένες Παραγωγές από ότι για ένα μεγάλο, κεντρικό εργοστάσιο παραγωγής ισχύος και μάλιστα οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και κυρίως πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο. Η έκθεση και το ρίσκο του κεφαλαίου μειώνονται, και αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.

## 2.5 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η εισαγωγή των αποκεντρωμένων μονάδων παραγωγής ενέργειας, σε ευρεία κλίμακα, είναι πιθανό να οδηγήσει σε μερική αστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η αμφίδρομη ροή ισχύος και η σύνθετη διαχείριση ενέργειας, που απαιτεί η Διεσπαρμένη Παραγωγή, μπορούν να εμφανίσουν προβλήματα και να οδηγήσουν σε έντονη διακύμανση της τάσης. Συγκεντρωτικά, τα μειονεκτήματα της Διεσπαρμένης Παραγωγής, είναι [2.9] :

- Το σχετικά υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, συγκριτικά με τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής. Επιπλέον, διαφορές υπάρχουν και στα κόστη κεφαλαίου για διαφορετικές τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής και μπορούν να ποικίλλουν από 1000 €/kW έως 20000 €/kW στις μηχανές εσωτερικής καύσης και τις κυψέλες καυσίμου, αντίστοιχα.
- Η αυξανόμενη συμμετοχή της Διεσπαρμένης Παραγωγής στην εγκατεστημένη παραγωγή θα επιφέρει μικρότερη επιλογή μεταξύ των βασικών καυσίμων. Δεδομένου ότι οι περισσότερες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής βασίζονται πρωταρχικά στο αέριο, αναμένεται έντονα αυξημένη ζήτηση και εξάρτηση από αυτό.
- Το κόστος για την πρωταρχική παροχή καυσίμου στη Διεσπαρμένη Παραγωγή θα είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι για την κεντρική παραγωγή.
- Πολλές φορές δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων εγκαταστάσεων παραγωγής, καθώς σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρξουν αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών, όπως είναι οι ανεμογεννήτριες. Έτσι υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με το ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές, ενώ πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι τα νησιά.
- Ένας αυξημένος αριθμός μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής μπορεί να προκαλέσει ροή ισχύος, από τη χαμηλή τάση προς το δίκτυο μέσης τάσης. Έτσι, απαιτούνται διαφορετικά μέσα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης.

- Αύξηση των παραγόμενων αρμονικών στο δίκτυο από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.

## 2.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] P. Dondi, D. Bayoumi, C. Haederli, D. Julian, and M. Suter, "Network integration of distributed power generation," *Journal of Power Sources*, vol. 106, no. 1-2, pp.1-9, Apr. 2002.
- [2.2] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy Policy*, vol. 33, pp.787-798, 2005.
- [2.3] CIGRE (International Council on Large Electric Systems), "Development of Dispersed Generation and Consequences for Power Systems," WG C6.01 (ex 37.33) final report, Jul. 2003.
- [2.4] A. Changers, "Distributed Generation: A Nontechnical Guide," PennWell, Tulsa, Oklahoma, p. 283, 2001.
- [2.5] T. Ackerman, G. Andersson, and L. Soder, "distributed generation: a definition," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [2.6] W. El-Khattam and M. M. A. Salama, "Distributed generation technologies, definitions and benefits," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, no. 2, pp. 119–128, 2004.
- [2.7] Α. Γ. Τσικαλάκης, "Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης", Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2008.
- [2.8] Μ. Π. Παπαδόπουλος, "Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1997.
- [2.9] J. A. P. Lopes, "Integration of dispersed generation on distribution networks impact studies," in Proc. 2002 *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 323-328, Jan. 2002.

## **ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ**

### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στα συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές, μέσω ενός παθητικού συστήματος διανομής, με μονόδρομη ροή ισχύος. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, οι τεχνολογικές βελτιώσεις και η επείγουσα ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια φιλική προς το περιβάλλον έχουν οδηγήσει το ενδιαφέρον στο σχεδιασμό συστημάτων διανομής με αξιοποίηση της Διεσπαρμένης Παραγωγής.

Σε δίκτυα διανομής με σημαντική διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής, η ροή της ισχύος μπορεί να αντιστραφεί και το δίκτυο διανομής δεν είναι πλέον ένα παθητικό κύκλωμα που εφοδιάζει τα φορτία, αλλά ένα ενεργό σύστημα με τις ροές ισχύος και τις τάσεις να καθορίζονται τόσο από την παραγωγή όσο και από το φορτίο. Αυτή η σημαντική αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου μπορεί να επηρεάσει το σύστημα και τους καταναλωτές τόσο οικονομικά, όσο και τεχνικά. Για να αποφευχθεί η υποβάθμιση των υπηρεσιών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι απαραίτητη η βέλτιστη κατανομή των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στα συστήματα διανομής [3.1].

### **3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

Η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει κάνει επιτακτική την ανάγκη βέλτιστου σχεδιασμού των δικτύων, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη από την διείσδυση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής. Για το λόγο αυτό, έχει πραγματοποιηθεί σημαντική έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση.

Όπως κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης, έτσι και η βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στα δίκτυα διανομής αποτελεί αντικείμενο πολυκριτηριακής ανάλυσης και σχεδιασμού με πολλούς περιορισμούς. Γενικά όμως, η μεγιστοποίηση των οφελών σε ένα πρόβλημα σχεδιασμού σημαίνει την ελαχιστοποίηση του κόστους, με την παράλληλη διατήρηση της απόδοσης του συστήματος σε αποδεκτά όρια. Οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής κατηγοριοποιούνται, με βάση τα διαφορετικά κριτήρια που βελτιστοποιούνται, ως εξής:

1. Ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος
2. Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους
3. Μεγιστοποίηση της διείσδυσης της Διεσπαρμένης Παραγωγής.

Παρακάτω, γίνεται αναφορά σε άρθρα που έχουν δημοσιευθεί, στο θέμα της βέλτιστης τοποθέτησης των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής.

### 3.2.1 Ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος

Στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας οι απώλειες ισχύος αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της παραγόμενης ισχύος και για αυτό είναι πολύ σημαντική η μείωσή τους. Ο λόγος είναι ότι τα δίκτυα διανομής συνδέουν τους καταναλωτές με το δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης και έτσι, λόγω της σχετικά πιο χαμηλής τάσης, έχουν μεγαλύτερη τιμή ρεύματος και επομένως οι απώλειες ισχύος είναι σημαντικά μεγαλύτερες στα δίκτυα διανομής, σε σχέση με τα δίκτυα υψηλής τάσης. Μία λύση για τη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος των δικτύων διανομής είναι η τοποθέτηση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής. Μελέτες όμως έχουν δείξει ότι, η ακατάλληλη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερες απώλειες ισχύος.

Με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος, οι Nara et al. [3.2] χρησιμοποίησαν έναν αλγόριθμο απαγορευμένων καταστάσεων (Tabu search), ώστε να υπολογίσουν το ποσοστό μείωσης των απωλειών ισχύος, μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδας Διεσπαρμένης Παραγωγής σε δίκτυο διανομής. Οι Kyu-Ho et al. [3.3] πρότειναν έναν γενετικό αλγόριθμο ασαφούς λογικής, για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στα δίκτυα διανομής. Αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος θεωρήθηκε η συνάρτηση κόστους απωλειών ισχύος, ενώ σαν περιορισμοί τέθηκαν το μέγεθος και ο αριθμός των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής, και τα όρια της τάσης στους ζυγούς.

Στο ίδιο πλαίσιο, οι Caisheng και Nehrir [3.4] χρησιμοποίησαν μια αναλυτική έκφραση για να καθορίσουν τη βέλτιστη θέση για τις μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής, τόσο σε ακτινικά, όσο και σε βρογχοειδή δίκτυα με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Στην εργασία αυτή, θεωρήθηκε ότι το φορτίο είναι ομοιόμορφα, κεντρικά κατανεμημένο και παρουσιάστηκαν σενάρια με χρονικά αμετάβλητες και χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές φορτίου και ισχύος από τις μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής. Οι Davidson και Ijumba [3.5] πρότειναν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής σε ένα δίκτυο διανομής πολλών ζυγών. Ο κύριος στόχος είναι να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες των γραμμών, ικανοποιώντας τους περιορισμούς μεταφοράς και τη ζήτηση των καταναλωτών. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας νέας έκφρασης που ερευνά τη συμπεριφορά των απωλειών δικτύου σε σχέση με την αλλαγή της τάσης.

Οι Acharya, Mahat και Mithulananthan [3.6] χρησιμοποίησαν μια αναλυτική έκφραση για τον υπολογισμό του βέλτιστου μεγέθους των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής σε διάφορους ζυγούς του συστήματος διανομής και πρότειναν μια μέθοδο για τη μείωση των συνολικών απωλειών. Στην εργασία των Hedayati, Nabaviniaki και Akbarimajd [3.7] προτάθηκε μια μέθοδος για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής σε ένα δίκτυο διανομής, με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στον προσδιορισμό των ζυγών που είναι οι πιο ευαίσθητοι στην κατάρρευση της τάσης, με χρήση ενός προγράμματος DC ροής φορτίου. Μετά τον προσδιορισμό των ευαίσθητων ζυγών, μια μονάδα Διεσπαρμένης Παραγωγής, συγκεκριμένης ισχύος, μπορεί να



εγκατασταθεί σε αυτό το ζυγό. Μετά την εγκατάσταση της μονάδας, εκτελείται η ροή φορτίου και στη συνέχεια υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση. Εάν η εκτίμηση της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ακατάλληλη, τότε ο αλγόριθμος αυτός επαναλαμβάνεται.

Στην εργασία των Kim, Nam, Park και Singh [3.8] χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Hereford ranch για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απωλειών ισχύος, με τη βοήθεια μίας εξίσωσης Lagrange. Οι Gandomkar, Vakilian και Ehsan [3.9] ενσωμάτωσαν τη μέθοδο αναζήτησης με περιορισμένες καταστάσεις στη φάση παραγωγής του γενετικού αλγόριθμου στην προσπάθειά τους να εντοπίσουν τις βέλτιστες θέσεις για τις μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής, με κριτήριο την βελτιστοποίηση της ισχύος και την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω αρμονικής παραμόρφωσης. Οι Quezada, Abbad και Roman [3.10] προσδιόρισαν τη βέλτιστη διείσδυση διαφορετικών μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής, αναλύοντας τις επιπτώσεις που έχουν τα διαφορετικά επίπεδα διείσδυσης στις ετήσιες απώλειες ισχύος.

### 3.2.2 Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους

Ένας σημαντικός και πολλές φορές αποτρεπτικός παράγοντας για την εγκατάσταση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στα συστήματα διανομής αποτελεί το υψηλό κόστος που σχετίζεται με αυτές. Εκτός από το αρχικό κόστος επένδυσης που απαιτείται, υπολογίσιμο είναι επίσης και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής. Επίσης, εισάγεται και το κόστος της ενέργειας που δεν εξυπηρετείται, όπως συμβαίνει σε περιπτώσεις σφαλμάτων.

Οι Agalgaonkar et al. [3.11] πρότειναν μια πολυπαραμετρική μέθοδο λήψης αποφάσεων για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τεχνολογίας Διεσπαρμένης Παραγωγής που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικούς τύπους φορτίου, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος παραγωγής. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε σε τρεις τύπους δικτύων: συμβατικά δίκτυα, υβριδικά δίκτυα και μικροδίκτυα. Τα χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι οι οριακές απώλειες, το κόστος κεφαλαίου και ο χρόνος στον οποίο η ζήτηση δεν εξυπηρετείται, για όλες τις περιπτώσεις δικτύων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η Διεσπαρμένη Παραγωγή σε μικροδίκτυα, καθώς και σε υβριδικά συστήματα, είναι αποδεκτές στρατηγικές για συνθήκες χαμηλής ζήτησης φορτίου. Οι Celli et al. [3.12] παρουσίασαν μια μεθοδολογία, βασισμένη σε ένα γενετικό αλγόριθμο για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής σε υφιστάμενα δίκτυα διανομής, που δίνει τη δυνατότητα στο διαχειριστή του δικτύου να αποφασίσει, σχετικά με το κόστος της αναβάθμισης του δικτύου, το κόστος των απωλειών ενέργειας, το κόστος της ενέργειας που δεν παρέχεται, και το κόστος της ενέργειας που απαιτείται για να εξυπηρετήσει τους καταναλωτές.

Στην εργασία των Celli και Pilo [3.13] τέθηκε ως κριτήριο η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων τόσο των σταθερών, όσο και των μεταβλητών δαπανών. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος αγοράς ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς και από τις μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής, η αξιολόγηση της διείσδυσης της Διεσπαρμένης Παραγωγής γίνεται πιο αξιόπιστη.

Οι Brown et al. [3.14] πρότειναν έναν αλγόριθμο διαδοχικών αποβολών για την επέκταση των δικτύων διανομής. Ο αλγόριθμος αυτός ξεκινά με όλες τις επιλογές επέκτασης

(νέες γραμμές, αναβαθμισμένες γραμμές, νέοι υποσταθμοί, αναβαθμισμένοι υποσταθμοί και μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής) και στη συνέχεια αποκλείει τις λιγότερο συμφέρουσες οικονομικά επιλογές, έως ότου καταλήξει στην αποδοτικότερη επέκταση που παράλληλα δεν παραβιάζει τους περιορισμούς του συστήματος. Το κύριο μειονέκτημα της εργασίας αυτής είναι ότι ο αλγόριθμος διαδοχικών αποβολών, βρίσκει μόνο τοπικά βέλτιστες λύσεις.

Οι El-Khattam, Hegazy και Salama [3.15] πρότειναν μια ντετερμινιστική τεχνική βελτιστοποίησης, που καθορίζει τις βέλτιστες θέσεις και τα μεγέθη των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής που απαιτούνται για την κάλυψη της αύξησης του φορτίου. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις επενδύσεις κεφαλαίου, όσο και το κόστος της Διεσπαρμένης Παραγωγής. Επίσης συμπεριλαμβάνεται η σύγκριση μεταξύ της παραγωγής ενέργειας από τη μονάδα Διεσπαρμένης Παραγωγής και την αγορά ενέργειας από το κύριο δίκτυο μέσω του υποσταθμού. Το κύριο πλεονέκτημα της εργασίας είναι η καινοτομία χρησιμοποίησης δυαδικών μεταβλητών για την επιλογή μεταξύ των προτεινόμενων σεναρίων, ενώ μειονέκτημά της αποτελεί η προκαθορισμένη δυναμικότητα των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής.

Στην εργασία των El-Khattam et al. [3.16] χρησιμοποιήθηκε μια ευρετική μέθοδος για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής, μέσω μιας ανάλυσης κόστους-οφελών, από τη σκοπιά μιας εταιρείας διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

### 3.2.3 Μεγιστοποίηση της διείσδυσης της Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η αλλαγή του επιπέδου της τάσης, η αύξηση των αρμονικών που ρέουν στο δίκτυο και ο κίνδυνος για την ευστάθεια του συστήματος, λόγω της διακύμανσης στη συχνότητα των αυτόνομων συστημάτων που προκαλείται από τη μεταβλητότητα της παραγόμενης ισχύος των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής αιολικής κυρίως ισχύος, έχουν θέσει όρια στη διείσδυση της Διεσπαρμένης Παραγωγής. Για το λόγο αυτό, έχει πραγματοποιηθεί σημαντική έρευνα για τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης της Διεσπαρμένης Παραγωγής στα συστήματα διανομής.

Οι Carpinelli et al. [3.17] πρότειναν μια διαδικασία τριών βημάτων, βασισμένη σε γενετικούς αλγόριθμους και στη θεωρία αποφάσεων, για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στα συστήματα διανομής με στόχο τη μεγιστοποίηση της παρεχόμενης ισχύος από αυτές. Η διαδικασία λαμβάνει υπόψη, τόσο την αβεβαιότητα που εισάγει η Διεσπαρμένη Παραγωγή, όσο και τεχνικούς περιορισμούς όπως η χωρητικότητα των γραμμών και το προφίλ της τάσης.

Στην εργασία τους [3.18], οι Keane και O'Malley ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στο δίκτυο διανομής. Αντικειμενική συνάρτηση έθεσαν τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης της Διεσπαρμένης Παραγωγής στο σύστημα, ενώ τέθηκαν περιορισμοί όπως όρια των τάσεων στους ζυγούς, θερμικά όρια των γραμμών, ενεργειακοί πόροι και η εξυπηρέτηση των καταναλωτών. Η μεθοδολογία αυτή εξασφαλίζει τη μέγιστη αξιοπιστία του δικτύου, αλλά αγνοεί τις απώλειες ισχύος.

Οι Greatbanks et al. [3.19] και Popovic et al. [3.20] πρότειναν μια επαναληπτική μέθοδο για τη μεγιστοποίηση του αριθμού των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής που

μπορούν να συνδεθούν στο σύστημα. Χρησιμοποίησαν μια ανάλυση εξισώσεων ροής φορτίου, τόσο για την ευαισθησία της τάσης, όσο και για την ευαισθησία των απωλειών ισχύος, για τον εντοπισμό των καλύτερων θέσεων για την τοποθέτηση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στο σύστημα διανομής. Οι Keane και O'Malley [3.21] πρότειναν μια νέα προσέγγιση για την κατανομή των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στα δίκτυα. Η εργασία τους έδειξε ότι τα οφέλη από τη διείσδυση της Διεσπαρμένης Παραγωγής μεγιστοποιούνται, όταν παράλληλα ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ισχύος.

Οι Harrison και Wallace [3.22] πρότειναν μια τεχνική βέλτιστης ροής ισχύος, για την προσομοίωση της αύξησης της διείσδυσης μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής, σε προκαθορισμένες θέσεις του δικτύου. Για το λόγο αυτό, μοντελοποίησαν την παραγωγή της Διεσπαρμένης Παραγωγής ως αρνητικά φορτία και μεγιστοποίησαν τη διείσδυση, αυξάνοντας τα επίπεδα φορτίου. Οι Ochoa, Dent και Harrison [3.23] πρότειναν μια πολυπεριοδική ανάλυση σταθερής κατάστασης για τη μεγιστοποίηση της σύνδεσης της διακοπτόμενης Διεσπαρμένης Παραγωγής μέσω μιας τεχνικής βέλτιστης ροής ισχύος. Η προτεινόμενη τεχνική έλαβε υπόψη τόσο τα διαφορετικά επίπεδα φόρτισης του υπό μελέτη συστήματος, όσο και την διακοπτόμενη φύση του ανέμου.

Οι Keane και O'Malley [3.24, 3.25] πρότειναν μια τεχνική μικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού, για τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού διαφορετικών τεχνολογιών Διεσπαρμένης Παραγωγής. Η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει παράγοντες προσαρμογής απωλειών μαζί με παράγοντες μεμονωμένης παραγωγής φορτίου, διευκολύνοντας έτσι τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής για ένα τμήμα του δικτύου.

### 3.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] T. Ackerman, G. Andersson, and L. Soder, "distributed generation: a definition," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [3.2] K. Nara, Y. Hayashi, K. Ikeda, and T. Ashizawa, "Application of tabu search to optimal placement of distributed generators," in *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001. IEEE, 2001, pp. 918-923 vol.2.
- [3.3] K. Kyu-Ho, L. Yu-Jeong, R. Sang-Bong, L. Sang-Kuen, and Y. Seok-Ku, "Dispersed generator placement using fuzzy-GA in distribution systems," in *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2002 IEEE, 2002, pp. 1148-1153 vol.3.
- [3.4] W. Caisheng and M. H. Nehrir, "Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 2068-2076, 2004.
- [3.5] I. E. Davidson and N. M. Ijumba, "Optimization model for loss minimization in a deregulated power distribution network," in *Africon Conference in Africa*, 2002. IEEE AFRICON. 6th, 2002, pp. 887-894 vol.2.
- [3.6] N. Acharya, P. Mahat, and N. Mithulananthan, "An analytical approach for DG allocation in primary distribution network," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, pp. 669-678, 2006.

- [3.7] H. Hedayati, S. A. Nabaviniaki, and A. Akbarimajd, "A Method for Placement of DG Units in Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 1620-1628, 2008.
- [3.8] JO Kim, SW Nam, SK Park, C. Singh, "Dispersed generation planning using improved Hereford ranch algorithm," *Electric Power Systems Res*, vol. 47, pp. 678- 684, 1998
- [3.9] M. Gandomkar, M. Vakilian, and M. Ehsan, "A genetic- based tabu search algorithm for optimal DG allocation in distribution networks," *Electric Power Components and Systems*, vol. 33, no. 12, pp. 1351-1362, Dec. 2005.
- [3.10] V. H. M. Quezada, J. R. Abbad, and T. G. S. Roman, "Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, pp. 533-540, 2006.
- [3.11] A. P. Agalgaonkar, S. V. Kulkarni, and S. A. Khaparde, "Multi-attribute decision making approach for strategic planning of DGs," in *Power Engineering Society General Meeting*, 2005. IEEE, 2005, pp. 2985-2990 Vol. 3.
- [3.12] G. Celli, E. Ghiani, S. Mocci, and F. Pilo, "A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 750-757, 2005.
- [3.13] G. Celli and F. Pilo, "Penetration level assessment of distributed generation by means of genetic algorithms," in *IEEE Proc. Of Power System Conference Clemson, SC*, 2002.
- [3.14] R. E. Brown, P. Jiuping, F. Xiaorning, and K. Koutlev, "Siting distributed generation to defer T&D expansion," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2001 IEEE/PES, 2001, pp. 622-627 vol.2.
- [3.15] W. El-Khattam, Y. Hegazy, and M. Salama, "An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning," in *Power Engineering Society General Meeting*, 2005. IEEE, 2005, p. 2392 Vol. 3.
- [3.16] W. El-Khattam, K. Bhattacharya, Y. Hegazy, and M. M. A. Salama, "Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 1674-1684, 2004.
- [3.17] G. Carpinelli, G. Celli, F. Pilo, and A. Russo, "Distributed generation siting and sizing under uncertainty," in *Power Tech Proceedings*, 2001 IEEE Porto, 2001, p. 7 pp. vol.4.
- [3.18] A. Keane and M. O'Malley, "Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 1640-1646, 2005.
- [3.19] J. A. Greatbanks, D. H. Popovic, M. Begovic, A. Pregelj, and T. C. Green, "On optimization for security and reliability of power systems with distributed generation," in *Power Tech Conference Proceedings*, 2003 IEEE Bologna, 2003, p. 8 pp. Vol.1.
- [3.20] D. H. Popovic, J. A. Greatbanks, M. Begovic, and A. Pregelj, "Placement of distributed generators and reclosers for distribution network security and

- reliability," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 27, pp. 398-408, 2005.
- [3.21] A. Keane and M. O'Malley, "Impact of distributed generation capacity on losses," in *Power Engineering Society General Meeting*, 2006. IEEE, 2006, p. 7 pp.
- [3.22] G. P. Harrison. and A. R. Wallace, "Maximizing distributed generation capacity in deregulated markets," in *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*. vol. 2, 2003.
- [3.23] L. F. Ochoa, C. J. Dent, and G. P. Harrison, "Maximisation of intermittent distributed generation in active networks," in *SmartGrids for Distribution*, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar, 2008, pp. 1-4.
- [3.24] A. Keane and M. O'Malley, "Optimal distributed generation plant mix with novel loss adjustment factors," in *Power Engineering Society General Meeting*, 2006. IEEE, 2006, p. 6 pp.
- [3.25] A. Keane and M. O'Malley, "Optimal Utilization of Distribution Networks for Energy Harvesting," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 467-475, 2007.



## **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ**

### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη και την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών Διεσπαρμένης Παραγωγής έχει πρόσφατα παρατηρηθεί σε όλο τον κόσμο για διάφορους λόγους. Μεταξύ αυτών είναι, ο έλεγχος των εκπομπών ουσιών επιβλαβών για το περιβάλλον, ο περιορισμός της αύξησης του κόστους της ενέργειας που συνδέεται με τη χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας και η ενθάρρυνση προς τους ανεξάρτητους παραγωγούς για τη συμμετοχή τους στο σύστημα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αυτή που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η αιολική ενέργεια. Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας από τις Ανεμογεννήτριες μπορεί να αποφέρει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συγκρίσιμη με αυτή των συμβατικών σταθμών παραγωγής. Όπως είναι φυσικό όμως, η πρωτογενής πηγή ενέργειας σε ένα αιολικό σύστημα μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου, οπότε η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας απαιτεί την πλήρη κατανόηση των βασικών χαρακτηριστικών του ανέμου. Σε όλα τα στάδια ανάπτυξης και χρήσης της αιολικής τεχνολογίας, από την επιλογή κατάλληλης τοποθεσίας και τις μελέτες απόδοσης μιας αιολικής εγκατάστασης μέχρι το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών και την αλληλεπίδραση των αιολικών πάρκων με τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, η διερεύνηση των μηχανισμών στους οποίους υπόκεινται οι μεταβολές του ανέμου είναι ζωτικής σημασίας.

Δεν υπάρχει ένα μοναδικό μοντέλο για την ταχύτητα του ανέμου, αλλά διαφορετικές προσεγγίσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να την μοντελοποιήσουν. Για παράδειγμα, για τη χρονολογική μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιούνται χρονοσειρές, ενώ για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Η επιλογή της διαφορετικής προσέγγισης μοντελοποίησης γίνεται με βάση την εφαρμογή για την οποία προορίζεται (π.χ. μακροπρόθεσμοι σχεδιασμού, αξιολόγησης αξιοπιστίας) αλλά και την τεχνική υλοποίησής της (π.χ. αναλυτική, προσομοίωση Monte Carlo).

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διαφορετικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της τυχαίας συμπεριφοράς της ταχύτητας του ανέμου και συνοδεύονται με την εφαρμογή της κάθε προσέγγισης. Επίσης, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των Ανεμογεννητριών και ο τρόπος που η ταχύτητα του ανέμου καθορίζει την ενεργειακή απόδοσή τους. Τέλος, γίνεται αναφορά σε διαφορετικά μοντέλα που αναπαριστούν τη ζήτηση φορτίου.

## 4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις πιο τεχνολογικά προηγμένες και εμπορικά ανταγωνιστικές τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Προσφέρει σε πολλές χώρες την ευκαιρία να μειώσουν την εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα, ενώ ικανοποιεί τόσο τις ενεργειακές, όσο και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Λόγω της υψηλής μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου, που επηρεάζει άμεσα την παραγόμενη ισχύ των Ανεμογεννητριών, απαιτείται η κατάλληλη μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου, έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη ενσωμάτωση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στα δίκτυα διανομής.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τύποι μοντελοποίησης της ταχύτητας του ανέμου.

### 4.2.1 Χαρακτηριστικά του ανέμου

Οι άνεμοι αποτελούν κίνηση αερίων μαζών, η οποία προκαλείται κυρίως από διαφορές θερμοκρασιών εντός της ατμόσφαιρας. Οι διαφορετικές θερμοκρασίες και οι αντίστοιχοι άνεμοι οφείλονται:

- Στη διαφορά γεωγραφικού πλάτους, οπότε οι άνεμοι είναι σχετικά σταθεροί (εποχικοί άνεμοι, με μεγάλη περίοδο μεταβολής).
- Στη διαφορετική φύση και επιφάνεια του εδάφους (βουνά, πεδιάδες, θάλασσα κτλ.) και χαρακτηρίζονται από μικρή χρονικά διάρκεια (ημερήσια ή ωριαία).

Το κατώτερο μέρος της ατμόσφαιρας, μέσα στο οποίο υπάρχουν οι ανθρώπινες κατασκευές, ονομάζεται «ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα». Η σχετική ταχύτητα του αέρα μέσα στο στρώμα αυτό ως προς τη γη, μεταβάλλεται ανάλογα με τα εμπόδια που υπάρχουν στην επιφάνεια της γης. Δηλαδή αυξάνεται συνεχώς από το μηδέν, στην επιφάνεια της γης, μέχρι μιας σταθεράς τιμής στο άνω όριο του στρώματος, όπου η ροή μπορεί να θεωρηθεί ως ελεύθερη. Εντός αυτού του στρώματος η κίνηση του ανέμου είναι τυρβώδης, δηλαδή η ταχύτητά του δεν είναι σταθερή, αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

### 4.2.2 Ταχύτητα του ανέμου

Η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου είναι το άθροισμα της μέσης ταχύτητας και της τυρβώδους συνιστώσας του:

$$v_w(t) = v_m + v(t) \quad (4.1)$$

Η μέση ταχύτητα  $v_m$  υπολογίζεται από την σχέση (4.2):

$$v_m = \frac{1}{T} \int_0^T v_w(t) dt \quad (4.2)$$



Η μέτρηση της μέσης ταχύτητας γίνεται συνήθως με ανεμόμετρα τύπου κυπέλλου ή έλικας. Τα πιο σύγχρονα ανεμόμετρα, εκτός από τη μέτρηση της μέσης ταχύτητας, πραγματοποιούν και στατιστική ανάλυση του ανέμου.

Η μέση ταχύτητα μεταβάλλεται με το ύψος από το έδαφος σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{v_m(z)}{v_m(h)} = \left(\frac{z}{h}\right)^a \quad (4.3)$$

όπου  $z$  και  $h$  είναι δύο διαφορετικά ύψη και η παράμετρος  $a$  εξαρτάται από το είδος του εδάφους. Για παράδειγμα, σε θάλασσα ή άμμο ισούται με 0.1, ενώ σε προάστια πόλεως με 0.32.

Η τύρβη αποτελεί στατιστικό μέγεθος και εκφράζεται με τη βοήθεια της τυπικής απόκλισης και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

#### 4.2.3 Μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου με χρήση συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας

Η κατανομή της μέσης ταχύτητας του ανέμου είναι αυτή που καθορίζει κυρίως την απόδοση των συστημάτων αιολικής ενέργειας. Όταν η κατανομή της μέσης ταχύτητας του ανέμου είναι γνωστή, γίνεται εφικτός ο προσδιορισμός της ενεργειακής απόδοσης μιας μονάδας αιολικής ισχύος και συνεπώς αξιολογείται η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Η μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου με χρήση της κατάλληλης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας αποτυπώνει ένα ευρύ φάσμα δεδομένων για την ταχύτητα του ανέμου και για το λόγο αυτό, είναι κατάλληλη για μακροπρόθεσμα προβλήματα σχεδιασμού.

Η στατιστική κατανομή της ταχύτητας,  $v$ , του ανέμου σε μια συγκεκριμένη θέση περιγράφεται συνήθως από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull:

$$h(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.4)$$

όπου  $k$  είναι η παράμετρος μορφής της κατανομής και  $c$  η παράμετρος κλίμακας [4.1].

Η ικανοποιητική προσέγγιση της κατανομής της ταχύτητας του ανέμου από την παραπάνω σχέση, οφείλεται στην ύπαρξη των δυο ρυθμιζόμενων παραμέτρων,  $k$  και  $c$ , οι οποίες παρέχουν μεγάλη ευελιξία στη διαμόρφωση της συνάρτησης κατανομής. Όπως προκύπτει από τη σχέση (4.4), όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου  $k$ , η κατανομή προσεγγίζει την Κανονική κατανομή (Gauss) ενώ όσο αυξάνεται η παράμετρος  $c$ , η κατανομή μετατοπίζεται σε υψηλότερες ταχύτητες του ανέμου. Οι παράμετροι  $k$  και  $c$  υπολογίζονται, προσεγγιστικά, χρησιμοποιώντας την μέση ταχύτητα,  $v_m$ , και την τυπική απόκλιση,  $\sigma$ , της ταχύτητας του ανέμου ως εξής:

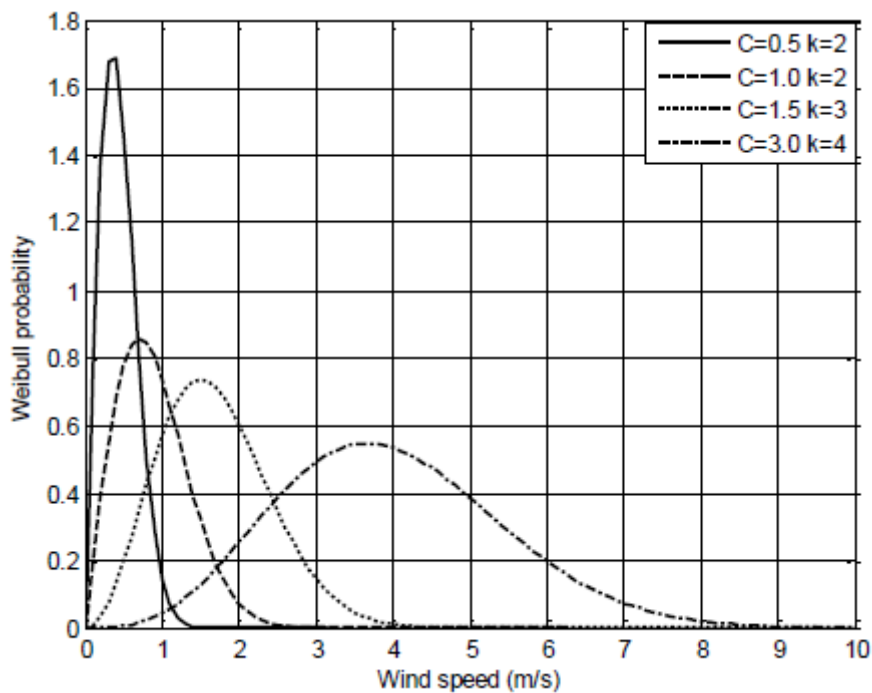
$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1.086} \quad (4.5)$$

$$c = \frac{v_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.6)$$

$$v_m = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (4.7)$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - v_m)^2 \right]^{0.5} \quad (4.8)$$

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η μορφή της κατανομής Weibull, για διαφορετικές τιμές παραμέτρων  $k$  και  $c$ .



**Σχήμα 4.1:** Μορφή της κατανομής Weibull για διαφορετικές τιμές παραμέτρων.

Όταν η παράμετρος  $k$  παίρνει την τιμή 2, η κατανομή ονομάζεται Rayleigh, όπως δίνεται και στη σχέση (4.9) και είναι αυτή που χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις. Αν η μέση ταχύτητα του ανέμου,  $v_m$ , είναι γνωστή σε μια τοποθεσία, η παράμετρος  $c$  υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$f(v) = \left( \frac{2v}{c^2} \right) e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (4.9)$$

$$v_m = \int_0^{\infty} v f(v) dv = \int_0^{\infty} \left( \frac{2v^2}{c^2} \right) e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} dv = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \quad (4.10)$$

$$c \approx 1.128v_m \quad (4.11)$$

Οι κατανομές Weibull και Rayleigh χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την τυχαία συμπεριφορά της ταχύτητας του ανέμου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, συνήθως ενός έτους. Επιπλέον, οι δυο αυτές κατανομές μπορούν να περιγράψουν την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου για μια τυπική ώρα της ημέρας.

#### 4.2.3.1 Ετήσια μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου

Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιούνται οι κατανομές Weibull ή Rayleigh για να περιγράψουν την ετήσια κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή που μελετάται. Αρχικά, από τα διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία, υπολογίζονται ο ετήσιος μέσος όρος και η τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου. Έπειτα, από τις σχέσεις (4.5) έως (4.8) υπολογίζονται οι παράμετροι  $k$  και  $c$ , και συνεπώς η μορφή της κατανομής Weibull ενώ αν πρόκειται για κατανομή Rayleigh υπολογίζεται η τιμή της παραμέτρου  $c$  από την σχέση (4.11) και προκύπτει η μορφή της κατανομής Rayleigh.

Το μοντέλο αυτό χαρακτηρίζεται από την απλότητά του και χρησιμοποιείται ευρέως για εφαρμογές μακροπρόθεσμου σχεδιασμού. Το κύριο μειονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι δεν λαμβάνεται υπόψη, πιθανός συσχετισμός της ταχύτητας του ανέμου με άλλες τυχαίες μεταβλητές του συστήματος που εξετάζεται, όπως η ζήτηση φορτίου.

#### 4.2.3.2 Ωριαία μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου

Στο μοντέλο αυτό, μια επιλεγμένη περίοδος μελέτης ενός έτους χωρίζεται σε τέσσερις εποχές, και μια τυπική ημέρα παράγεται για κάθε σεζόν, προκειμένου να παραστήσει την τυχαία συμπεριφορά της ταχύτητας του ανέμου κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου. Για την περιοχή που μελετάται, τα ωριαία δεδομένα της ταχύτητας ανέμου μοντελοποιούνται είτε από μια κατανομή Weibull ή από μια κατανομή Rayleigh. Η κατανομή που απαιτείται για τη μοντελοποίηση της ωριαίας ταχύτητα του ανέμου βασίζεται σε  $n$  χρόνια ιστορικών δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από την περιοχή που μελετάται.

Κάθε έτος χωρίζεται σε τέσσερις εποχές, με την κάθε εποχή να αντιπροσωπεύεται από οποιαδήποτε ημέρα εντός της εν λόγω περιόδου. Στη συνέχεια, τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί χρησιμοποιούνται, ώστε να υπολογιστεί η συχνότητα εμφάνισης των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου, σε μια τυπική ημέρα της κάθε εποχής. Η ημέρα που αντιπροσωπεύει κάθε εποχή υποδιαιρείται περαιτέρω σε 24 χρονικά τμήματα, που το καθένα αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μιας ώρας για όλη τη εποχή. Έτσι, υπάρχουν 96 χρονικά τμήματα για το έτος (24 για κάθε εποχή). Λαμβάνοντας υπόψη ότι ένας μήνας έχει 30 ημέρες, κάθε τμήμα έχει  $(90 \cdot n)$  παρατηρήσεις της ταχύτητας του ανέμου ( $n$  χρόνια  $\times$  30 ημέρες ανά μήνα  $\times$  3 μήνες ανά εποχή). Από αυτά τα δεδομένα, υπολογίζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για κάθε χρονικό τμήμα, και τέλος από τις σχέσεις (4.5) έως (4.11) δημιουργούνται οι κατανομές Weibull ή Rayleigh της ταχύτητας του ανέμου για κάθε ώρα.

Το μοντέλο αυτό παρέχει τη συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της ζήτησης φορτίου, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές μακροπρόθεσμες σχεδιασμού.

Ωστόσο, είναι πιο περίπλοκο και παράγει περισσότερες καταστάσεις για την ταχύτητα του ανέμου σε σύγκριση με το μοντέλο της ετήσιας ταχύτητας ανέμου.

#### 4.2.4 Μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου με χρήση χρονοσειρών

Μια χρονοσειρά είναι μια ακολουθία παρατηρήσεων, που λαμβάνονται σε ορισμένες χρονικές στιγμές ή περιόδους που ισαπέχουν μεταξύ τους. Η μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιώντας μια ανάλυση χρονοσειράς βασίζεται στο γεγονός ότι παρατηρήσεις που απέχουν μικρό χρονικό διάστημα, θα σχετίζονται πιο στενά μεταξύ τους από παρατηρήσεις που απέχουν σημαντικά ή μια από την άλλη. Επιπλέον, η ανάλυση χρονοσειρών εκμεταλλεύεται τη φυσική ροή του χρόνου και έτσι τιμές μιας χρονοσειράς ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος μπορούν να εκφραστούν ως συναρτήσεις των προηγούμενων τιμών.

Οι Billinton, Hua, και Ghajar [4.2] έδειξαν ότι τα χαρακτηριστικά της ταχύτητας του ανέμου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης κινητού μέσου όρου (auto regression moving average-ARMA). Το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης κινητού μέσου όρου, ARMA(p, q), αποτελείται από δύο τμήματα: το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης (AR) που περιέχει τους όρους της ταχύτητας του ανέμου που εξαρτώνται από τις προηγούμενες τιμές της ταχύτητας του ανέμου και το μοντέλο κινητού μέσου όρου (MA) που περιέχει τους κανονικά κατανομημένους τυχαίους όρους, όπως ο θόρυβος.

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η τιμή της ταχύτητας του ανέμου  $y_t$  για μια ώρα  $t$ , μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$y_t = \sum_{i=1}^p a_i y_{t-i} + e_t - \sum_{i=1}^q \theta_i e_{t-i} \quad (4.12)$$

Οι συντελεστές  $a_i$  και  $\theta_i$  μπορούν να υπολογιστούν από τα ιστορικά δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Η μεταβλητή  $e$  είναι μια ανεξάρτητη τυχαία μεταβλητή, κανονικά κατανομημένη με μέση τιμή 0 και διασπορά  $\sigma^2$ . Η σχέση (4.12) αναπαριστά μια χρονοσειρά για την μεταβλητή  $y$ , που μπορεί να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας μια τυχαία τιμή του όρου  $e_t$  κάθε χρονικό διάστημα και από τις προηγούμενες τιμές των  $y$  και  $e$ . Τέλος, η μοντελοποιημένη ωριαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου  $w_t$  δίνεται από την σχέση:

$$w_t = \mu_t + \sigma_t y_t \quad (4.13)$$

όπου  $\mu_t$  και  $\sigma_t$  είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της ωριαίας ταχύτητας του ανέμου για μια ώρα  $t$  αντίστοιχα, όπως έχουν προκύψει από τα ιστορικά δεδομένα της τοποθεσίας που μελετάται.

Το μοντέλο αυτό είναι πολύ χρήσιμο για εφαρμογές που απαιτούν την αναπαράσταση της ταχύτητας του ανέμου ως χρονοσειρά, όπως η ένταξη μονάδων και ο σχεδιασμός

αποθήκευσης. Εν τούτοις, το κύριο μειονέκτημά της είναι ο μεγάλος όγκος δεδομένων που απαιτούνται για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μοντέλου.

### 4.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν αρχικά την κινητική ενέργεια του αέρα σε μηχανική ενέργεια μέσω της περρωτής, και τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της γεννήτριας. Υπάρχουν πολλών ειδών ανεμογεννήτριες οι οποίες κατατάσσονται σε δυο βασικές κατηγορίες: 1) οριζόντιου άξονα, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικας και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους και 2) κατακόρυφου άξονα, ο οποίος παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν συνήθως δυο ή τρία πτερύγια. Οι ανεμογεννήτριες με δυο πτερύγια έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ελαφρύτερες, με αποτέλεσμα να είναι ευκολότερη η διαδικασία κατασκευής τους, άρα και φθηνότερη. Οι ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια έχουν κυριαρχήσει στην αγορά λόγω του ότι ο τρίπτερος δρομέας είναι αποδοτικότερος από τον δίπτερο, ενώ τα φορτία που ενεργούν σε κάθε πτερύγιο είναι μικρότερα.

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, είναι κατασκευαστικά απλούστερες από αυτές με οριζόντιο άξονα, διότι δεν απαιτούν πτερύγιο ή σύστημα αυτοματισμού για τον προσανατολισμό του δρομέα στη διεύθυνση πνοής του ανέμου και επιπλέον το σύστημα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας του δρομέα σε άλλη μορφή ενέργειας βρίσκεται στο έδαφος, στη βάση της ανεμογεννήτριας. Συνεπώς, τα έξοδα αυτοματισμού, συντήρησης ή επισκευών είναι σαφώς μικρότερα σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Λόγω όμως των ιδιόμορφων πτερυγίων είναι πολύ δύσκολη η κατασκευή τους αλλά και η μεταφορά τους στο σημείο εγκατάστασης. Προς το παρόν πάντως οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα δεν είναι οικονομικά ανταγωνιστικές των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.

#### 4.3.1 Δομή των ανεμογεννητριών

Τα βασικά μέρη κατασκευής μια ανεμογεννήτριας είναι τα εξής:

**Ο πύργος:** Μπορεί να είναι μεταλλικός (δικτυωτός ή συνηθέστερα σωληνωτός), αλλά και από οπλισμένο σκυρόδεμα για ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος. Ο πύργος υφίσταται σύνθετη στατική και κυρίως δυναμική καταπόνηση. Ο σχεδιασμός του ώστε να αποφεύγονται συνθήκες συντονισμού έχει βασική σημασία.

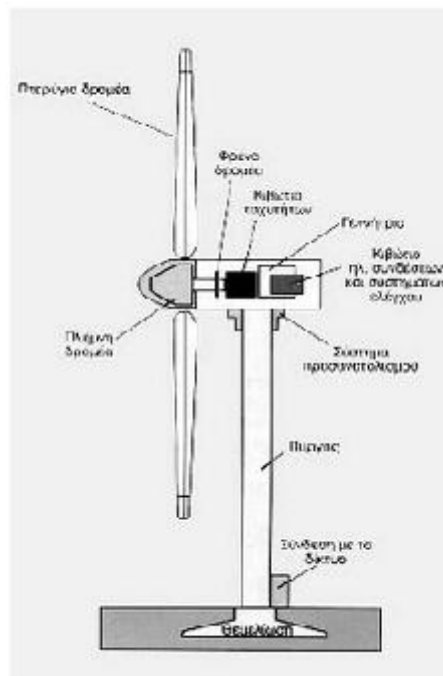
**Ο δρομέας (έλικα):** Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται με 2 ή 3 πτερύγια, τα οποία έχουν την αεροδυναμική μορφή των ελικών αεροπλάνων, με αρκετή συστροφή και συνεχή μείωση της διατομής τους από τη βάση προς τα άκρα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι πολυουρεθάνη, υαλόνημα και ξύλο για τις μικρές ανεμογεννήτριες, υαλονήματα σε πολλαπλές στρώσεις και εναλλαγή κατευθύνσεων για τις μεσαίες και ανθρακονήματα για τις μεγάλες.

Η στήριξη των πτερυγίων της έλικας στον άξονα του δρομέα μπορεί να είναι σταθερή (περύγιο σταθερού βήματος) ή μεταβλητή, δηλαδή να είναι δυνατή η περιστροφή του στο σημείο εδράσεως (περύγιο μεταβλητού βήματος). Οι παραλλαγές αυτές είναι μεγάλης σημασίας για τον έλεγχο ισχύος – στροφών της ανεμογεννήτριας.

**Ο χώρος των μηχανισμών (άτρακτος):** Η άτρακτος περιλαμβάνει το σύστημα εδράσεως του δρομέα στον πύργο, τον πολλαπλασιαστή στροφών, τη γεννήτρια, το φρένο, τους μηχανισμούς ελέγχου του, βήματος των πτερυγίων (pitch control) και το σύστημα προσανατολισμού (yaw control).

Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα των ανεμογεννητριών κυμαίνεται μεταξύ 20 και 50 στροφών το λεπτό, ενώ η γεννήτρια στρέφεται με 1000 έως 3000 στροφές το λεπτό. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα κιβώτιο ταχυτήτων που συνδέει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας.

Η γεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη. Συνήθως προτιμάται η ασύγχρονη γεννήτρια επαγωγής. Οι σχετικά πρόσφατες ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα πλήρους ισχύος δεν απαιτούν κιβώτιο. Το σύστημα προσανατολισμού περιστρέφει την άτρακτο και το δρομέα ώστε το επίπεδο περιστροφής τους να είναι κάθετο στην κατεύθυνση του ανέμου.



Σχήμα 4.2: Δομή της ανεμογεννήτριας.

### 4.3.2 Παραγόμενη ισχύς μιας ανεμογεννήτριας

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ισχύ εξόδου μιας ανεμογεννήτριας είναι: η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας (που καθορίζεται από τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της και τους βαθμούς απόδοσης του μηχανικού συστήματος και της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής), η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου και το ύψος του πύργου της ανεμογεννήτριας.

Η ηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει από τη μετατροπή της αεροδυναμικής ισχύος του αέρα υπολογίζεται από τη σχέση (4.14):

$$P_{\eta\lambda} = \frac{1}{2} n_{\mu\eta\chi} n_{\eta\lambda} \rho C_p A v_w^3 \quad (4.14)$$

όπου:

$\rho$  η πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_p$  ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

$A = \pi R^2$  η επιφάνεια που καλύπτουν τα πτερύγια

$v_w$  η ταχύτητα του ανέμου ( $\text{m}/\text{sec}$ )

$n_{\mu\eta\chi}$  ο συντελεστής απόδοσης του μηχανικού συστήματος (0.7 έως 0.8)

$n_{\eta\lambda}$  ο βαθμός απόδοσης της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής (0.8 έως 0.9).

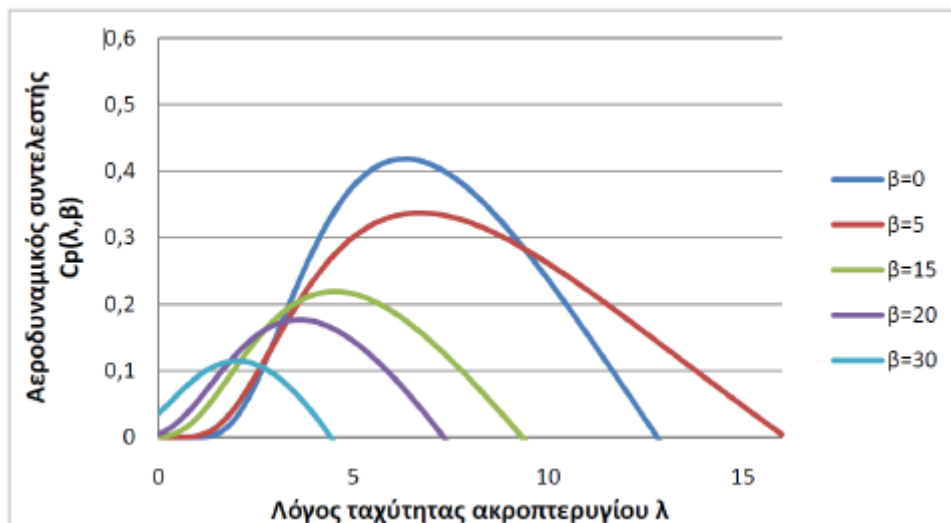
Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$  εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας του ανέμου που τελικά αξιοποιεί η αιολική μηχανή. Είναι υψηλά εξαρτώμενος από την ταχύτητα του ανέμου, την ταχύτητα περιστροφής της έλικας, το σχήμα και την γωνία βήματος  $\beta$  των πτερυγίων. Ένα ανώτατο θεωρητικό όριο για τον αεροδυναμικό συντελεστή (γνωστό και ως όριο του Bentz) είναι  $C_{p,\max} = 0.592$  και τυπικές τιμές του (0.4 έως 0.45).

Η εξάρτηση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος  $C_p$  από τα μεγέθη των ταχυτήτων (ανέμου και πτερυγίων) εκφράζεται ως συνάρτηση του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$ . Ο λόγος αυτός εκφράζει το πόσο καλά η ταχύτητα περιστροφής του ακροπτερυγίου προσαρμόζεται στην ταχύτητα του ανέμου για βέλτιστη αεροδυναμική συμπεριφορά. Δίνεται από την σχέση:

$$\lambda = \frac{v_{\text{ακροπτερυγίου}}}{v_w} = \frac{\omega R}{v_w} \quad (4.15)$$

όπου  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ( $\text{rad}/\text{sec}$ ),  $R$  το μήκος του πτερυγίου ( $\text{m}$ ) και  $v_w$  η ταχύτητα του ανέμου ( $\text{m}/\text{sec}$ ).

Στο Σχήμα 4.3 δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα του αεροδυναμικού συντελεστή  $C_p$ .



Σχήμα 4.3: Εξάρτηση του  $C_p$  από τα  $\lambda$  και  $\beta$ .

Τα χαρακτηριστικά σημεία μίας καμπύλης ισχύος που την καθορίζουν και διακρίνονται εύκολα σε ένα διάγραμμα  $P(v_w) - v_w$  βρίσκονται σε τρεις χαρακτηριστικές, για κάθε ανεμογεννήτρια, ταχύτητες ανέμου, οι οποίες είναι:

- η ταχύτητα ένταξης  $v_{cut-in}$ , η οποία αποτελεί την ταχύτητα κατά την οποία μία ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί και να παράγει ισχύ,
- η ονομαστική ταχύτητα  $v_r$ , η οποία αποτελεί την ταχύτητα κατά την οποία η ανεμογεννήτρια ξεκινάει να λειτουργεί στα ονομαστικά της μεγέθη και να παράγει την ονομαστική της ισχύ,
- η ταχύτητα αποκοπής  $v_{cut-out}$ , η οποία αποτελεί την ταχύτητα κατά την οποία η ανεμογεννήτρια σταματάει να λειτουργεί για λόγους ασφαλείας και για την αποφυγή μεγάλης καταπόνησης των υδραυλικών της κομματιών και κυρίως των πτερυγίων. Η ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων στο δρομέα μπορεί να γίνει ανεξέλεγκτη, με κίνδυνο καταστροφής της γεννήτριας, εφόσον είναι δυνατόν να παραχθούν μεγάλα ρεύματα σε σχέση με τα μέγιστα της γεννήτριας, αλλά και κίνδυνο αποκόλλησης της φτερωτής κι άλλων μηχανικών κομματιών της με οδυνηρές συνέπειες για ότι βρίσκεται σε ακτίνα πολλών μέτρων (αναλόγως της διαμέτρου της έλικας και του ύψους ανύψωσης του δρομέα). Για το λόγο αυτό φρενάρεται μέσω συστημάτων πέδησης ή μέσω της απομάκρυνσης των πτερυγίων από την κατεύθυνση του πνέοντος ανέμου.

Ο λόγος της ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$  εξαρτάται τόσο από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα όσο και από την ταχύτητα του ανέμου. Σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, δίνεται η δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας του δρομέα ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, πετυχαίνοντας έτσι τη βέλτιστη τιμή αεροδυναμικού συντελεστή και συνεπώς τη βέλτιστη παραγωγή ισχύος από την ανεμογεννήτρια.

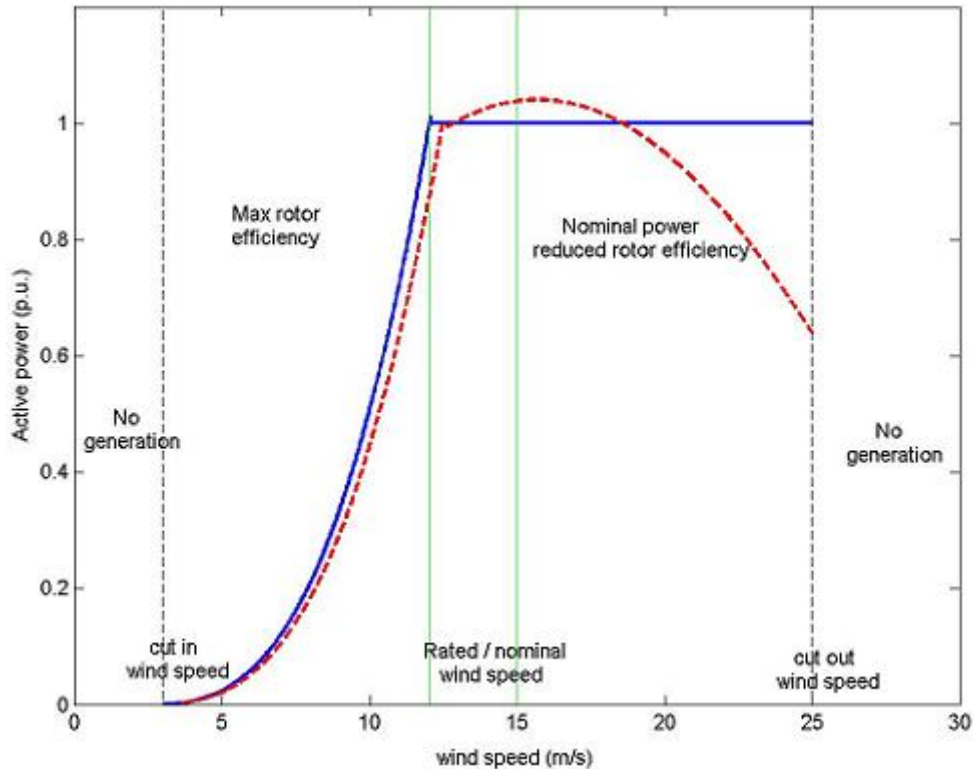
Για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής, σκοπός είναι η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Αντίθετα, όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή υπάρχει ανάγκη περιορισμού της παραγόμενης ισχύος για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι δυο τεχνολογίες που έχουν επικρατήσει στον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια είναι ο έλεγχος Pitch και ο έλεγχος Stall [4.3].

Ο έλεγχος Pitch (ενεργός έλεγχος) περιλαμβάνει συνεχή έλεγχο των πτερυγίων, προσφέροντας έτσι αναβαθμισμένο έλεγχο ισχύος, εύκολες εκκινήσεις καθώς και άμεσο αεροδυναμικό φρενάρισμα σε περίπτωση κινδύνου. Μέρος ή ολόκληρο το πτερύγιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, μεταβάλλοντας τη γωνία πρόσπτωσης και άρα την παραγόμενη ισχύ. Το μειονέκτημά του σε σχέση με τον έλεγχο stall, εκτός από το μεγαλύτερο κόστος είναι οι μεγάλες διακυμάνσεις στην ισχύ για μικρές διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου σε μεγάλες ταχύτητες.

Ο έλεγχος Stall (παθητικός έλεγχος) είναι ένα απλό σύστημα που περιορίζει την παραγόμενη ισχύ σε υψηλές ταχύτητες του ανέμου μέσω της αεροδυναμικής του πτερυγίου. Η γωνία κλίσης του πτερυγίου είναι σταθερή και επιλέγεται τέτοια τιμή ώστε η τουρμπίνα να φτάνει την ονομαστική ισχύ στην επιθυμητή ταχύτητα. Όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή, γίνεται επέμβαση στην ταχύτητα περιστροφής του

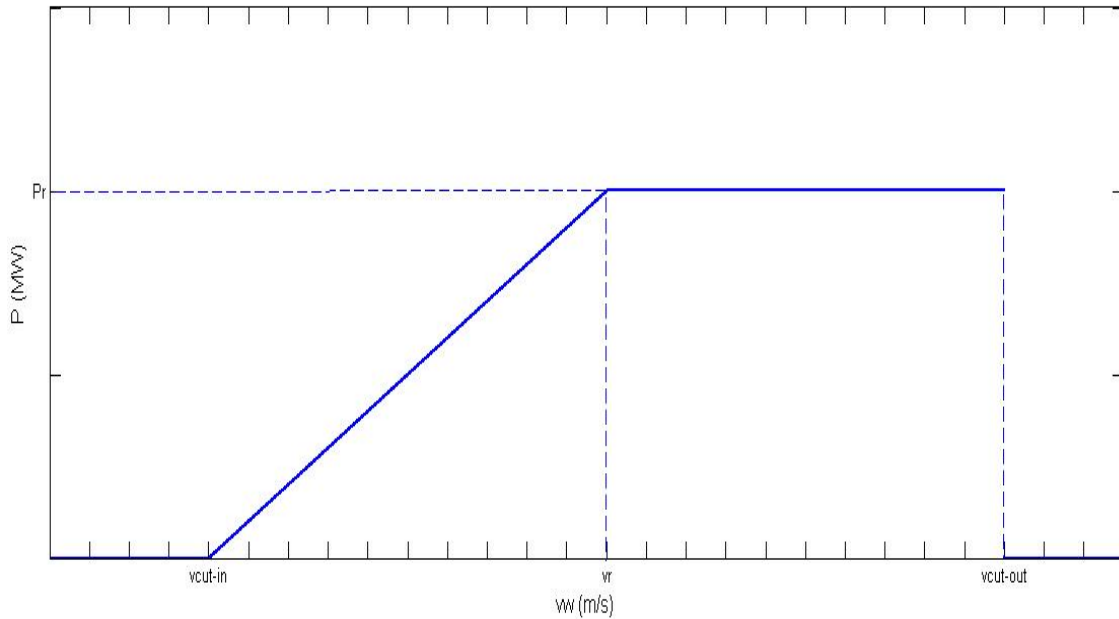


δρομέα έτσι ώστε να περιοριστεί η παραγόμενη ισχύς. Το κύριο μειονέκτημα των ανεμογεννητριών με έλεγχο Stall είναι η μικρότερη απόδοση σε σχέση με αυτές με έλεγχο Pitch. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται δυο τυπικές καμπύλες ισχύος ανεμογεννητριών με έλεγχο Pitch και έλεγχο Stall [4.3].



**Σχήμα 4.4:** Τυπικές καμπύλες ισχύος και περιοχές λειτουργίας ανεμογεννητριών με έλεγχο Pitch (συνεχής γραμμή) και έλεγχο Stall (διακεκομμένη γραμμή).

Τα στοιχεία που δίνουν οι κατασκευαστές των ανεμογεννητριών είναι η ονομαστική ισχύς τους και οι τρεις χαρακτηριστικές ταχύτητες ανέμου  $v_{\text{cut-in}}$ ,  $v_r$  και  $v_{\text{cut-out}}$ . Από τα στοιχεία αυτά, μπορεί εύκολα να σχεδιαστεί η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας. Στην παρούσα εργασία, θεωρείται ότι οι διαθέσιμες ανεμογεννήτριες διαθέτουν σύστημα Pitch και ότι η καμπύλη ισχύος τους ακολουθεί γραμμική συμπεριφορά [4.4], όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5.



**Σχήμα 4.5:** Γραμμική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας με έλεγχο pitch.

Έχοντας την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, η παραγόμενη ισχύς για κάθε διάστημα της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P(v_w) = 0 \quad 0 \leq v_w \leq v_{\text{cut-in}} \quad (4.16)$$

$$P(v_w) = P_{\text{rated}} * \frac{(v_w - v_{\text{cut-in}})}{(v_r - v_{\text{cut-in}})} \quad v_{\text{cut-in}} \leq v_w \leq v_r \quad (4.17)$$

$$P(v_w) = P_{\text{rated}} \quad v_r \leq v_w \leq v_{\text{cut-out}} \quad (4.18)$$

$$P(v_w) = 0 \quad v_w \geq v_{\text{cut-out}} \quad (4.19)$$

Ένας σημαντικός δείκτης των ανεμογεννητριών, που σχετίζεται άμεσα με τη βιωσιμότητα μιας ενεργειακής επένδυσης είναι ο συντελεστής χρησιμοποίησης CF, που ορίζεται ως το πηλίκο της ενέργειας που παράγει μια ανεμογεννήτρια σε ένα χρόνο, προς αυτή που θα μπορούσε να παράγει αν λειτουργούσε συνεχώς υπό ονομαστική ισχύ:

$$CF = \frac{E}{8760 * P_{\text{rated}}} = \frac{P_{\text{ave}}}{P_{\text{rated}}} \quad (4.20)$$

#### 4.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η κατανομή της ζήτησης φορτίου ενός δικτύου είναι μια στοχαστική διαδικασία που δεν μπορεί να περιγραφεί με μια απλή μαθηματική έκφραση. Συνήθως χρησιμοποιείται μια ημερήσια καμπύλη φορτίου όπου για κάθε ώρα της ημέρας δίνεται η αντίστοιχη ζήτηση

φορτίου. Με βάση την ημερήσια καμπύλη φορτίου και χρησιμοποιώντας μια τεχνική ομαδοποίησης των δεδομένων προκύπτει ένας πίνακας καταστάσεων φορτίου όπου δίνεται η ζήτηση φορτίου ως ποσοστό της ονομαστικής ζήτησης και η αντίστοιχη πιθανότητα για κάθε κατάσταση. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται δυο διαφορετικά μοντέλα που περιγράφουν την ετήσια ζήτηση φορτίου. Και στα δυο μοντέλα θεωρείται ότι η ζήτηση φορτίου ακολουθεί αυτή του συστήματος ελέγχου αξιοπιστίας της IEEE (IEEE-RTS).

#### 4.4.1 Μοντελοποίηση της ετήσιας ζήτησης φορτίου

Στο μοντέλο αυτό, η ζήτηση φορτίου χωρίζεται σε δέκα επίπεδα, χρησιμοποιώντας μια τεχνική ομαδοποίησης που αναπτύχθηκε στις εργασίες [4.6] και [4.7], η οποία εξασφαλίζει ότι η επιλογή των δέκα επιπέδων ζήτησης φορτίου είναι ένας λογικός συμβιβασμός μεταξύ της ακρίβειας και της ευκολίας στους αριθμητικούς υπολογισμούς. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα δέκα επίπεδα ζήτησης φορτίου και η αντίστοιχη πιθανότητά τους όπως αυτή προκύπτει από το σύστημα IEEE-RTS [4.5].

**Πίνακας 4.1:** Τα δέκα επίπεδα της ετήσιας ζήτησης φορτίου.

% Της αιχμής της ζήτησης	Πιθανότητα (%)
100	1.0
85.3	5.6
77.4	10.57
71.3	16.54
65	16.54
58.5	16.3
51	16.3
45.1	9.12
40.6	4.73
35.1	3.3

#### 4.4.2 Μοντελοποίηση της ωριαίας ζήτησης φορτίου

Στο μοντέλο αυτό, η ζήτηση φορτίου θεωρείται ότι ακολουθεί την ζήτηση φορτίου του συστήματος ελέγχου αξιοπιστίας της IEEE, όπως παρουσιάστηκε στο [4.8]. Στο σύστημα αυτό, δίνεται η εβδομαδιαία αιχμή της ζήτησης φορτίου ως ποσοστό της ετήσιας αιχμής της ζήτησης φορτίου, η ημερήσια αιχμή της ζήτησης φορτίου ως ποσοστό της εβδομαδιαίας αιχμής της ζήτησης φορτίου και η ωριαία αιχμή της ζήτησης φορτίου ως ποσοστό της ημερήσιας αιχμής της ζήτησης φορτίου, όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.2, 4.3 και 4.4.

**Πίνακας 4.2:** Η εβδομαδιαία αιχμή της ζήτησης φορτίου ως ποσοστό της ετήσιας αιχμής.

Εβδομάδα	Αιχμή της ζήτησης	Εβδομάδα	Αιχμή της ζήτησης
1	86.2	27	75.5
2	90	28	81.6
3	87.8	29	80.1
4	83.4	30	88
5	88	31	72.2
6	84.1	32	77.6
7	83.2	33	80
8	80.6	34	72.9
9	74	35	72.6
10	73.7	36	70.5
11	71.5	37	78
12	72.7	38	69.5
13	70.4	39	72.4
14	75	40	72.4
15	72.1	41	74.3
16	80	42	74.4
17	75.4	43	80
18	83.7	44	88.1
19	87	45	88.5
20	88	46	90.9
21	85.6	47	94
22	81.1	48	89
23	90	49	94.2
24	88.7	50	97
25	89.6	51	100
26	86.1	52	95.2

**Πίνακας 4.3:** Η ημερήσια αιχμή της ζήτησης φορτίου ως ποσοστό της εβδομαδιαίας αιχμής.

Ημέρα	Αιχμή της ζήτησης
Δευτέρα	93
Τρίτη	100
Τετάρτη	98
Πέμπτη	96
Παρασκευή	94
Σάββατο	77
Κυριακή	75

Πίνακας 4.4: Η ωριαία αιχμή της ζήτησης φορτίου ως ποσοστό της ημερήσιας αιχμής.

Ωρα	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
0-1	67	63	64	63
1-2	63	62	60	62
2-3	60	60	58	60
3-4	59	58	56	58
4-5	59	59	56	59
5-6	60	65	58	65
6-7	74	72	64	72
7-8	86	85	76	85
8-9	95	95	87	95
9-10	96	99	95	99
10-11	96	100	99	100
11-12	95	99	100	99
12-13	95	93	99	93
13-14	95	92	100	92
14-15	93	90	100	90
15-16	94	88	97	88
16-17	99	90	96	90
17-18	100	92	96	92
18-19	100	96	93	96
19-20	96	98	92	98
20-21	91	96	92	96
21-22	83	90	93	90
22-23	73	80	87	80
23-24	63	70	72	70

#### 4.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] Σ. Παπαθανασίου, "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας-Εκτίμηση Ενεργειακής Απόδοσης Αιολικών Πάρκων". Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2008, σελ. 2-3.
- [4.2] R. Billinton, C. Hua, and R. Ghajar, "Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy," *Microelectronics Reliability*, vol. 36, pp. 1253-1261, 1996.
- [4.3] Lucian Mihet-Popa and Voicu Groza, "Modeling and Simulation of a 12 MW Active-Stall Constant-Speed Wind Farm, Wind Farm - Impact in Power System and Alternatives to Improve the Integration", Dr. Gast n Orlando Suvire (Ed.), ISBN: 978-953-307-467-2, *InTech*, pp. 281-282, 2011. Available from: <http://www.intechopen.com/books/wind-farm-impact-in-power-system-and-alternatives-to-improve-theintegration/modeling-and-simulation-of-a-12-mw-active-stall-constant-speed-wind-farm>
- [4.4] J. Hetzer, D. C. Yu, and K. Bhattacharai, "An economic dispatch model incorporating wind power," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, pp. 603-611, 2008.

- [4.5] J. M. S. Pinheiro, C. R. R. Dornellas, M. T. Schilling, A. C. G. Melo, and J. C. O. Mello, "Probing the new IEEE Reliability Test System (RTS-96): HL-II assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, pp. 171-176, 1998.
- [4.6] C. Singh and Y. Kim, "Efficient technique for reliability analysis of power systems including time dependent sources," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, pp. 1090-1096, 1988.
- [4.7] C. Singh and A. Lago-Gonzalez, "Improved algorithms for multi-area reliability evaluation using the decomposition-simulation approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, pp. 321-328, 1989.
- [4.8] "IEEE reliability test system" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, pp. 2047-2054, Nov. 1979.

## **ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

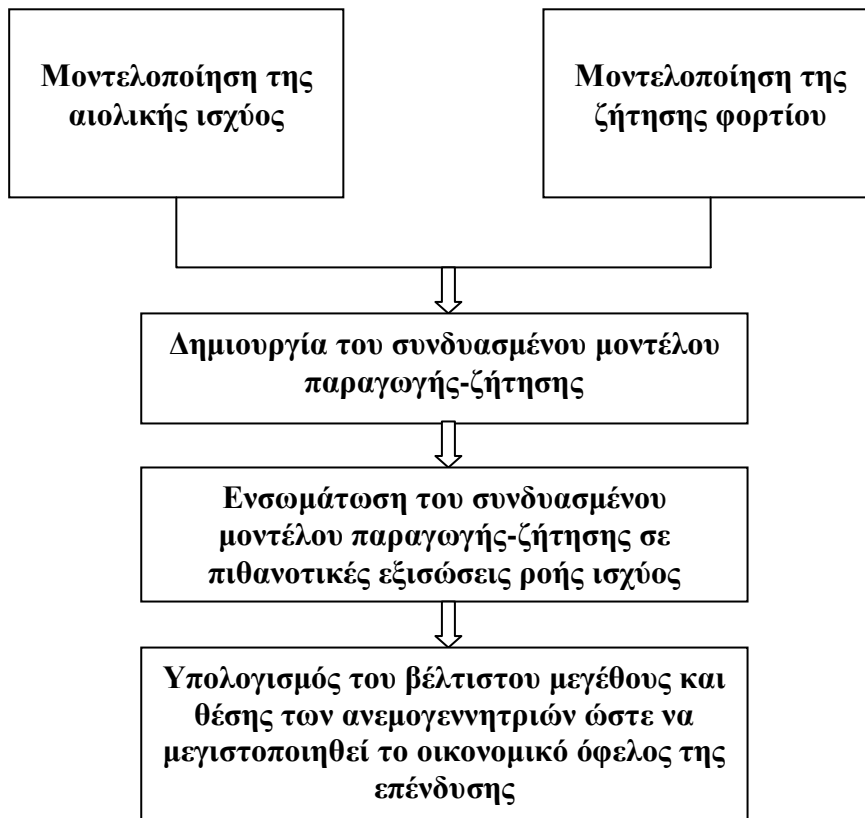
### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι το κλειδί για τη δημιουργία ενός βιώσιμου συστήματος παραγωγής ενέργειας, καθώς είναι ανεξάντλητες και παράλληλα μη ρυπογόνες. Μια σημαντική ποικιλία τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι πλέον διαθέσιμη όπως η αιολική, η ηλιακή, η βιομάζα και η υδροηλεκτρική. Από αυτές, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αιολική ισχύς λόγω της σημαντικής παραγωγής ισχύος που μπορούν να αποφέρουν οι ανεμογεννήτριες σε ένα δίκτυο.

Εν τούτοις, η αιολική ισχύς παρουσιάζει υψηλή διακύμανση λόγω της μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου, με συνέπεια η βέλτιστη τοποθέτηση μιας μονάδας αιολικής ισχύος σε ένα δίκτυο διανομής να είναι απαραίτητη ώστε να προστατευτεί η αποδοτική λειτουργία του. Κάποιες από τις σημαντικές παραμέτρους της εύρυθμης λειτουργίας ενός δικτύου είναι τα αποδεκτά όρια της τάσης των ζυγών, τα θερμοκά όρια των γραμμών και η αποδεκτή τιμή της αντίστροφης ροής ισχύος. Επομένως, η διαστασιολόγηση και τοποθέτηση μιας μονάδας αιολικής ισχύος σε ένα δίκτυο διανομής είναι ένα κρίσιμο κεφάλαιο του σχεδιασμού των δικτύων διανομής καθώς όχι μόνο δεν πρέπει να επηρεαστεί η αποδοτική του λειτουργία αλλά αν είναι δυνατόν να ενισχυθεί.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης ανεμογεννητριών σε δίκτυα διανομής, με στόχο την μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους της επένδυσης. Η μεθοδολογία βασίζεται στη δημιουργία ενός πιθανοτικού μοντέλου για την παραγωγή και την ζήτηση, το οποίο συνδυάζει όλες τις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας των ανεμογεννητριών και της ζήτησης φορτίου, με τις αντίστοιχες πιθανότητές τους και την ενσωμάτωση του πιθανοτικού μοντέλου σε ένα ντετερμινιστικό πρόβλημα σχεδιασμού. Το πρόβλημα σχεδιασμού διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού, με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση του οικονομικού κινήτρου του διαχειριστή του δικτύου διανομής. Οι περιορισμοί περιλαμβάνουν τα όρια της τάσης των ζυγών, την χωρητικότητα των γραμμών, το μέγιστο όριο διείσδυσης συνολικά στο δίκτυο και σε κάθε ζυγό και το διαθέσιμο κεφάλαιο.

Οι επόμενες ενότητες παρουσιάζουν την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, το συνδυασμένο μοντέλο παραγωγής-ζήτησης, τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος και τους περιορισμούς του δικτύου. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης ανεμογεννητριών σε δίκτυα διανομής.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθόδου.

## 5.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Η ανησυχία για τις περιβαλλοντικές συνέπειες που προκαλούν οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας και η αβεβαιότητα για το κόστος καυσίμου που χρησιμοποιούν έχει στρέψει την προσοχή στη διεύδυση μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα δίκτυα διανομής. Για το λόγο αυτό, πολλές χώρες υποχρεώνουν τους διαχειριστές των δικτύων διανομής να δέχονται ανεξάρτητους παραγωγούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημά τους έτσι ώστε ένα ποσοστό της ενέργειας του δικτύου να προέρχεται από φιλικές προς το περιβάλλον πηγές ενέργειας. Συνεπώς οι διαχειριστές των δικτύων διανομής οφείλουν να επιλέξουν τις τοποθεσίες και τα μεγέθη των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής έτσι ώστε να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη.

Γενικά, η μεγιστοποίηση των οφελών σε κάθε πρόβλημα σχεδιασμού σχετίζεται με την ελαχιστοποίηση του κόστους, διατηρώντας παράλληλα τη λειτουργία του συστήματος σε αποδεκτά πλαίσια. Στην περίπτωση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στο κόστος περιλαμβάνονται τα εξής:

- Κόστος κεφαλαίου: το κόστος εγκατάστασης των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής, το οποίο αναλαμβάνει πλήρως ο παραγωγός.
- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης: όπως και το κόστος κεφαλαίου, αποτελεί υποχρέωση του παραγωγού.



- Κόστος ενέργειας που δεν εξυπηρετείται λόγω διακοπής της παραγωγής: το κόστος αυτό σχετίζεται με την επίδραση που έχει η διείσδυση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στην αξιοπιστία των συστημάτων διανομής. Όσον αφορά την επίδραση στην αξιοπιστία του συστήματος, ισχύουν τα ακόλουθα:
  1. Τα συστήματα διανομής τροφοδοτούνται από τα συστήματα μεταφοράς. Όταν χαθεί η σύνδεση από το σύστημα μεταφοράς λόγω κάποιου σφάλματος, το σύστημα διανομής νησιδοποιείται και όλες οι μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής πρέπει να σταματήσουν την λειτουργία τους για την προστασία του προσωπικού και των εγκαταστάσεων. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι οι μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής δεν επηρεάζουν την αξιοπιστία του συστήματος [5.1].
  2. Στην περίπτωση που επιτρέπεται η νησιδοποίηση, το σύστημα δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά σε μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής για την εξυπηρέτηση του φορτίου γιατί χαρακτηρίζονται από μεγάλη διακύμανση στην ισχύ που παράγουν, προκαλώντας διαταραχές στην τάση και την συχνότητα [5.2].
  3. Οι μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής έχουν την δυνατότητα να βελτιώνουν την αξιοπιστία του συστήματος καθώς αποφορτίζουν τους μετασχηματιστές και τις γραμμές σε περιόδους αιχμής της ζήτησης. Έτσι αυξάνεται ο χρόνος ζωής των μετασχηματιστών και μειώνεται η πιθανότητα υπερφόρτισης του δικτύου. Η πιθανή αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου δεν σχετίζεται όμως με την θέση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στο δίκτυο, οπότε δεν αφορά την παρούσα εργασία. Επομένως θεωρείται ότι η θέση εγκατάστασης των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής δεν έχει άμεση επιρροή στην αξιοπιστία του συστήματος διανομής.
- Απώλειες ενεργού ισχύος: Οι απώλειες του δικτύου είναι υψίστης σημασίας στο πρόβλημα σχεδιασμού για τους ακόλουθους λόγους:
  1. Παρόλο που οι μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής συνήθως αποφορτίζουν τις γραμμές και μειώνουν τις απώλειες, αν δεν τοποθετηθούν σωστά, η ανάστροφη ροή ισχύος από μεγαλύτερες μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής μπορεί να αυξήσει τις απώλειες και να υπερθερμάνει τις γραμμές.
  2. Η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος εκτός από την θετική της επίδραση στην αποφόρτιση των γραμμών, την μείωση της πτώση τάσης και την βελτίωση του προφίλ της έχει και άλλα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

Από την πλευρά του διαχειριστή του δικτύου διανομής, η διείσδυση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στο δίκτυο που διαχειρίζεται έχει άμεση σχέση με τα κέρδη ή τα κόστη που συνδέονται με την επένδυση αυτή. Όμως τα κόστη και τα κέρδη που θα έχει ο διαχειριστής με την ένταξη μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στο δίκτυο διαμορφώνονται από τους ρυθμιστικούς κανόνες και τα χρηματικά κίνητρα που συνδέονται με την εγκατάσταση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής.

Στην παρούσα εργασία, η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε ένα δίκτυο διανομής πραγματοποιείται με την υπόθεση ότι ο διαχειριστής του δικτύου λειτουργεί και ως ανεξάρτητος παραγωγός, ο οποίος επιθυμεί να εγκαταστήσει ανεμογεννήτριες στο δίκτυο που διαχειρίζεται. Έτσι, ο διαχειριστής επωμίζεται τόσο τα κόστη που συνδέονται με την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, όσο και τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν.

Συγκεκριμένα, στα κόστη από την εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε ένα δίκτυο διανομής περιλαμβάνονται: α) το κόστος κεφαλαίου της αρχικής επένδυσης που είναι ίσο με \$2,000 ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, β) το σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας των ανεμογεννητριών που διαμορφώνεται στα \$50 ανά kW εγκατεστημένης ισχύος κάθε χρόνο και γ) το μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας τους που ισούται με \$0.01 ανά kWh παραγόμενης ενέργειας [5.3].

Όσον αφορά τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την διείσδυση ανεμογεννητριών στα δίκτυα διανομής, αρχικά για το διαχειριστή τίθεται το κίνητρο να μειώσει τις συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου. Έτσι η ρυθμιστική αρχή θέτει ένα όριο απωλειών ενεργού ισχύος για κάθε δίκτυο και ο διαχειριστής επιβραβεύεται αν οι απώλειες του δικτύου του είναι λιγότερες από αυτό το όριο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση που οι απώλειες είναι μεγαλύτερες από το όριο που έχει τεθεί, τότε ο διαχειριστής υποχρεούται να πληρώσει πρόστιμο. Επομένως, ο διαχειριστής κερδίζει \$48 ανά MWh μείωσης των αρχικών απωλειών του δικτύου [5.4]. Με αυτό τον τρόπο λοιπόν, αν ο διαχειριστής εγκαταστήσει με κατάλληλο τρόπο τις ανεμογεννήτριες, τότε μπορεί να μειώσει τις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου και έτσι να επωφεληθεί οικονομικά. Επίσης, η διείσδυση των ανεμογεννητριών δίνει τη δυνατότητα στον διαχειριστή-παραγωγό του δικτύου να ικανοποιήσει μέσω αυτών, μέρος της ζήτησης φορτίου οπότε μειώνεται η εγγεόμενη ισχύς από το σύστημα μεταφοράς στο σύστημα διανομής, μέσω του υποσταθμού. Συνεπώς, μειώνεται το κόστος αγοράς ενέργειας μέσω του υποσταθμού, όπως αυτό διαμορφώνεται από την οριακή τιμή του συστήματος. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, θεωρείται ότι η οριακή τιμή του συστήματος είναι σταθερή στα \$50 ανά MWh. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις που η διαθέσιμη αιολική ισχύς καλύπτει την ζήτηση φορτίου του δικτύου, η περίσσεια της ενέργειας μπορεί να τροφοδοτηθεί από το δίκτυο διανομής, μέσω του υποσταθμού, στο δίκτυο μεταφοράς με τιμή πώλησης την οριακή τιμή του συστήματος.

Επομένως, αντικειμενική συνάρτηση της προτεινόμενης μεθόδου είναι, για όλες τις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας του δικτύου, η μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους του διαχειριστή-παραγωγού του δικτύου από την εγκατάσταση ανεμογεννητριών, χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί του συστήματος.

### 5.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΖΗΤΗΣΗΣ

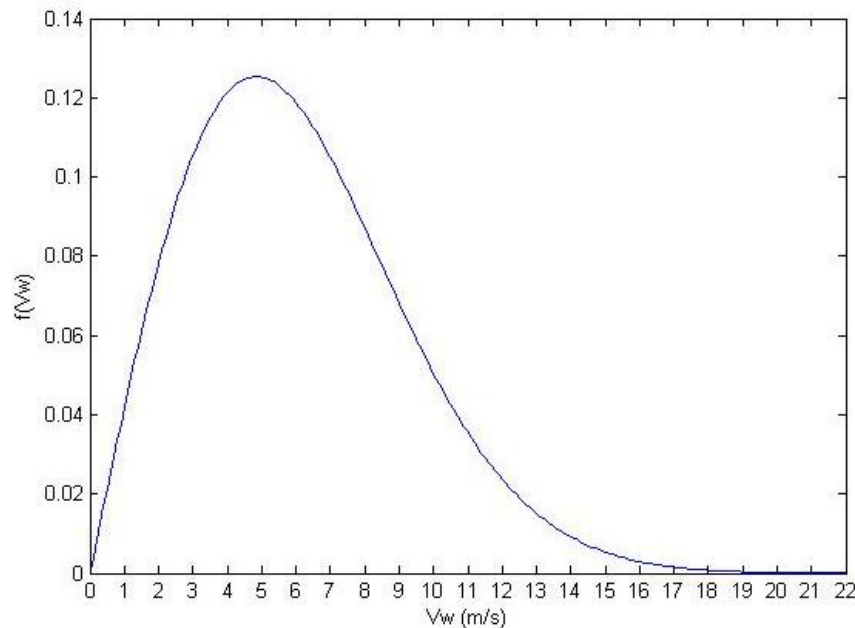
Από τις μετρήσεις στην τοποθεσία που εξετάζεται να εγκατασταθεί η μονάδα αιολικής ισχύος, έχουν προκύψει τα ακόλουθα στοιχεία για την ταχύτητα του ανέμου:

- Μέγιστη ταχύτητα του ανέμου  $v_{\max}$  : 22 m/s.
- Μέση τιμή της ταχύτητα του ανέμου  $v_m$  : 6.07 m/s.

Με την υπόθεση ότι η ετήσια ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί την κατανομή Rayleigh, η παράμετρος κλίμακας  $c$  υπολογίζεται από την σχέση (4.8) ως εξής:

$$c \approx 1.128v_m = 6.84696 \quad (5.1)$$

Οπότε, η κατανομή Rayleigh της ετήσιας ταχύτητας του ανέμου σύμφωνα με την σχέση (4.6) παίρνει την μορφή του Σχήματος 5.2.



**Σχήμα 5.2:** Μορφή της κατανομής Rayleigh για την ετήσια ταχύτητα του ανέμου.

Για να προκύψει η διακριτή κατανομή της ταχύτητας του ανέμου και κατά επέκταση η παραγόμενη ισχύς ως μια μεταβλητή πολλών καταστάσεων, η συνεχής κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου πρέπει να διαιρεθεί σε διαφορετικά διαστήματα, στο καθένα από τα οποία η ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται σε συγκεκριμένα όρια. Ένας μικρός αριθμός καταστάσεων επηρεάζει την ακρίβεια, ενώ ένας μεγάλος αριθμός καταστάσεων αυξάνει την πολυπλοκότητα. Στην παρούσα εργασία, ως βήμα λαμβάνεται το 1 m/s.

Η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να ανήκει σε ένα διάστημα μεταξύ των ταχυτήτων  $v_{w1}$  και  $v_{w2}$  υπολογίζεται από την σχέση (5.2).

$$P(G_w) = \int_{v_{w1}}^{v_{w2}} f(v) dv \quad (5.2)$$

όπου  $v_{w1}$  και  $v_{w2}$  είναι οι ταχύτητες του ανέμου που ορίζουν την κατάσταση  $w$ .

Με βάση την σχέση (5.2) προκύπτει ο Πίνακας 5.1 με τις καταστάσεις για την ταχύτητα του ανέμου και η αντίστοιχη πιθανότητα κάθε κατάστασης.

**Πίνακας 5.1:** Πίνακας της πιθανότητας καταστάσεων της ταχύτητας του ανέμου.

Ταχύτητα του ανέμου, m/s	Πιθανότητα
0-1	0.0211048
1-2	0.0606793
2-3	0.0928893
3-4	0.114474
4-5	0.124167
5-6	0.122701

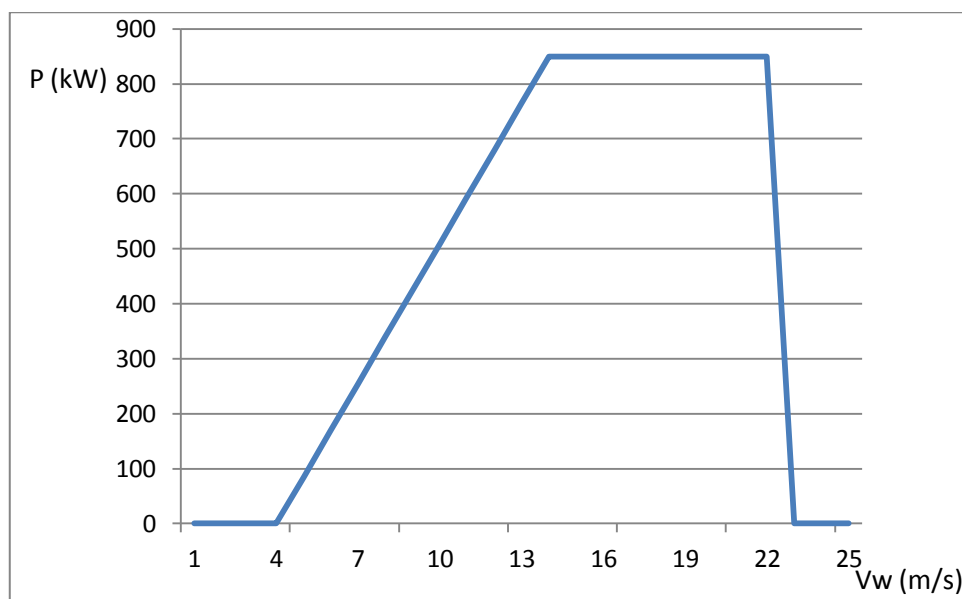
**Πίνακας 5.1:** Πίνακας της πιθανότητας καταστάσεων της ταχύτητας του ανέμου (συνέχεια).

Ταχύτητα του ανέμου, m/s	Πιθανότητα
6-7	0.112364
7-8	0.0962814
8-9	0.0776614
9-10	0.0592043
10-11	0.042776
11-12	0.0293513
12-13	0.0191556
13-14	0.0119045
14-15	0.00705142
15-16	0.0039839
16-17	0.00214815
17-18	0.00110601
18-19	0.000543966
19-20	0.000255651
20-21	0.000114846
21-22	0.0000493274
$\geq 22$	0

Τα χαρακτηριστικά της διαθέσιμης ανεμογεννήτριας είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστική ισχύς  $P_r = 850$  kW.
- Ταχύτητα ένταξης  $v_{\text{cut-in}} = 4$  m/s.
- Ονομαστική ταχύτητα ανέμου  $v_{\text{nom}} = 14$  m/s.
- Ταχύτητα αποκοπής  $v_{\text{cut-out}} = 22$  m/s.

Από τα δεδομένα αυτά προκύπτει η γραμμικοποιημένη καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας του Σχήματος 5.3.

**Σχήμα 5.3:** Καμπύλη ισχύος της διαθέσιμης ανεμογεννήτριας.

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.13) έως (4.16) και ομαδοποιώντας κάποιες καταστάσεις του Πίνακα 5.1, προκύπτει η παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας για κάθε κατάσταση της ταχύτητας του ανέμου. Για την απλότητα των υπολογισμών, θεωρήθηκε ότι η ταχύτητα του ανέμου σε κάθε κατάσταση είναι ίση με την μέση τιμή των ταχυτήτων που ορίζουν την κατάσταση.

**Πίνακας 5.2:** Πίνακας πιθανοτήτων της παραγόμενης ισχύος ως ποσοστό της ονομαστικής.

Ταχύτητα του ανέμου, m/s	% της ονομαστικής ισχύος	Πιθανότητα
0-4	0	0.2891474
4-5	5	0.124167
5-6	15	0.122701
6-7	25	0.112364
7-8	35	0.0962814
8-9	45	0.0776614
9-10	55	0.0592043
10-11	65	0.042776
11-12	75	0.0293513
12-13	85	0.0191556
13-14	95	0.0119045
14-22	100	0.0152532704
≥22	0	0

Από τον Πίνακα 5.2 και χρησιμοποιώντας την σχέση (4.20) προκύπτει ότι ο συντελεστής χρησιμοποίησης της διαθέσιμης ανεμογεννήτριας είναι ίσος με  $CF=0.25$ .

Το φορτίο θεωρείται ότι ακολουθεί την ετήσια κατανομή φορτίου του συστήματος ελέγχου αξιοπιστίας της IEEE, οπότε προκύπτει ο Πίνακας 5.3 που περιέχει τα δέκα επίπεδα ζήτησης φορτίου και την αντίστοιχη πιθανότητα τους.

**Πίνακας 5.3:** τα δέκα επίπεδα της ετήσιας ζήτησης φορτίου.

% της αιχμής της ζήτησης	Πιθανότητα
100	0.01
85.3	0.056
77.4	0.1057
71.3	0.1654
65	0.1654
58.5	0.163
51	0.163
45.1	0.0912
40.6	0.0473
35.1	0.033

Η βασική υπόθεση στη δημιουργία του συνδυασμένου μοντέλου παραγωγής ζήτησης είναι ότι οι πιθανές καταστάσεις της ταχύτητας του ανέμου και του φορτίου είναι ασυσχέτιστες. Έτσι, δεν λαμβάνονται υπόψη οι ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις της

ταχύτητας του ανέμου και της ζήτησης φορτίου. Η υπόθεση αυτή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα ακόμα και αν υπάρχει μια μικρή συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και του φορτίου. Εν τούτοις, αν η συσχέτιση αυτή είναι μεγάλη, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων θα επηρεαστεί ανάλογα με τη φύση της συσχέτισης (είτε είναι θετική ή αρνητική). Η λογική πίσω από αυτό είναι ότι ο κύριος λόγος παραβίασης των περιορισμών είναι η ανάστροφη ροή ισχύος που συμβαίνει, στην περίπτωση που η παραγόμενη ισχύς από τις μονάδες αιολικής ισχύος είναι μεγαλύτερη από την ζήτηση. Αν η συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και του φορτίου είναι θετική, εκτιμάται ότι η ανάστροφη ροή ισχύος θα είναι μικρότερη και επομένως η διείσδυση της Διεσπαρμένης Παραγωγής θα είναι μεγαλύτερη από ότι θα υπολογιστεί με την υπόθεση ότι τα δυο μεγέθη είναι ασυσχέτιστα. Αντίθετα, στην περίπτωση που η συσχέτιση είναι αρνητική, η διείσδυση της Διεσπαρμένης Παραγωγής αναμένεται να είναι μικρότερη από ότι θα υπολογιστεί.

Με βάση λοιπόν την υπόθεση ότι οι πιθανές καταστάσεις της ταχύτητας του ανέμου και του φορτίου είναι ασυσχέτιστες, η πιθανότητα κάθε συνδυασμού της ζήτησης φορτίου και της παραγωγής ισχύος από τις ανεμογεννήτριες μπορεί να προκύψει από τη συνέλιξη των δυο πιθανοτήτων, όπως φαίνεται στη σχέση (5.3).

$$P(C_g) = P_w(G) \times P_y(L) \quad (5.3)$$

όπου  $P_w(G)$  και  $P_y(L)$  οι πιθανότητες της παραγωγής ισχύος και της ζήτησης αντίστοιχα.

Το συνδυασμένο μοντέλο παραγωγής-ζήτησης περιγράφεται από την σχέση (5.4).

$$R = [\{C_g, P(C_g)\}; g = 1:N] \quad (5.4)$$

όπου  $C$  είναι ένας πίνακας δυο στηλών που περιέχει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς παραγωγής ισχύος και ζήτησης,  $P(C)$  είναι η πιθανότητα κάθε πιθανού συνδυασμού και  $N$  είναι ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών.

Ο Πίνακας  $C$  που περιέχει όλες τις πιθανές καταστάσεις παραγωγής και ζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, με την αντίστοιχη πιθανότητα τους, δίνεται στον Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα του συνδυασμένου μοντέλου: Έστω ότι υπάρχουν τρεις πιθανές καταστάσεις για την παραγωγή ισχύος  $[\{0, 0.25\}, \{0.5, 0.6\}, \{1, 0.15\}]$ , και τρεις πιθανές καταστάσεις για τη ζήτηση φορτίου  $[\{0.2, 0.2\}, \{0.6, 0.45\}, \{0.9, 0.35\}]$ . Το πρώτο στοιχείο κάθε συνόλου αντιστοιχεί στη παραγωγή ισχύος ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος και στη ζήτηση ως ποσοστό της αιχμής της ζήτησης ενώ το δεύτερο είναι η πιθανότητά τους. Ο αριθμός των πιθανών καταστάσεων είναι  $N = 3 * 3 = 9$  και οι πίνακες  $C$  και  $P(C)$  παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.4 και 5.5 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.4: Συνδυασμοί της παραγωγής και της ζήτησης.

Κατάσταση	Παραγωγή ισχύος ως ποσοστό της ονομαστικής	Ζήτηση ως ποσοστό της αιχμής
1	0	0.2
2	0	0.2
3	0	0.2
4	0.5	0.6
5	0.5	0.6
6	0.5	0.6
7	1	0.9
8	1	0.9
9	1	0.9

Πίνακας 5.5: Πιθανότητες κάθε συνδυασμού παραγωγής και ζήτησης.

Κατάσταση	Πιθανότητα
1	$0.25*0.2=0.05$
2	$0.25*0.45=0.1125$
3	$0.25*0.35=0.0875$
4	$0.6*0.2=0.12$
5	$0.6*0.45=0.27$
6	$0.6*0.35=0.21$
7	$0.15*0.2=0.03$
8	$0.15*0.45=0.0675$
9	$0.15*0.35=0.0525$

#### 5.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στόχος της προτεινόμενης μεθόδου είναι η ενσωμάτωση του πιθανοτικού μοντέλου παραγωγής-ζήτησης σε ντετερμινιστικές εξισώσεις βέλτιστης ροής φορτίου (optimal power flow-OPF). Ο αριθμός των εξισώσεων ενεργού και αέργου ροής ισχύος ισούται με το συνολικό αριθμό των πιθανών καταστάσεων. Για κάθε κατάσταση, η διεύθυνση των μονάδων αιολικής ισχύος αλλάζει με βάση το συνδυασμένο μοντέλο παραγωγής-ζήτησης, οπότε υπολογίζονται οι απώλειες ενεργού ισχύος, η εγχεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό και η ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες και έπειτα αθροίζονται ανάλογα με την πιθανότητα της κατάστασης, ώστε να υπολογιστούν οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος, η συνολική εγχεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό και η συνολική ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες κάθε χρόνο, για όλες τις καταστάσεις. Στη συνέχεια, καθορίζονται οι βέλτιστες θέσεις εγκατάστασης των μονάδων αιολικής ισχύος στο δίκτυο έτσι ώστε, για όλες τις πιθανές καταστάσεις, να μεγιστοποιηθεί το οικονομικό όφελος της επένδυσης, χωρίς να παραβιαστούν οι περιορισμοί του συστήματος.

Για τον σχεδιασμό του μαθηματικού μοντέλου του προβλήματος έγιναν οι ακόλουθες υποθέσεις:

- Στο δίκτυο μπορούν να συνδεθούν παραπάνω από μια μονάδα αιολικής ισχύος.
- Όλες οι μονάδες αιολικής ισχύος του δικτύου λειτουργούν με έναν ενιαίο συντελεστή ισχύος.
- Ο διαχειριστής του δικτύου στο οποίο θα συνδεθούν οι μονάδες αιολικής ισχύος δεν θα αναβαθμίσει το υφιστάμενο δίκτυο, ενισχύοντας τις γραμμές.
- Λαμβάνεται ένα μέγιστο όριο διείσδυσης σε κάθε ζυγό.
- Αντίθετα με τα συστήματα μεταφοράς, στα συστήματα διανομής οι αποστάσεις μεταξύ των μονάδων παραγωγής είναι σημαντικά μικρότερες, οπότε θεωρείται ότι η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά σε όλο το δίκτυο, άρα η παραγόμενη ισχύς είναι ανεξάρτητη της θέσης του ζυγού.

#### 5.4.1 Μαθηματική έκφραση του προβλήματος

Η μαθηματική έκφραση του προβλήματος περιγράφεται από τις σχέσεις (5.5) έως (5.18). Πρόκειται για ένα πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού (non-linear programming-NLP) που επιλύθηκε στο περιβάλλον GAMS [5.5]. Ως ζυγός ταλάντωσης, για όλα δίκτυα που εφαρμόστηκε η μέθοδος, λήφθηκε ο ζυγός 1.

##### 5.4.1.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αποτελεί η μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους της επένδυσης του διαχειριστή-παραγωγού, που δίνεται στη σχέση (5.5).

$$\max \text{profit} = \frac{1}{(1+d)^t} * \{K_L * (P_{\text{loss}}^{\text{αρχ}} - P_{\text{loss}}^{\text{τελ}}) * 8760 + K_S * (P_S^{\text{αρχ}} - P_S^{\text{τελ}}) * 8760 - C_O * P_w - C_M * E_w\} - C_I * P_w \quad (5.5)$$

όπου:

$K_L$  ο οικονομικός παράγοντας μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος (48 \$/MWh)

$P_{\text{loss}}^{\text{αρχ}}$  οι απώλειες ενεργού ισχύος πριν την εγκατάσταση ανεμογεννητριών

$P_{\text{loss}}^{\text{τελ}}$  οι απώλειες ενεργού ισχύος μετά την εγκατάσταση ανεμογεννητριών

$K_S$  η τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του υποσταθμού (50 \$/MWh)

$P_S^{\text{αρχ}}$  η εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμού πριν την εγκατάσταση ανεμογεννητριών

$P_S^{\text{τελ}}$  η εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμού μετά την εγκατάσταση ανεμογεννητριών



$C_0$  το σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας των ανεμογεννητριών ( 50,000 \$/MW)

$C_M$  το μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας των ανεμογεννητριών (10 \$/MWh)

$P_w$  η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στο δίκτυο

$E_w$  η συνολική ετήσια ενεργειακή απόδοση των ανεμογεννητριών

$C_I$  το κόστος εγκατάστασης ανεμογεννητριών (2,000,000 \$/MW)

$d$  το επιτόκιο αναγωγής (8 %)

$t$  το έτος για το οποίο γίνεται η μελέτη.

Για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης, απαιτείται ο υπολογισμός των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος, της συνολικής εγγεόμενης ενεργού ισχύος μέσω του υποσταθμού και της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης των ανεμογεννητριών, μέσω των σχέσεων (5.6) έως (5.9).

### 1. Απώλειες ενεργού ισχύος

$$P_{\text{loss } g} = 0.5 * \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} * \\ * \left[ (V_{g,i})^2 + (V_{g,j})^2 - 2 * V_{g,i} * V_{g,j} * \cos(\delta_{g,j} - \delta_{g,i}) \right] \quad \forall g \quad (5.6)$$

$$P_{\text{loss}} = \sum_{g=1}^N P_{\text{loss } g} * P(C_g) \quad (5.7)$$

όπου  $P_{\text{loss } g}$  οι απώλειες ενεργού ισχύος της κατάστασης  $g$ ,  $P_{\text{loss}}$  οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος,  $P(C_g)$  η πιθανότητα της κατάστασης  $g$  και  $N$  ο συνολικός αριθμός καταστάσεων.

### 2. Εγγεόμενης ενεργός ισχύς μέσω του υποσταθμού

$$P_s = \sum_{g=1}^N P_{s g} * P(C_g) \quad (5.8)$$

όπου  $P_{s g}$  η εγγεόμενη ισχύς μέσω του υποσταθμού την κατάσταση  $g$ ,  $P_s$  η συνολική εγγεόμενη ισχύς μέσω του υποσταθμού,  $P(C_g)$  η πιθανότητα της κατάστασης  $g$  και  $N$  ο συνολικός αριθμός καταστάσεων.

## 3. Ετήσια ενεργειακή απόδοση ανεμογεννητριών

$$E_w = \sum_{g=1}^N P(C_g) * C(g, 1) * P_w * 8760 \quad (5.9)$$

όπου  $E_w$  είναι η ετήσια ενεργειακή απόδοση των ανεμογεννητριών,  $P(C_g)$  η πιθανότητα της κατάστασης  $g$ ,  $C(g, 1)$  η παραγόμενη αιολική ισχύς ως ποσοστό της ονομαστικής για κάθε κατάσταση  $g$ ,  $P_w$  η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στο δίκτυο και  $N$  ο συνολικός αριθμός καταστάσεων.

## 5.4.1.2 Περιορισμοί του συστήματος

## 1. Εξισώσεις ενεργού και αέργου ροής ισχύος

$$\begin{aligned} & P_{s_g} + C(g, 1) * P_{w,i} - C(g, 2) * P_{Dg,i} \\ &= \sum_{j=1}^n V_{g,i} * V_{g,j} * (G_{ij} * \cos(\delta_{g,i} - \delta_{g,j}) + B_{ij} * \sin(\delta_{g,i} - \delta_{g,j})) \quad \forall i, g \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} & Q_{s_g} + C(g, 1) * P_{w,i} * \tan(\varphi_w) - C(g, 2) * Q_{Dg,i} \\ &= \sum_{j=1}^n V_{g,i} * V_{g,j} * (G_{ij} * \sin(\delta_{g,i} - \delta_{g,j}) - B_{ij} * \cos(\delta_{g,i} - \delta_{g,j})) \quad \forall i, g \end{aligned} \quad (5.11)$$

όπου:

$P_{s_g}$  η παραγόμενη ενεργός ισχύς του ζυγού ταλάντωσης σε κάθε κατάσταση  $g$

$Q_{s_g}$  η παραγόμενη άεργος ισχύς του ζυγού ταλάντωσης σε κάθε κατάσταση  $g$

$P_{w,i}$  η ονομαστική εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε κάθε ζυγό  $i$

$P_{Dg,i}$  η ονομαστική ζήτηση ενεργού ισχύος σε κάθε ζυγό  $i$  για κάθε κατάσταση  $g$

$Q_{Dg,i}$  η ονομαστική ζήτηση ενεργού ισχύος σε κάθε ζυγό  $i$  για κάθε κατάσταση  $g$

$\varphi_w$  η γωνία του συντελεστή ισχύος των ανεμογεννητριών

$C(g, 1)$  η παραγόμενη αιολική ισχύς ως ποσοστό της ονομαστικής για κάθε κατάσταση  $g$

$C(g, 2)$  η ζήτηση του φορτίου ως ποσοστό της αιχμής για κάθε κατάσταση  $g$

$V_{g,i}$  το μέτρο της τάσης του ζυγού  $i$  σε κάθε κατάσταση  $g$

$G_{ij}$  το πραγματικό μέρος των στοιχείων του πίνακα αγωγιμοτήτων ( $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ )

$B_{ij}$  το φανταστικό μέρος των στοιχείων του πίνακα αγωγιμοτήτων ( $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ )

$n$  ο αριθμός των ζυγών του δικτύου

$\delta_{g,i}$  η φασική γωνία της τάσης του ζυγού  $i$ .

2. Εξισώσεις ρεύματος κλάδου

$$I_{g,ij} = |Y_{ij}| * [(V_{g,i})^2 + (V_{g,j})^2 - 2 * V_{g,i} * V_{g,j} * \cos(\delta_{g,j} - \delta_{g,i})] \quad (5.12)$$

όπου  $I_{g,ij}$  το ρεύμα της γραμμής που συνδέει τους ζυγών  $i$  και  $j$ , για κάθε κατάσταση  $g$ .

3. Τάση και γωνία του ζυγού ταλάντωσης

$$V_{g,1} = 1.0 \text{ α.μ.}$$

$$\delta_{g,1} = 0.0 \text{ rad} \quad (5.13)$$

4. Όρια των τάσεων στους ζυγούς

$$0.95 \leq V_{g,i} \leq 1.05 \quad \forall i \notin \text{ζυγό ταλάντωσης, } g \quad (5.14)$$

5. Όρια χωρητικότητας των γραμμών

$$0 \leq I_{g,ij} \leq I_{ij\max} \quad \forall i, j, g \quad (5.15)$$

6. Μέγιστη διείσδυση αιολικής ισχύος σε κάθε ζυγό

$$P_{w,i} \leq P_{bus} \quad \forall i \quad (5.16)$$

όπου  $P_{bus}$  η μέγιστη επιτρεπόμενη διείσδυση αιολικής ισχύος σε κάθε ζυγό.

7. Μέγιστη διείσδυση αιολικής ισχύος σε όλο το σύστημα

$$\sum_{i=1}^n CF * P_{w,i} \leq x * \sum_{i=1}^n P_{D,i} \quad (5.17)$$

όπου  $x$  είναι το μέγιστο όριο διείσδυσης σαν κλάσμα της αιχμής της ζήτησης.

8. Διαθέσιμο κεφάλαιο για την επένδυση

$$C_I * P_w \leq \text{budget} \quad (5.18)$$

όπου  $C_I$  το κόστος της επένδυσης,  $P_w$  η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς και budget το διαθέσιμο κεφάλαιο.

## 5.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] "IEEE Application Guide for IEEE Std 1547, *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*," IEEE Std 1547.2-2008, pp. 1-207, 2009.
- [5.2] R. N. Allan, R. Billinton, A. M. Breipohl, and C. H. Grigg, "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, pp. 51-57, 1999.
- [5.3] Distributed Generation Renewable Energy Estimate of Costs. Ανάκτηση από [http://www.nrel.gov/analysis/pdfs/2012\\_dg\\_icoe\\_data.pdf](http://www.nrel.gov/analysis/pdfs/2012_dg_icoe_data.pdf).
- [5.4] G. P. Harrison, A. Piccolo, P. Siano, A. R. Wallace, "Hybrid GA and OPF evaluation of network capacity for distributed generation e t ," *Electric Power Systems Research*, vol.78, pp. 392-398, May 2007.
- [5.5] GAMS—A User's Guide. . New York, 2008.

## **ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS**

### **6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Μοντελοποίησης (General Algebraic Modeling System-GAMS) είναι ένα υψηλού επιπέδου σύστημα μοντελοποίησης για μαθηματικό προγραμματισμό και βελτιστοποίηση. Το GAMS είναι αποκλειστικά σχεδιασμένο για μοντελοποίηση γραμμικών, μη γραμμικών και μεικτού ακεραίου προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το σύστημα αυτό είναι ιδανικό για περίπλοκες, ευρείας κλίμακας εφαρμογές βελτιστοποίησης και επιτρέπει στο χρήστη να κατασκευάσει μεγάλα, εύχρηστα μοντέλα, με ιδιαίτερα συμπαγή και φυσικό τρόπο, τα οποία μπορούν εύκολα να προσαρμοσθούν σε νέες συνθήκες. Επίσης επιτρέπει στο χρήστη να αφοσιωθεί στη μοντελοποίηση του προβλήματος κάνοντας την οργάνωση εύκολη [6.1].

Το GAMS είναι κατάλληλο για χρήση σε διάφορες υπολογιστικές πλατφόρμες καθώς τα μοντέλα προσομοίωσης χαρακτηρίζονται από φορητότητα. Επίσης είναι διαθέσιμο για χρήση από προσωπικούς υπολογιστές, workstations, υπολογιστές mainframe, και υπερυπολογιστές. Το σύστημα επιμελείται των χρονοβόρων λεπτομερειών για την υλοποίηση σε συγκεκριμένο μηχανήμα και σύστημα λογισμικού. Παράλληλα ο χρήστης μπορεί εύκολα και γρήγορα να αλλάξει τη διατύπωση του προβλήματος, τον επιλυτή, ακόμα και να μετατρέψει ένα πρόβλημα από γραμμικό σε μη γραμμικό χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. Τέλος το GAMS συμπεριλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (integrated development environment -IDE) και μία ομάδα ολοκληρωμένων επιλυτών (solvers).

Οι λόγοι που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού είναι οι εξής:

- Λόγω της ομοιότητας, που έχει το συντακτικό της γλώσσας με τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της βελτιστοποίησης. Το γεγονός αυτό, μας επιτρέπει να πετύχουμε μία αρκετά απλή, αλλά ταυτόχρονα ακριβή και ευανάγνωστη υλοποίηση του μαθηματικού αλγορίθμου.
- Η γλώσσα, που χρησιμοποιεί το GAMS, είναι τυπικά παρόμοια με τις συνήθως χρησιμοποιούμενες γλώσσες προγραμματισμού, καθιστώντας την οικεία σε οποιονδήποτε, που έχει μία έστω μικρή επαφή με τον προγραμματισμό. Επιπλέον, παρέχονται πρότυπα μοντέλα μέσω βιβλιοθήκης πληροφοριών, τα οποία βοηθούν το χρήστη.
- Το μοντέλο σχεδιασμού, μπορεί να τροποποιηθεί ή να επεκταθεί με επιπλέον περιορισμούς, με ιδιαίτερη ευκολία και ασφάλεια.
- Διαθέτει πολλούς και ισχυρούς επιλυτές, οι οποίοι ενημερώνονται με τις πιο πρόσφατες και πιο αποτελεσματικές εκδόσεις. Το GAMS δεν μπορεί να επιλύσει από μόνο του το εκάστοτε πρόβλημα, αλλά αντιθέτως το μεταβιβάζει σε έναν έτοιμο αλγόριθμο επίλυσης, ανάλογα κάθε φορά με τη φύση του προβλήματος. Οι έτοιμοι

αυτοί αλγόριθμοι λέγονται επιλυτές (solvers), και το GAMS λειτουργεί περισσότερο ως διαμεσολαβητής.

## 6.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το GAMS επιτρέπει στους χρήστες του να αφοσιωθούν εντελώς στη μοντελοποίηση. Εξαλείφοντας την ανάγκη για βαθιά ενασχόληση με ειδικά τεχνικά προβλήματα για κάθε υπολογιστή που εφαρμόζεται το σύστημα, όπως υπολογισμοί διευθύνσεων, εντολές αποθήκευσης, σύνδεση υπορουτινών και έλεγχος ροής εισόδου – εξόδου, το GAMS αυξάνει το διαθέσιμο χρόνο για τη θεμελίωση και τρέξιμο του μοντέλου, καθώς και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Το GAMS θεμελιώνει σωστές συνήθειες μοντελοποίησης από μόνο του, απαιτώντας σύντομους, περιεκτικούς και ακριβείς προσδιορισμούς των οντοτήτων και των σχέσεων.

Η γλώσσα GAMS είναι τυπικά παραπλήσια με άλλες ευρέως χρησιμοποιούμενες γλώσσες, επομένως, οποιοσδήποτε με προγραμματιστική εμπειρία μπορεί εύκολα να εξοικειωθεί. Χρησιμοποιώντας το GAMS, τα δεδομένα εισάγονται μόνο μία φορά με τη γνωστή μέθοδο λιστών και πινάκων. Τα μοντέλα περιγράφονται με σαφείς αλγεβρικές δηλώσεις, οι οποίες είναι ευανάγνωστες ταυτόχρονα για ανθρώπους και υπολογιστές. Ολόκληρα σύνολα από στενά συνδεδεμένους περιορισμούς μπορούν να εισαχθούν σε μία δήλωση. Το GAMS αυτόματα αναπαράγει κάθε εξίσωση περιορισμών και επιτρέπει στο χρήστη να κάνει εξαιρέσεις σε περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται γενικότητα. Οι δηλώσεις στα μοντέλα μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στην άλγεβρα όταν προκύπτουν άλλες περιπτώσεις του ίδιου ή σχετικού προβλήματος. Η θέση και ο τύπος του σφάλματος επισημαίνονται πριν επιχειρηθεί η επίλυση.

Το GAMS χειρίζεται τα δυναμικά μοντέλα περιλαμβάνοντας ακολουθίες χρόνου, καθυστερήσεις και προπορεύσεις, και επεξεργασία χρονικών σημείων τερματισμού. Το GAMS είναι ευέλικτο και ισχυρό. Τα μοντέλα είναι πλήρως φορητά από την μία υπολογιστική πλατφόρμα στην άλλη. Επίσης, διευκολύνει την ανάλυση της ευαισθησίας. Ο χρήστης μπορεί εύκολα να επιλύσει ένα μοντέλο για διαφορετικές τιμές ενός στοιχείου και μετά να παράγει την αναφορά εξόδου καταγράφοντας τα χαρακτηριστικά επίλυσης για κάθε περίπτωση. Τα μοντέλα μπορούν να αναπτυχθούν και να τεκμηριωθούν παράλληλα, διότι το GAMS επιτρέπει στο χρήστη να συμπεριλάβει επεξηγηματικό κείμενο ως μέρος του ορισμού οποιουδήποτε συμβόλου ή εξίσωσης. Τέλος, το GAMS έχει τη δυνατότητα να εμπλουτίζεται και να επεκτείνεται συνεχώς.

### 6.2.1 Βασικές Αρχές

Ο σχεδιασμός του GAMS έχει συγχωνεμένες ιδέες προερχόμενες από την θεωρία των συσχετιστικών βάσεων δεδομένων (relational database theory) και του μαθηματικού προγραμματισμού τις οποίες προσπάθησε να συνθέσει, έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι στρατηγικές ανάγκες των ειδικών μοντελοποίησης. Η θεωρία συσχετιστικών βάσεων δεδομένων παρέχει ένα δομημένο πλαίσιο για την ανάπτυξη δυνατοτήτων οργάνωσης και μετατροπής δεδομένων. Ο μαθηματικός προγραμματισμός παρέχει μία μέθοδο περιγραφής

του προβλήματος και μία ποικιλία μεθόδων για την επίλυση του. Οι ακόλουθες αρχές χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση του συστήματος:

1. Όλες οι υπάρχουσες αλγοριθμικές μέθοδοι πρέπει να είναι διαθέσιμες χωρίς να αλλάζει η αναπαράσταση του μοντέλου από το χρήστη. Η εισαγωγή νέων μεθόδων, ή νέων υλοποιήσεων υπάρχουσών μεθόδων, πρέπει να είναι δυνατή χωρίς απαιτούμενες αλλαγές στα υπάρχοντα μοντέλα. Γραμμικές, μη γραμμικές, μεικτού ακεραίου, μη γραμμικές μεικτού ακεραίου βελτιστοποιήσεις και μεικτής συμπληρωματικότητας προβλήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν.
2. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης πρέπει να είναι δυνατό να εκφραστεί ανεξάρτητα από τα δεδομένα που χρησιμοποιεί. Ο διαχωρισμός της λογικής και των δεδομένων επιτρέπουν σε ένα πρόβλημα να είναι μεγαλύτερο σε μέγεθος, χωρίς να αυξάνει συνεπακόλουθα και η πολυπλοκότητα της αναπαράστασης.
3. Η χρήση των μοντέλων συσχετιστικών δεδομένων απαιτεί την αυτοματοποίηση στον καταμερισμό των μέσων του υπολογιστή. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι τα μεγάλα και πολύπλοκα μοντέλα μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς να είναι απαραίτητη η ενασχόληση του χρήστη με λεπτομέρειες, όπως μεγέθη πινάκων και πρόχειρη αποθήκευση.

## 6.2.2 Επεξήγηση εντός του κώδικα

Η αναπαράσταση GAMS μοντέλων είναι σε ευανάγνωστη μορφή για τους χρήστες, αλλά και για τους υπολογιστές. Αυτό σημαίνει ότι το ίδιο το πρόγραμμα GAMS αποτελεί την επεξήγηση του μοντέλου και ότι η ξεχωριστή περιγραφή που απαιτείτο στο παρελθόν, δεν είναι πλέον αναγκαία. Επιπλέον, ο σχεδιασμός του GAMS ενσωματώνει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά που ικανοποιούν ιδιαίτερες τις ανάγκες του χρήστη για επεξήγηση:

- Η αναπαράσταση ενός μοντέλου GAMS είναι σαφής και περιεκτική και εκμεταλλεύεται πλήρως την κομψότητα της μαθηματικής αναπαράστασης.
- Όλοι οι μετασχηματισμοί των δεδομένων είναι καθορισμένοι λιτά και αλγεβρικά. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα μπορούν να εισαχθούν στην πιο στοιχειώδη τους μορφή και ότι όλες οι μετατροπές που έχουν λάβει χώρα κατά την οικοδόμηση του μοντέλου και στην αναφορά είναι διαθέσιμα για επισκόπηση.
- Το επεξηγηματικό κείμενο μπορεί να αποτελέσει μέρος του ορισμού όλων των συμβόλων και να αναπαράγεται, όποτε οι αντίστοιχες τιμές εμφανίζονται στην οθόνη εξόδου.
- Όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την κατανόηση του μοντέλου βρίσκονται σε ένα αρχείο. Βέβαια, απαιτείται οργάνωση ώστε να είναι δυνατή η πλήρης εκμετάλλευση αυτών των χαρακτηριστικών σχεδιασμού, αλλά σκοπός είναι να γίνουν τα μοντέλα πιο προσβάσιμα, πιο κατανοητά, πιο επαληθεύσιμα και, επομένως, πιο αξιόπιστα.

### 6.2.3 Φορητότητα

Το σύστημα GAMS είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε τα μοντέλα να μπορούν να επιλυθούν από διαφορετικούς υπολογιστές χωρίς να απαιτούνται αλλαγές. Ένα μοντέλο ανεπτυγμένο σε ένα μικρό προσωπικό υπολογιστή μπορεί αργότερα να επιλυθεί από ένα μεγάλο υπολογιστή mainframe. Ένα άτομο μπορεί να αναπτύξει ένα μοντέλο, το οποίο αργότερα θα χρησιμοποιηθεί από άλλους, οι οποίοι μπορεί να βρίσκονται μακριά από τον αρχικό σχεδιαστή. Σε αντίθεση με προηγούμενες προσεγγίσεις, μόνο ένα αρχείο χρειάζεται να μετακινηθεί – η δήλωση του μοντέλου στη γλώσσα GAMS, το οποίο περιέχει όλα τα δεδομένα και τις λογικές ρυθμίσεις που απαιτούνται για την επίλυση.

### 6.2.4 Περιβάλλον εργασίας-User Interface

Η υπόθεση της φορητότητας έχει συνέπειες και για το περιβάλλον εργασίας. Το κυρίως σύστημα του GAMS είναι αρχαιο-κεντρικό και δεν υπάρχουν ειδικοί επεξεργαστές κειμένου ή ρουτίνες γραφικής εισόδου και εξόδου. Αντί να επιβαρυνθεί ο χρήστης με την υποχρέωση να μάθει ακόμη ένα σύνολο διορθωτικών εντολών, το GAMS προσφέρει μία ανοιχτή αρχιτεκτονική στην οποία ο κάθε χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τον επεξεργαστή κειμένου της επιλογής του. Αυτή η βασική λειτουργία περιβάλλοντος εργασίας του GAMS διευκολύνει την ενσωμάτωσή του σε μία ποικιλία από ήδη υπάρχοντα αλλά και μελλοντικά περιβάλλοντα χρήσης.

## 6.3 ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ GAMS

Η δομή ενός κώδικα σε GAMS, δηλαδή τα στοιχεία εισόδου και εξόδου που τον απαρτίζουν φαίνεται στον Πίνακα 6.1.

**Πίνακας 6.1:** Τα βασικά συστατικά του συστήματος GAMS.

Inputs:		Outputs:
• Sets		• Echo Print
	Declaration	• Reference Maps
	Assignment of members	• Equation Listings
• Data (Parameters, Tables, Scalars)		• Status Reports
	Declaration	• Results
	Assignment of values	
• Variables		
	Declaration	
	Assignment of type	
• Assignment of bounds and/or initial values (optional)		
• Equations		
	Declaration	
	Definition	
• Model and Solve statements		
• Display statement (optional)		



Προς το παρόν θα περιοριστούμε στη κατανόηση της βασικής δομής του συστήματος GAMS αφού πρώτα επισημάνουμε κάποιες απαραίτητες παρατηρήσεις που αποτελούν και απαράβατους κανόνες του προγράμματος:

1. Ένα μοντέλο στο GAMS είναι μια συλλογή των δηλώσεων στη γλώσσα GAMS. Ο κανόνας που οδηγεί τις δηλώσεις είναι ότι κάθε οντότητα (εξαρτημένη ή ανεξάρτητη, μεταβλητή ή σταθερή) στο μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί προτού να έχει δηλωθεί παραπάνω.
2. Οι οντότητες στο GAMS μπορούν να δηλωθούν σχεδόν με οποιοδήποτε τρόπο επιθυμεί ο χρήστης. Έτσι επιτρέπονται οι δηλώσεις σε πολλαπλές γραμμές, οι κενές γραμμές μεταξύ των δηλώσεων όπως και οι πολλαπλές δηλώσεις ανά γραμμή.
3. Για κάθε νέο χρήστη του GAMS πρέπει μετά την ολοκλήρωση κάθε δήλωσης να συνοδεύεται με το σύμβολο «;» (semicolon). Ο μεταγλωττιστής (compiler) GAMS δεν διακρίνει κεφαλαία και πεζά γράμματα έτσι τα χρησιμοποιούμε όπως μας βολεύει.
4. Τα επεξηγηματικά σχόλια είναι χρήσιμα για την τεκμηρίωση των μαθηματικών μοντέλων. Είναι καλύτερα εάν ενσωματώνονται μέσα στο ίδιο το μοντέλο παρά να παρουσιάζονται ξεχωριστά. Υπάρχουν δύο τρόποι να παρεμβληθεί η επεξήγηση μέσα σε μια εφαρμογή του GAMS. Καταρχήν, οποιαδήποτε γραμμή που αρχίζει με έναν αστερίσκο (\*) στη πρώτη στήλη λαμβάνεται ως γραμμή σχολίου από το μεταγλωττιστή GAMS. Δεύτερον, ίσως το σημαντικότερο, τα σχόλια μπορούν να παρεμβληθούν μετά από τις δηλώσεις των οντοτήτων του GAMS όπως θα δούμε παρακάτω σε παράδειγμα.
5. Η δημιουργία οντοτήτων στο GAMS περιλαμβάνει δύο βήματα: μια δήλωση (declaration) και μια ανάθεση (assignment). Η δήλωση περιλαμβάνει την ύπαρξη της οντότητας στο πρόγραμμα δίνοντας ένα όνομα. Η ανάθεση ή καθορισμός δίνει μια συγκεκριμένη τιμή ή μια μορφή. Στην περίπτωση των εξισώσεων, πρέπει να γίνεται δήλωση και ανάθεση σε ξεχωριστές δηλώσεις στο GAMS. Για όλες τις άλλες οντότητες του GAMS, ωστόσο, υπάρχει η επιλογή των δηλώσεων και αναθέσεων στην ίδια δήλωση ή χωριστά.
6. Τα ονόματα που δίνονται στις οντότητες του μοντέλου πρέπει να αρχίζουν με γράμμα και μπορούν να ακολουθηθούν μέχρι και τριάντα οποιοδήποτε χαρακτήρες ή ψηφία. Τα προγράμματα στο GAMS αποτελούνται από μια ή περισσότερες δηλώσεις (statements) που καθορίζουν τις δομές δεδομένων, αρχικές τιμές, τροποποιήσεις στοιχείων, και εξισώσεις (equations). Τα σύμβολα πρέπει να δηλώνονται προτού χρησιμοποιηθούν και να έχουν οριστεί οι τιμές τους προτού οριστούν στις δηλώσεις ανάθεσης (assignment statements). Κάθε δήλωση ακολουθείται από ένα ελληνικό ερωτηματικό (;) (semicolon) εκτός από την τελευταία δήλωση, όπου το (;) είναι προαιρετικό.

### 6.3.1 Σύνολα (Sets)

Η δεσμευμένη λέξη Set ή Sets χρησιμοποιείται στο GAMS για να δηλώσει δείκτες και για να ορίσει τις δυνατές τιμές που απαρτίζουν το σύνολο. Τα σύνολα είναι θεμελιώδεις δομικές μονάδες και χρησιμεύουν σε οποιοδήποτε μοντέλο του GAMS καθώς επιτρέπουν στο

μοντέλο να δηλωθεί καλά και να διαβάζεται πιο εύκολα. Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα δήλωσης δύο συνόλων (i και j) με την εντολή Sets.

**Sets**

i deiktis1 /a1, a2, a3, a4/  
t deiktis2 /1991 \* 2000/;

όπου οι χαρακτήρες μετά τα ονόματα των συνόλων(deiktis1,deiktis2) χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν με τη μορφή σχολίου το σύνολο ή το στοιχείο που προηγείται και ο προσδιορισμός των μελών του συνόλου γίνεται ανάμεσα στα δύο σύμβολα ''/'. Ο αστερίσκος «\*» χρησιμοποιείται για την αποφυγή επίπονης δακτυλογράφησης μιας ακολουθίας στοιχείων ενός συνόλου. Έτσι στο παράδειγμά μας το /1991 \* 2000/ είναι ισοδύναμο του /1991, 1992, 1993,...,2000/.

Σύνολα σαν τα παραπάνω είναι γνωστά ως στατικά σύνολα και τα στοιχεία τους δεν αλλάζουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Είναι δυνατός ο ορισμός δυναμικών συνόλων που θα περιέχουν κάποια από τα στοιχεία ενός δεδομένου στατικού συνόλου και τα στοιχεία τους μπορούν να αλλάξουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Επιπλέον μπορούν να ορισθούν πολυδιάστατα σύνολα για την αντιστοίχιση στοιχείων που ανήκουν σε διαφορετικά σύνολα. Για παράδειγμα, για τη μοντελοποίηση ενός δικτύου με κόμβους K1 έως K4 μπορεί να ορισθεί ένα δυσδιάστατο σύνολο που να περιλαμβάνει όλες τις έγκυρες μεταβάσεις:

**Sets**

K Set komvon / K1 \* K4/  
Pairs(K, K) Antistoixisi /K1.K2,K1.K3,K2.K4,K3.K4/;

Σε μερικά προγράμματα παρουσιάζεται η ανάγκη ταυτόχρονης αναφοράς σε στοιχεία του ίδιου συνόλου. Στην περίπτωση αυτή παρέχεται από το GAMS η εντολή alias, η οποία δηλώνει ένα διαφορετικό όνομα για ένα ήδη ορισμένο σύνολο:

**Alias(K,KP);**

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι στο GAMS υπάρχουν έξι επιτρεπτοί χειριστές διατεταγμένων συνόλων: card,ord,+, -, ++ και --. Ως διατεταγμένα ορίζονται τα μονοδιάστατα σύνολα που αποτελούνται από μια διατεταγμένη ακολουθία στοιχείων, τα οποία είτε δεν ανήκουν σε κάποιο προηγουμένως ορισμένο σύνολο είτε ανήκουν αλλά διατηρούν ανέπαφη τη σχετική θέση τους.

Δοσμένου ενός στοιχείου ενός set μπορούμε να αναφερθούμε στο επόμενο ή στο προηγούμενο στοιχείο χρησιμοποιώντας τους χειριστές +1 ή -1 αντίστοιχα. Επίσης οι χειριστές ++ και - μας δίνουν τη δυνατότητα χειρισμού του set ως μίας κυκλικής λίστας, όπου πάντα θα υπάρχει προηγούμενο και επόμενο στοιχείο. Επιπρόσθετα ο χειριστής card επιστρέφει τον αριθμό των στοιχείων ενός συνόλου και ο χειριστής ord τη θέση του ζητούμενου στοιχείου μέσα στο σύνολο.

### 6.3.2 Σταθερές (Scalars)

Στο GAMS οι σταθερές δηλώνονται και προαιρετικά ανατίθεται σε αυτές μία τιμή χρησιμοποιώντας τη δεσμευμένη λέξη `Scalar` ή `Scalars`. Η σύνταξη της εντολής για μια δήλωση σταθεράς είναι η εξής:

**Scalar** όνομα\_παραμέτρου κείμενο /τιμή\_παραμέτρου/;

Το όνομα της παραμέτρου ακολουθείται από προαιρετικά σχόλια και η τιμή της δίνεται εντός των συμβόλων `''''`. Οι σταθερές χρησιμοποιούνται συχνά για ανάθεση τιμών σε μεγέθη τα οποία δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια προσομοίωσης ενός μοντέλου και είναι πολύ χρήσιμες για εποπτικούς κυρίως λόγους.

### 6.3.3 Παράμετροι και Πίνακες (Parameters & Tables)

Οι παράμετροι και οι πίνακες είναι δομές στο GAMS που χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τα δεδομένα ενός μοντέλου. Συμπεριφέρονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο με μόνη διαφορά ότι οι πίνακες στο GAMS πρέπει να έχουν δύο ή και περισσότερες διαστάσεις και ότι οι παράμετροι ουσιαστικά είναι μονοδιάστατοι πίνακες. Η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση παραμέτρου είναι:

**parameter(s)** όνομα\_παραμέτρου κείμενο /τιμή\_παραμέτρου/;

όπου οι κάθετοι / πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην αρχή και στο τέλος του καταλόγου, τα κόμματα πρέπει να χωρίζουν τα στοιχεία που εισήχθησαν σε μια γραμμή και το σύμβολο `« = »` ή το κενό χρησιμοποιείται για να χωρίσει τις ετικέτες από τις αντίστοιχες τιμές τους. Τέλος η τιμή που αναθέτει το GAMS σε παραμέτρους που δεν έχει προσδιοριστεί η τιμή είναι το μηδέν (by default value).

Η δεσμευμένη λέξη `table` ή `tables` χρησιμοποιείται για τον ορισμό ενός πίνακα. Οι πίνακες δηλώνονται με τη χρήση δύο ή περισσότερων δεικτών ενώ σχόλιο μπορεί προαιρετικά να ακολουθεί το όνομα του πίνακα όπως στο παράδειγμα:

**Table** z(i, j) Keimeno

```

    y1 y2 y3
x1 6.5 2.4 2.7
x2 7.9 0.7 3.2 ;

```

Στο παράδειγμα αυτό ο πίνακας z ορίζεται χρησιμοποιώντας τους δείκτες `''i''` και `''j''` και ανατίθεται μια τιμή σε κάθε ζευγάρι στοιχείων (x1.y1, x1.y2, x1.y3, x2.y1, x2.y2, x3.y3). Οι σχετικές θέσεις όλων των καταχωρήσεων σε έναν πίνακα είναι πολύ σημαντικές καθώς το τμήμα στηλών πρέπει να χωράει σε μία γραμμή και η ακολουθία των αριθμών που διαμορφώνουν μία σειρά πρέπει να είναι στην ίδια γραμμή στοιχειοθετημένη.

### 6.3.4 Μεταβλητές (Variables)

Η δεσμευμένη λέξη Variable ή Variables χρησιμοποιείται από το GAMS για να δηλώσει τις μεταβλητές βελτιστοποίησης που θα κληθεί αργότερα να επιλύσει το μοντέλο. Όπως αντιλαμβάνεται κανείς οι μεταβλητές απαγορεύεται να πάρουν τιμές πριν την επίλυση του προβλήματος. Η εντολή σύνταξης των μεταβλητών, είναι η ακόλουθη:

**Variables** όνομα\_μεταβλητής (σύνολο δεικτών) κείμενο;

Ένα παράδειγμα δήλωσης μεταβλητών στο GAMS:

```
Variables
x(i,j) keimeno
Z keimeno;
```

Οι διάφοροι τύποι μεταβλητών που υποστηρίζει το GAMS είναι free (ελεύθερη), positive (θετική), negative (αρνητική), binary (δυαδική) και ακέραια (integer). Πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν τα επιτρεπτά όρια μέσα στα οποία ανήκει το σύνολο τιμών μιας μεταβλητής. Για το λόγο αυτό το GAMS διαθέτει τρεις καταλήξεις (suffixes) ώστε να μπορεί κάποιος να επέμβει στο άνω και κάτω όριο των μεταβλητών. Οι καταλήξεις .up και .lo χρησιμοποιούνται για να ορίσουν το άνω και κάτω όριο μιας μεταβλητής και η κατάληξη .fx για να δώσει μία συγκεκριμένη τιμή σε μία μεταβλητή. Άλλες καταλήξεις που διαθέτει το GAMS για την επεξεργασία και την εποπτεία μεταβλητών είναι η κατάληξη .l, η οποία επιστρέφει τη βέλτιστη τιμή μιας μεταβλητής και η κατάληξη .m, που επιστρέφει την οριακή τιμή μιας μεταβλητής.

### 6.3.5 Εξισώσεις (Equations)

Ο όρος Equations χρησιμοποιείται στο GAMS για να δηλώσει τις αλγεβρικές σχέσεις που θα χρησιμοποιηθούν για να παράγουν τους περιορισμούς του επιλυόμενου μοντέλου. Στο GAMS μία εξίσωση πρέπει πρώτα να δηλωθεί και ύστερα να συνταχθεί η αλγεβρική της σχέση.

Για τη δήλωση μιας εξίσωσης χρησιμοποιείται η παρακάτω σύνταξη:

**Equations** όνομα\_εξίσωσης(σύνολο δεικτών) κείμενο;

Ενώ για τη σύνταξή της:

**όνομα\_εξίσωσης(σύνολο δεικτών).. παράσταση τύπος\_σχέσης παράσταση;**

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο τελείες ".." απαιτούνται πάντα μεταξύ του ονόματος της εξίσωσης και της έναρξης της αλγεβρικής σχέσης. Ο τύπος σχέσης αναφέρεται στο σύμβολο μεταξύ των δύο εκφράσεων που διαμορφώνουν την εξίσωση, και μπορεί να είναι κάποιο από τα ακόλουθα :

**=** Ισότητα: το δεξί μέρος της εξίσωσης πρέπει να είναι ίσο με το αριστερό μέρος

**=g=** Μεγαλύτερο ίσο: το αριστερό μέρος της εξίσωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το δεξί  
**=l=** Μικρότερο ίσο: το αριστερό μέρος της εξίσωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το δεξί  
**=n=** Διάφορο: δεν επιτρέπει στο αριστερό και στο δεξί μέρος της εξίσωσης να πάρουν την ίδια τιμή . Αυτός ο τύπος εξίσωσης χρησιμοποιείται σπάνια.

Τέλος σημειώνεται ότι πάντα η αντικειμενική συνάρτηση δηλώνεται και συντάσσεται στο μέρος των equations.

### 6.3.6 Μοντέλο ( Model)

Ως μοντέλο στο GAMS νοείται μια συλλογή εξισώσεων. Γι' αυτό το λόγο η εντολή Model χρησιμοποιείται για να καθορίσει ποιες εξισώσεις (equations) θα περιληφθούν κατά την επίλυση του μοντέλου. Γενικά η σύνταξη στο GAMS για ένα μοντέλο είναι:

**Models** όνομα\_μοντέλου κείμενο /σύνολο εξισώσεων/;

Το σύνολο εξισώσεων αποτελεί μια αναγραφή των ονομάτων των εξισώσεων που θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο, διαχωρισμένα με κόμμα ','. Αν στη θέση του συνόλου των εξισώσεων χρησιμοποιηθεί η λέξη all, το GAMS θα συμπεριλάβει όλες τις προηγουμένως ορισμένες εξισώσεις στο μοντέλο.

### 6.3.7 Επίλυση (Solve)

Η δεσμευμένη λέξη Solve χρησιμοποιείται στο GAMS για την διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος που έχει μοντελοποιηθεί. Μια εντολή επίλυσης έχει την παρακάτω μορφή:

**Solve** όνομα\_μοντέλου **using** είδος\_solver **minimizing/maximizing** όνομα\_μεταβλητής;

όπου το όνομα\_μοντέλου καθορίζεται από προηγούμενη δήλωσή του και είδος\_solver είναι ένας από τους διάφορους τύπους προβλημάτων που επιλύονται μέσω GAMS:

- NLP: Non-Linear Programming
- LP: linear programming
- MCP: Mixed Complementarity Problems
- MPEC: Mathematical Programs with Equilibrium Constraints
- CNS: Constrained Nonlinear Systems
- DNLP: Non-Linear Programming with Discontinuous Derivatives
- MINLP: Mixed-Integer Non-Linear Programming
- QCP: Quadratically Constrained Programs
- MIQCP: Mixed Integer

Έτσι λοιπόν, ο χρήστης ανάλογα με το είδος του προβλήματος που πρέπει να λύσει, επιλέγει τον καταλληλότερο από τους ενσωματωμένους solvers του συστήματος.

### 6.3.8 Έξοδος στο GAMS (GAMS Output)

Στο GAMS κατά την επίλυση του μοντέλου δημιουργείται πάντα ένα αρχείο εξόδου με κατάληξη .lst, όπου εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το πρώτο μέρος του αρχείου εξόδου είναι πάντα το Echo Print, το οποίο απαριθμεί τις εντολές που έχει δώσει ο χρήστης και ελέγχει για τυχόν σφάλματα. Το επόμενο μέρος του αρχείου εξόδου είναι το Reference Map, το οποίο απαριθμεί με αλφαβητική σειρά τις εμφανίσεις οποιασδήποτε οντότητας (set, parameter, variable, equation,...). Μετά το Reference Map ακολουθεί το Equation Listing το οποίο αναπαριστά τις εξισώσεις/περιορισμούς μαζί με το επεξηγηματικό κείμενο που έχει δώσει ο χρήστης. Η λίστα εξισώσεων είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τυχόν διόρθωση στο πρόγραμμα. Όλοι οι όροι που εξαρτώνται από τις μεταβλητές πηγαίνουν στο αριστερό μέρος, και οι σταθεροί όροι στο δεξί μέρος της λίστας εξισώσεων. Τέλος το αρχείο εξόδου εμφανίζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Μάλιστα μπορεί κανείς χρησιμοποιώντας την εντολή display να πάρει πληροφορίες για την τιμή οποιασδήποτε μεταβλητής ή αλγεβρικής σχέσης που συνδέει τις βέλτιστες τιμές των εξαγόμενων μεταβλητών.

### 6.3.9 Δηλώσεις υπό συνθήκη

Το σύμβολο '\$' έχει ιδιαίτερη σημασία στο GAMS και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δηλώσεις υπό συνθήκη. Αν και το '\$' έχει διαφορετικά αποτελέσματα σε κάθε είδος χρήσης, η λειτουργία του μπορεί να συνοψιστεί σε αυτήν ενός 'εφόσον' ή 'Αν'. Για παράδειγμα, μετά το σύνολο δεικτών στον ορισμό εξισώσεων ελέγχει τις τιμές των δεικτών δημιουργώντας εξισώσεις μόνο για τις τιμές εκείνες του δείκτη που ικανοποιούν τη συνθήκη. Η μορφή χρήσης του '\$' είναι:

παράσταση \$ (παράσταση)

Η αριστερή παράσταση ικανοποιείται εφόσον η τιμή της παράστασης στην παρένθεση είναι μη μηδενική. Μια σχεσιακή παράσταση επιστρέφει '1' εφόσον ισχύει και '0' αλλιώς. Σε λειτουργίες του GAMS πέραν του ορισμού εξισώσεων η λειτουργία του '\$' μπορεί να υποκατασταθεί από μια δήλωση 'if – then – else'.

## 6.4 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Γενικά στα μαθηματικά, μη γραμμικός προγραμματισμός (non linear programming-NLP) καλείται η διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης που ορίζεται από ένα σύστημα ισοτήτων και ανισοτήτων, που περιέχουν μια σειρά από άγνωστες πραγματικές μεταβλητές και αποτελούν τους περιορισμούς του προβλήματος, μαζί με μια αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να μεγιστοποιείται ή να ελαχιστοποιείται, όπου κάποιοι από τους

περιορισμούς ή η αντικειμενική συνάρτηση είναι μη γραμμική. Αποτελεί το τμήμα της Μαθηματικής βελτιστοποίησης που ασχολείται με προβλήματα που δεν είναι γραμμικά [6.3].

Το γενικευμένο πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} & \text{minimize or maximize } f_0(x) \\ & f(x) \sim b1 \\ & A_L x \sim b2 \\ & l \leq x \leq u \end{aligned} \tag{6.1}$$

όπου  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $f_0(x)$  είναι η γραμμική ή μη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση,  $l$  και  $u$  είναι σταθερά κάτω και πάνω όρια αντίστοιχα,  $f(x)$  είναι ένα σύνολο μη γραμμικών συναρτήσεων,  $A_L$  είναι ένας αραιός πίνακας,  $\sim$  είναι ένα διάνυσμα των τελεστών ( $\leq$ ,  $\geq$  και  $=$ ) και  $b1$ ,  $b2$  είναι σταθερές.  $f(x) \sim b1$  αποτελούν τους μη γραμμικούς περιορισμούς ενώ  $A_L x \sim b2$  τους γραμμικούς περιορισμούς του μοντέλου.

#### 6.4.1 Επιλυτής SNOPT

Η επίλυση των μοντέλων δεν γίνεται από το ίδιο το GAMS αλλά είναι μια ανεξάρτητη διαδικασία που βασίζεται σε έτοιμους επιλυτές (solvers) που χρησιμοποιούν τυποποιημένους αλγορίθμους. Η επιλογή τους και η διαμόρφωση τους γίνεται μέσω παραμέτρων που καθορίζονται ή στο σύστημα(γραφικό περιβάλλον του GAMS), ή από τη γραμμή εντολών, ή μέσω στο μοντέλο, ή από ειδικό αρχείο.

Η επιλογή του επιλυτή εξαρτάται και από το είδος του προβλήματος που θέλουμε να λύσουμε. Χαρακτηριστικές κατηγορίες προβλημάτων είναι: Non Linear programming (NLP), Mixed integer programming (MIP), Mixed integer nonlinear programming (MINLP).

Στην παρούσα εργασία, το μοντέλο που βελτιστοποιείται είναι μη γραμμικό καθώς κάποιοι από τους περιορισμούς είναι μη γραμμικοί. Ο επιλυτής που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται SNOPT [6.4]. Ο SNOPT είναι ένας επιλυτής Ακολουθιακού Τετραγωνικού Προγραμματισμού (Sequential Quadratic Programming-SQL) μεγάλης κλίμακας, που αναπτύχθηκε από τους Philip Gill (University of California, San Diego), Walter Murray και Michael Saunders (Stanford University).

Ο επιλυτής SNOPT είναι ένα σύστημα γενικού σκοπού για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης που περιέχουν πολλές μεταβλητές και περιορισμούς. Ελαχιστοποιεί μια γραμμική ή μη γραμμική συνάρτηση τυχαίων μεταβλητών που βρίσκονται σε συγκεκριμένα όρια και υπόκειται σε γραμμικούς ή μη γραμμικούς περιορισμούς. Είναι κατάλληλος για γραμμικό και τετραγωνικό προγραμματισμό μεγάλης κλίμακας, για γραμμικά περιορισμένη βελτιστοποίηση, καθώς και για γενικά μη γραμμικά προβλήματα.

Ο SNOPT βρίσκει λύσεις που είναι τοπικά βέλτιστες και, ιδανικά, οι τυχόν μη γραμμικές συναρτήσεις θα πρέπει να είναι ομαλές. Συχνά, τοπικά βέλτιστες λύσεις είναι ολικά βέλτιστες και οι ασυνέχειες στη συνάρτηση διαβάζονται από την αυτόματη μηχανή παραγωγή του GAMS.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι ένας αλγόριθμος ακολουθιακού τετραγωνικού προγραμματισμού (SQP) που λαμβάνει κατευθύνσεις εύρεσης από μια ακολουθία

υποπροβλημάτων τετραγωνικού προγραμματισμού. Κάθε τέτοιο υποπρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού ελαχιστοποιεί ένα τετραγωνικό μοντέλο μιας ορισμένης συνάρτησης Lagrange που υπόκειται σε γραμμικοποίηση των περιορισμών. Μια επαυξημένη συνάρτηση Lagrange μειώνεται κατά μήκος κάθε κατεύθυνσης εύρεσης, για να διασφαλιστεί η σύγκλιση από οποιοδήποτε σημείο εκκίνησης.

Ο επιλυτής SNOPT είναι πιο αποτελεσματικός, αν μόνο ορισμένες από τις μεταβλητές εισέρχονται μη γραμμικά, ή εάν ο αριθμός των ενεργών περιορισμών (συμπεριλαμβανομένων των απλών ορίων) είναι σχεδόν τόσο μεγάλος όσο ο αριθμός των μεταβλητών. Γενικά, απαιτεί σχετικά λίγες αξιολογήσεις των συναρτήσεων του προβλήματος.

## 6.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] The General Algebraic Modeling System (GAMS) Ανάκτηση από GAMS Home Page: <http://www.gams.com/>
- [6.2] Rosenthal, R. E. (n.d.). GAMS | A User's Guide. Ανάκτηση από <http://www.gams.com/dd/docs/bigdocs/GAMSUsersGuide.pdf>
- [6.3] Bertsekas, Dimitri P. (1999). Nonlinear Programming (Second ed.). Cambridge, MA.: Athena Scientific
- [6.4] SNOPT Solver Manual. Ανάκτηση από <http://www.gams.com/dd/docs/solvers/snopt.pdf>



## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται εφαρμογές της μεθόδου που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5 για την βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση ανεμογεννητριών σε τρία δίκτυα διανομής, ένα δίκτυο 4 ζυγών, ένα δίκτυο 15 ζυγών και ένα δίκτυο 34 ζυγών, για διάφορα σενάρια.

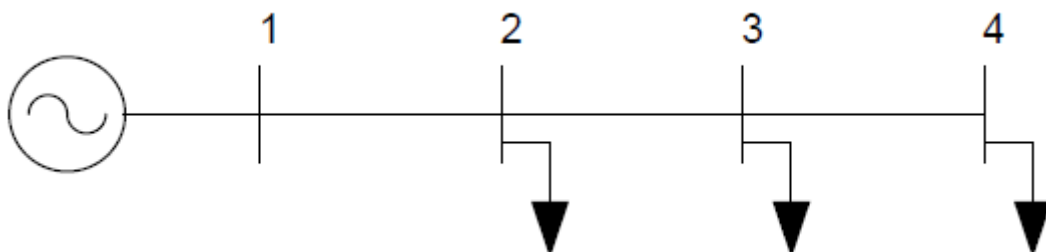
Η επίλυση γίνεται με τη βοήθεια του επιλυτή SNOPT του λογισμικού GAMS (έκδοση GAMS win32 23.9.2), που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6. Όλες οι εκτελέσεις έγιναν με τη βοήθεια Η/Υ με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής: Intel® Pentium® D CPU 3.60 GHz
- Μνήμη RAM: 2 GB
- Λειτουργικό σύστημα: Microsoft Windows 7 Ultimate version 2009.

### 7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ 4 ΖΥΓΩΝ

#### 7.2.1 Διατύπωση του προβλήματος και δεδομένα του συστήματος

Η τοπολογία του δικτύου των 4 ζυγών φαίνεται στο Σχήμα 7.1 και τα δεδομένα του στους Πίνακες 7.1 και 7.2. Πρόκειται για ακτινικό δίκτυο διανομής τάσης 20 kV, που αποτελείται από 3 γραμμές και έχει συνολικό φορτίο (1.92+1.44) MVA. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για αυτό το λόγο θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης του συστήματος, οπότε στον ζυγό 1 δεν μπορούν να συνδεθούν ανεμογεννήτριες.



Σχήμα 7.1: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 4 ζυγών.

Πίνακας 7.1: Στοιχεία γραμμών του δικτύου 4 ζυγών.

Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	R (Ω)	X (Ω)	1/2 B (Ω <sup>-1</sup> )
1	2	2.53	4.14	0
2	3	2.2	3.6	0
3	4	2.64	4.32	0

Πίνακας 7.2: Στοιχεία ζυγών του δικτύου 4 ζυγών.

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVar)
1	20	1.0	0	0	0	0	0
2	20	1.0	0	0.64	0.48	0	0
3	20	1.0	0	0.8	0.6	0	0
4	20	1.0	0	0.48	0.36	0	0

Ζητείται να βρεθεί η βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση ανεμογεννητριών, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το οικονομικό όφελος της επένδυσης του διαχειριστή-παραγωγού της σχέσης (5.5).

### 7.2.2 Ανάλυση ροών φορτίου του δικτύου

Από τα δεδομένα των γραμμών του δικτύου του Πίνακα 7.1, υπολογίζεται ο πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου,  $[Y]=[G]+j[B]$  με βάση τις σχέσεις (7.2) και (7.3).

$$Y_{ik} = -\frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}} \quad (7.2)$$

$$Y_{ii} = \sum_k^{k \in A(i)} \frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}} \quad (7.3)$$

Οπότε προκύπτει ο πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου, που δίνεται στην σχέση (7.4). Οι τιμές δίνονται σε (Ohm<sup>-1</sup>).

$$Y = \begin{bmatrix} 0.1075 - j0.1759 & -0.1075 + j0.1759 & 0 & 0 \\ -0.1075 + j0.1759 & 0.2311 - j0.3781 & -0.1236 + j0.2022 & 0 \\ 0 & -0.1236 + j0.2022 & 0.2266 - j0.3708 & -0.1030 + j0.1685 \\ 0 & 0 & -0.1236 + j0.2022 & 0.1030 - j0.1685 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (1.2) έως (1.6), εκτελείται η ανάλυση ροών φορτίου του δικτύου στο περιβάλλον GAMS ώστε να υπολογιστούν οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου, η εγγεόμενη ενεργός ισχύς μέσω του υποσταθμού και οι τάσεις των ζυγών πριν την διείσδυση ανεμογεννητριών, με αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος της σχέσης (5.6). Ο περιορισμός που τέθηκε για το δίκτυο είναι τα μέτρα των τάσεων των ζυγών να μην υπερβαίνουν το  $\pm 5\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης τους. Ως ζυγός ταλάντωσης λήφθηκε ο ζυγός 1 του συστήματος, με μέτρο τάσης ίσο με 1.0 α.μ. και γωνία ίση με 0 rad.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου πριν την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο των 4 ζυγών δίνονται στον Πίνακα 7.3.

**Πίνακας 7.3:** Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του αρχικού δικτύου 4 ζυγών.

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (Mvar)
1	20	1	0	0	0	1.975	1.474
2	19.446	0.9723	-0.011	0.64	0.48	0	0
3	19.128	0.9564	-0.018	0.8	0.6	0	0
4	19	0.95	-0.022	0.48	0.36	0	0
<b>Σύνολο:</b>				1.92	1.44	1.975	1.474

Οι ετήσιες ενεργειακές απώλειες πριν την εγκατάσταση ανεμογεννητριών υπολογίστηκαν ίσες με 485.92 MWh, ενώ η ενεργός ισχύς που εγγέεται στο δίκτυο μέσω του υποσταθμού είναι ίση με 1.975 MW.

### 7.2.3 Ντετερμινιστική προσέγγιση

Κατά την ντετερμινιστική προσέγγιση θεωρείται ότι η παραγόμενη ισχύς από τις ανεμογεννήτριες είναι σταθερή και ίση με την μέση τιμή της, όπως προκύπτει από τον συντελεστή χρησιμοποίησης, CF, των ανεμογεννητριών. Στην παρούσα εργασία, οι διαθέσιμες ανεμογεννήτριες έχουν συντελεστή χρησιμοποίησης ίσο με 0.25, οπότε η παραγωγή ισχύος από ανεμογεννήτριες στο δίκτυο είναι σταθερή και ίση με το 25% της συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. Επιπλέον, ο συντελεστής ισχύος των ανεμογεννητριών θεωρείται επαγωγικός, ίσος με 0.9. Η ζήτηση φορτίου είναι σταθερή στην αιχμή της. Ουσιαστικά, η προσέγγιση αυτή αποτελεί την παραδοσιακή τεχνική επίλυσης του προβλήματος και προκύπτει αν θεωρηθεί μια πιθανή κατάσταση στις σχέσεις (5.5) έως (5.18).

Οι περιορισμοί που τέθηκαν κατά την επίλυση του προβλήματος είναι οι εξής: α) Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών να μην υπερβαίνουν το  $\pm 5\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης τους, β) η συνολική διείσδυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο να μην ξεπερνά το 30% της ζήτησης φορτίου, γ) η εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε κάθε ζυγό να είναι λιγότερη από 2 MW και δ) το όριο της αρχικής επένδυσης ορίζεται στα 3,000,000 \$.

Τα αποτελέσματα, όπως προέκυψαν από το GAMS, δίνονται στον Πίνακα 7.4.

**Πίνακας 7.4:** Αποτελέσματα Τάσεων και Παραγωγής ζυγών μετά την βέλτιστη εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο των 4 ζυγών (Ντετερμινιστική προσέγγιση).

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (Mvar)
1	20	1	0	0	0	1.753	1.448
2	19.479	0.974	-0.09	0.64	0.48	0	0
3	19.189	0.959	-0.014	0.8	0.6	0	0
4	19.093	0.955	-0.016	0.48	0.36	0.2125	0.1029
<b>Σύνολο:</b>				1.92	1.44	1.9655	1.5509

Υπολογίστηκε ότι ο βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης των ανεμογεννητριών είναι ο ζυγός 4 του δικτύου, ενώ η βέλτιστη εγκατεστημένη αιολική ισχύς είναι ίση με 0.85 MW. Εφόσον η παραγόμενη αιολική ισχύς έχει θεωρηθεί σταθερή στην μέση τιμή της, από τον συντελεστή χρησιμοποίησης (CF=0.25) προκύπτει ότι η ισχύς που παράγουν οι ανεμογεννήτριες είναι ίση με 0.2125 MW, ενώ η ετήσια ενεργειακή τους απόδοση υπολογίζεται σε 1861.5 MWh. Οι ετήσιες ενεργειακές απώλειες είναι ίσες με 394.2 MWh, ενώ η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο μέσω του υποσταθμού είναι ίση με 1.753 MW.

Στον Πίνακα 7.5 παρουσιάζεται η οικονομική μελέτη της επένδυσης, θεωρώντας το χρόνο ζωής των ανεμογεννητριών ίσο με 20 χρόνια και λαμβάνοντας το επιτόκιο αναγωγής ίσο με 8%. Για κάθε χρόνο υπολογίζεται το κέρδος λόγω της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, το κέρδος από την μείωση της εγχεόμενης ενεργού ισχύος μέσω του υποσταθμού, το σταθερό και μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης των ανεμογεννητριών καθώς και η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης.

**Πίνακας 7.5:** Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών στο δίκτυο 4 ζυγών (Ντετερμινιστική προσέγγιση).

χρόνος	Κέρδος μείωσης απωλειών (\$)	Κέρδος μείωσης εγχεόμενης ισχύος (\$)	Σταθερό κόστος (\$)	Μεταβλητό κόστος (\$)	Κόστος Αρχικής Επένδυσης (\$)	Καθαρή Παρούσα Αξία (\$)
0	4,402.56	97,236.00	-42,500.00	-18,615.00	-1,700,000.00	-1,659,476.44
1	4,076.44	90,033.33	-39,351.85	-17,236.11	0.00	-1,621,954.62
2	3,774.49	83,364.20	-36,436.90	-15,959.36	0.00	-1,587,212.20
3	3,494.89	77,189.07	-33,737.87	-14,777.19	0.00	-1,555,043.29
4	3,236.01	71,471.36	-31,238.77	-13,682.58	0.00	-1,525,257.26
5	2,996.31	66,177.19	-28,924.79	-12,669.06	0.00	-1,497,677.61
6	2,774.36	61,275.17	-26,782.21	-11,730.61	0.00	-1,472,140.89
7	2,568.85	56,736.27	-24,798.34	-10,861.67	0.00	-1,448,495.79
8	2,378.57	52,533.59	-22,961.43	-10,057.11	0.00	-1,426,602.17
9	2,202.38	48,642.21	-21,260.58	-9,312.13	0.00	-1,406,330.30
10	2,039.24	45,039.08	-19,685.72	-8,622.35	0.00	-1,387,560.05

**Πίνακας 7.5:** Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών στο δίκτυο 4 ζυγών (Ντετερμινιστική προσέγγιση) (συνέχεια).

χρόνος	Κέρδος μείωσης απωλειών (\$)	Κέρδος μείωσης εγγεόμενης ισχύος (\$)	Σταθερό κόστος (\$)	Μεταβλητό κόστος (\$)	Κόστος Αρχικής Επένδυσης (\$)	Καθαρή Παρούσα Αξία (\$)
11	1,888.18	41,702.85	-18,227.52	-7,983.65	0.00	-1,370,180.19
12	1,748.32	38,613.75	-16,877.33	-7,392.27	0.00	-1,354,087.73
13	1,618.81	35,753.48	-15,627.16	-6,844.70	0.00	-1,339,187.30
14	1,498.90	33,105.07	-14,469.59	-6,337.68	0.00	-1,325,390.60
15	1,387.87	30,652.84	-13,397.77	-5,868.22	0.00	-1,312,615.89
16	1,285.07	28,382.26	-12,405.34	-5,433.54	0.00	-1,300,787.45
17	1,189.88	26,279.87	-11,486.43	-5,031.06	0.00	-1,289,835.19
18	1,101.74	24,333.21	-10,635.58	-4,658.39	0.00	-1,279,694.20
19	1,020.13	22,530.75	-9,847.76	-4,313.32	0.00	-1,270,304.41
<b>Σύνολο:</b>	46,682.99	1,031,051.57	-450,652.97	-197,386.00	-1,700,000.00	-1,270,304.41

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.5, η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης μετά το πέρας του χρόνου ζωής της είναι αρνητική, οπότε η επένδυση κρίνεται ασύμφορη. Τα οφέλη από την μείωση των ενεργειακών απωλειών και κυρίως από τη μείωση του κόστους αγοράς ενέργειας μέσω του υποσταθμού δεν κατάφεραν να καλύψουν το κόστος της αρχικής επένδυσης.

#### 7.2.4 Πιθανοτική προσέγγιση

Κατά την προσέγγιση αυτή, χρησιμοποιείται το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5. Με βάση την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου, υπολογίζεται η παραγόμενη αιολική ισχύς σε κάθε κατάσταση και η αντίστοιχη πιθανότητα. Ομοίως για το φορτίο, λαμβάνονται πιθανές καταστάσεις για την ζήτηση ως ποσοστό της αιχμής της. Ο συνδυασμός των πιθανών καταστάσεων παραγωγής και ζήτησης δίνει όλες τις πιθανές καταστάσεις του συστήματος, όπως φαίνονται στον Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α.

Οι περιορισμοί που τέθηκαν κατά την επίλυση του προβλήματος είναι οι εξής: α) Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών να μην υπερβαίνουν το  $\pm 5\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης τους, β) η συνολική διείσδυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο να μην ξεπερνά το 30% της ζήτησης φορτίου, γ) η εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε κάθε ζυγό να είναι λιγότερη από 2 MW και δ) το όριο της αρχικής επένδυσης ορίζεται στα 3,000,000 \$.

Για κάθε πιθανή κατάσταση του συστήματος, το GAMS εκτελεί την βέλτιστη ροή φορτίου, με αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης την μεγιστοποίηση του οφέλους της οικονομικής επένδυσης από την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο. Έτσι σε κάθε κατάσταση, αντιστοιχεί ένας πίνακας που περιέχει τα μεγέθη των τάσεων και των γωνιών των ζυγών, την παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος, την ζήτηση φορτίου καθώς και τις

ενεργειακές απώλειες. Από την πιθανότητα εμφάνισης κάθε κατάστασης υπολογίζονται οι μέσες τιμές των παραπάνω μεγεθών, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.6.

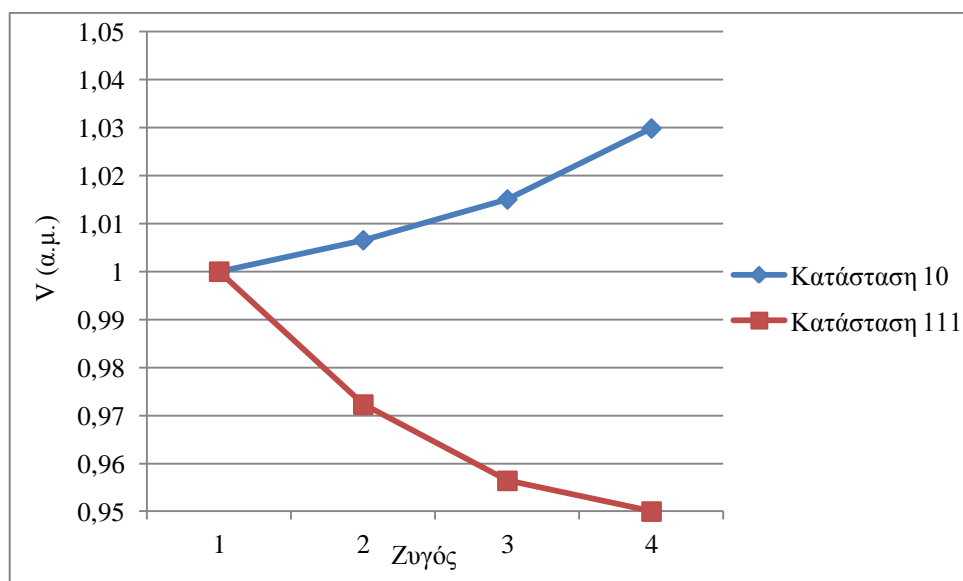
**Πίνακας 7.6:** Αποτελέσματα Τάσεων και Παραγωγής ζυγών μετά την βέλτιστη εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο των 4 ζυγών (Πιθανοτική προσέγγιση).

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (Mvar)
1	20	1	0	0	0	0.827	0.77
2	19.736	0.987	-0.04	0.394	0.295	0	0
3	19.605	0.980	-0.05	0.493	0.37	0	0
4	19.604	0.980	-0.04	0.295	0.221	0.37	0.179
<b>Σύνολο:</b>				1.182	0.886	1.197	0.949

Όπως προέκυψε από το GAMS, ο βέλτιστος ζυγός για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο είναι ο ζυγός 4, όπως προέκυψε και από την ντετερμινιστική προσέγγιση, ενώ το βέλτιστο μέγεθος της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος είναι ίσο με 1.5 MW, σχεδόν το διπλάσιο από ότι προέκυψε κατά την ντετερμινιστική προσέγγιση.

Η μέση παραγόμενη ισχύς από τις ανεμογεννήτριες υπολογίστηκε σε 0.37 MW, ενώ η ετήσια ενεργειακή τους απόδοση είναι ίση με 3741.2 MWh. Οι ετήσιες απώλειες ενεργού ισχύος είναι ίσες με 131.4 MWh, ενώ η μέση εγχεόμενη ενεργός ισχύς μέσω του υποσταθμού ισούται με 0.827 MW.

Στο Σχήμα 7.2, παρουσιάζονται οι τιμές της τάσης των ζυγών στις δυο ακραίες περιπτώσεις, όταν η παραγωγή αιολικής ισχύος είναι μέγιστη και η ζήτηση ελάχιστη και όταν η ζήτηση είναι στην αιχμή της και η παραγωγή αιολική ισχύος μηδενική, στις καταστάσεις 10 και 111 δηλαδή, του Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α αντίστοιχα.



**Σχήμα 7.2:** Τάση των ζυγών στις δυο ακραίες περιπτώσεις παραγωγής και ζήτησης.

Στον Πίνακα 7.7 παρουσιάζεται η οικονομική μελέτη της επένδυσης, θεωρώντας το χρόνο ζωής των ανεμογεννητριών ίσο με 20 χρόνια και λαμβάνοντας το επιτόκιο αναγωγής ίσο με 8%. Για κάθε χρόνο υπολογίζεται το κέρδος λόγω της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, το κέρδος από την μείωση της εγχεόμενης ενεργού ισχύος από τον υποσταθμό, το σταθερό και μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης των ανεμογεννητριών καθώς και η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης.

**Πίνακας 7.7:** Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών στο δίκτυο 4 ζυγών (Πιθανοτική προσέγγιση).

χρόνος	Κέρδος μείωσης απωλειών (\$)	Κέρδος μείωσης εγχεόμενης ισχύος (\$)	Σταθερό κόστος (\$)	Μεταβλητό κόστος (\$)	Κόστος Αρχικής Επένδυσης (\$)	Καθαρή Παρούσα Αξία (\$)
0	17,016.96	502,824.00	-75,000.00	-32,412.00	-3,000,000.00	-2,587,571.04
1	15,756.44	465,577.78	-69,444.44	-30,011.11	0.00	-2,205,692.37
2	14,589.30	431,090.53	-64,300.41	-27,788.07	0.00	-1,852,101.01
3	13,508.61	399,157.90	-59,537.42	-25,729.69	0.00	-1,524,701.61
4	12,507.97	369,590.65	-55,127.24	-23,823.79	0.00	-1,221,554.01
5	11,581.46	342,213.57	-51,043.74	-22,059.06	0.00	-940,861.79
6	10,723.57	316,864.41	-47,262.72	-20,425.06	0.00	-680,961.58
7	9,929.23	293,392.97	-43,761.78	-18,912.09	0.00	-440,313.25
8	9,193.73	271,660.16	-40,520.17	-17,511.20	0.00	-217,490.71
9	8,512.72	251,537.19	-37,518.67	-16,214.07	0.00	-11,173.55
10	7,882.15	232,904.80	-34,739.51	-15,013.03	0.00	179,860.86
11	7,298.28	215,652.59	-32,166.21	-13,900.95	0.00	356,744.57
12	6,757.67	199,678.33	-29,783.53	-12,871.25	0.00	520,525.78
13	6,257.10	184,887.34	-27,577.34	-11,917.83	0.00	672,175.06
14	5,793.61	171,191.98	-25,534.58	-11,035.02	0.00	812,591.05
15	5,364.46	158,511.10	-23,643.13	-10,217.61	0.00	942,605.86
16	4,967.09	146,769.53	-21,891.79	-9,460.75	0.00	1,062,989.94
17	4,599.16	135,897.72	-20,270.17	-8,759.96	0.00	1,174,456.68
18	4,258.48	125,831.22	-18,768.68	-8,111.07	0.00	1,277,666.63
19	3,943.03	116,510.39	-17,378.40	-7,510.25	0.00	1,373,231.39
<b>Σύνολο:</b>	180,441.03	5,331,744.16	-795,269.94	-343,683.86	-3,000,000.00	1,373,231.39

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.6, η απόσβεση της επένδυσης για την εγκατάσταση 1.5MW αιολικής ισχύος στο δίκτυο πραγματοποιείται 10 χρόνια μετά από την αρχική επένδυση και εφόσον η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης είναι θετική μετά το πέρας ζωής της, η επένδυση κρίνεται συμφέρουσα. Η μεγαλύτερη συνεισφορά στα έσοδα κάθε χρόνου οφείλεται στην σημαντική μείωση της εγχεόμενης ενεργού ισχύος μέσω του υποσταθμού και συνεπώς στην μείωση του κόστους αγοράς ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς.

### 7.2.5 Σύγκριση των δυο προσεγγίσεων

Παρόλο που και από τις δυο προσεγγίσεις του προβλήματος προέκυψε ότι ο βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ανεμογεννητριών για το δίκτυο των 4 ζυγών είναι ο ζυγός 4, η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς κατά την πιθανοτική προσέγγιση υπολογίστηκε ίση με 1.5 MW, σχεδόν διπλάσια από τα 0.85 MW που προέκυψαν από την ντετερμινιστική προσέγγιση. Επίσης, τα αποτελέσματα όσον αφορά τις απώλειες ενεργού ισχύος, την εγχεόμενη ενεργό ισχύ μέσω του υποσταθμού και γενικότερη την αξιολόγηση της επένδυσης διαφέρουν σημαντικά ανάμεσα στις δυο προσεγγίσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την ντετερμινιστική προσέγγιση του προβλήματος βελτιστοποίησης, λαμβάνεται μια μόνο πιθανή κατάσταση όπου η παραγόμενη αιολική ισχύς είναι σταθερή στη μέση τιμή της και το φορτίου στην αιχμή του σε αντίθεση με την πιθανοτική προσέγγιση, όπου τόσο η παραγωγή αιολική ισχύος όσο και η ζήτηση φορτίου μεταβάλλονται.

Στον Πίνακα 7.8 παρουσιάζεται η σύγκριση των κύριων παραμέτρων των δυο προσεγγίσεων για το δίκτυο των 4 ζυγών, τον 1<sup>ο</sup> χρόνο της επένδυσης.

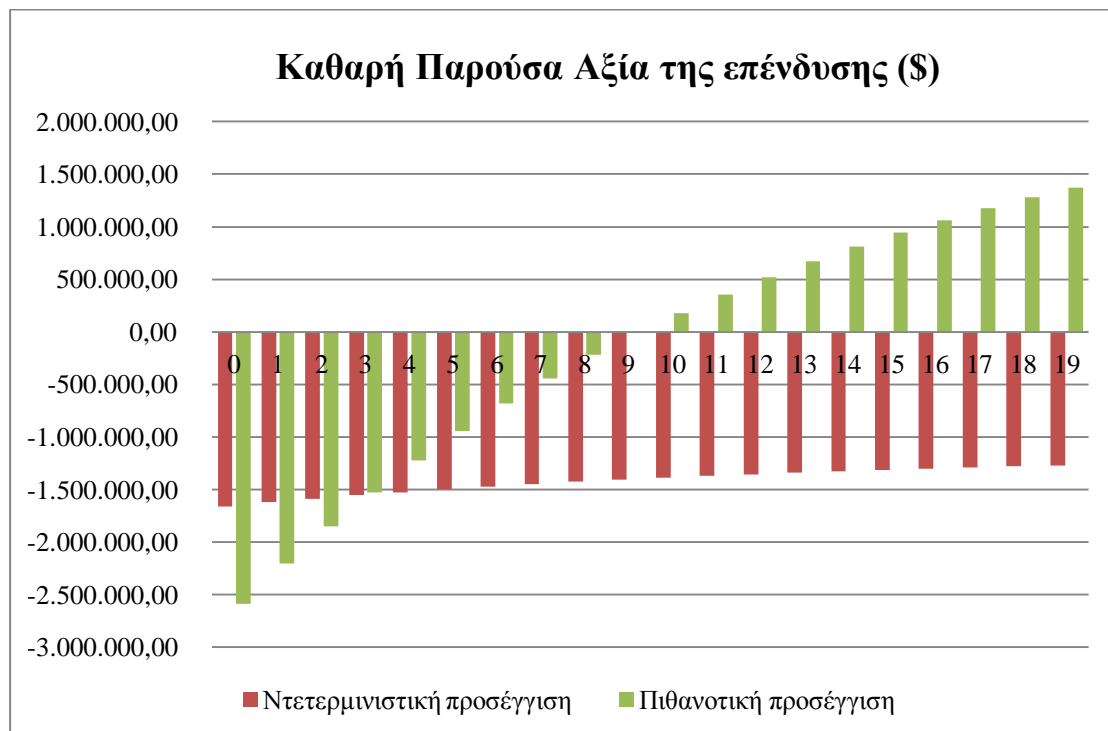
**Πίνακας 7.8:** Σύγκριση της ντετερμινιστικής και της πιθανοτικής προσέγγισης για το δίκτυο των 4 ζυγών, τον 1<sup>ο</sup> χρόνο της επένδυσης.

Παράμετρος	Αρχικό δίκτυο	Ντετερμινιστική προσέγγιση	Πιθανοτική προσέγγιση
Ενεργειακές απώλειες (MWh)	485.92	394.20	131.40
Μείωση ενεργειακών απωλειών (%)	-	18.88	72.96
Οικονομικό όφελος από την μείωση των απωλειών (\$)	-	4,402.56	17,016.96
Ενεργός ισχύς υποσταθμού (MW)	1.975	1.75	0.83
Μείωση ενεργού ισχύος υποσταθμού (%)	-	11.29	58.13
Οικονομικό όφελος από την μείωση ενεργού ισχύος υποσταθμού (\$)	-	97,236.00	502,824.00
Συνολικό φορτίο (MVA <sub>r</sub> )	1.92+j1.44	1.92+j1.44	1.182+j0.886
Μείωση συνολικού φορτίου (%)	-	-	38.44
Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	-	0.85	1.50
Ετήσια ενεργειακή απόδοση ανεμογεννητριών (MWh)	-	1861.5	3241.20
Αρχική επένδυση (\$)	-	1,700,000.00	3,000,000.00



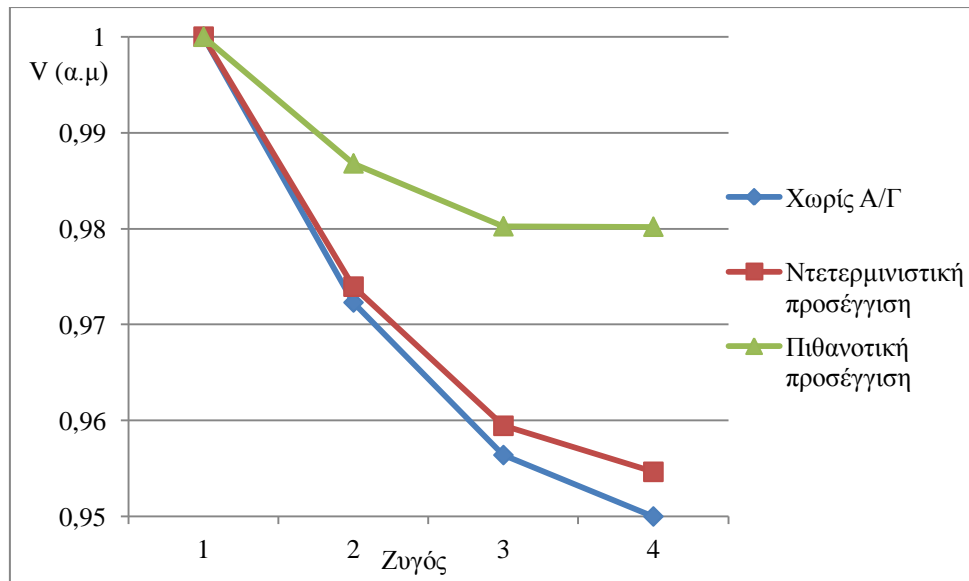
Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.8, σημαντικό ρόλο στη διαφοροποίηση των δυο προσεγγίσεων διαδραματίζει η συνολική ζήτηση φορτίου. Κατά την ντετερμινιστική προσέγγιση, το φορτίο θεωρείται σταθερό στην αιχμή του, ενώ στην πιθανοτική προσέγγιση μεταβάλλεται σύμφωνα με τον Πίνακα 5.3. Με τον τρόπο αυτό, η συνολική μέση ζήτηση φορτίου μειώνεται κατά 38.44% σε σχέση με την ζήτηση του αρχικού δικτύου, μειώνοντας έτσι τόσο τις ενεργειακές απώλειες, όσο και την εγχεόμενη ισχύ μέσω του υποσταθμού, μεγιστοποιώντας παράλληλα τα οικονομικά οφέλη.

Στο Σχήμα 7.3 αναπαρίσταται η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης των δυο προσεγγίσεων κατά την περίοδο των 20 χρόνων.



**Σχήμα 7.3:** Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης των δυο προσεγγίσεων για το δίκτυο των 4 ζυγών.

Εκτός από την θετική επίδραση στις απώλειες ενεργού ισχύος και στην ενεργό ισχύ που εγχέεται στο σύστημα μέσω του υποσταθμού, η διείσδυση αιολικής ισχύος βελτιώνει και την τιμή της τάσης στους ζυγούς. Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζονται τα μέτρα της τάσης των ζυγών του δικτύου 4 ζυγών πριν την διείσδυση ανεμογεννητριών και αυτά που υπολογίστηκαν μετά την εγκατάσταση ανεμογεννητριών, κατά την ντετερμινιστική και πιθανοτική προσέγγιση. Όσον αφορά την πιθανοτική προσέγγιση, αναπαρίσταται η μέση τιμή της τάσης των ζυγών, όπως προκύπτει από την πιθανότητα εμφάνισης κάθε κατάσταση.

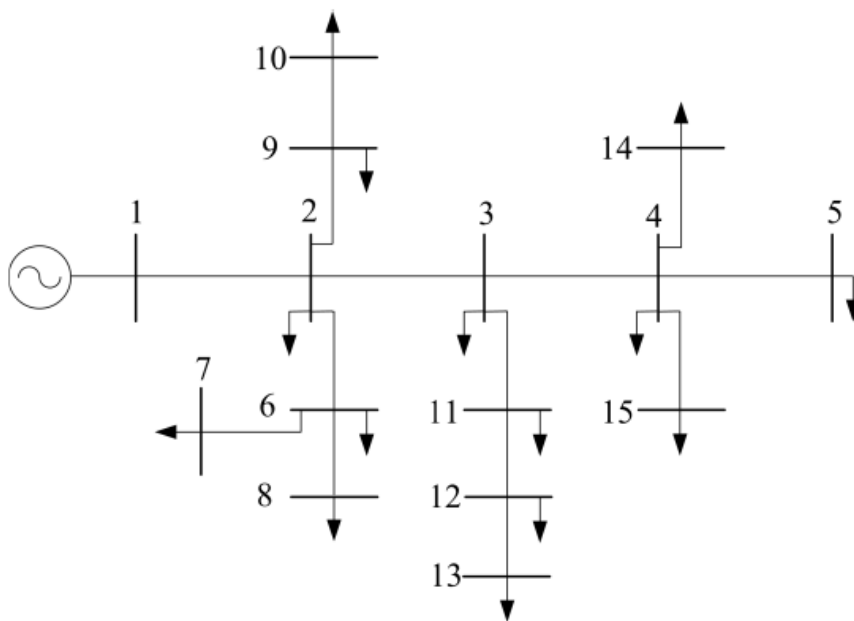


Σχήμα 7.4: Τάση των ζυγών κάθε προσέγγισης για το δικτύου 4 ζυγών.

### 7.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ 15 ΖΥΓΩΝ

#### 7.3.1 Διατύπωση του προβλήματος και δεδομένα του συστήματος

Η τοπολογία του δικτύου των 15 ζυγών φαίνεται στο Σχήμα 7.5 και τα δεδομένα του στους Πίνακες 7.9 και 7.10. Πρόκειται για ακτινικό δίκτυο διανομής τάσης 20 kV, που αποτελείται από 14 γραμμές και έχει συνολικό φορτίο (3+2,66) MVA. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για αυτό το λόγο θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης του συστήματος, οπότε στον ζυγό 1 δεν μπορούν να συνδεθούν ανεμογεννήτριες.



Σχήμα 7.5: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 15 ζυγών.

Πίνακας 7.9: Στοιχεία γραμμών του δικτύου 15 ζυγών.

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVA <sub>r</sub> )	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVA <sub>r</sub> )
1	20	1.0	0	0	0	0	0
2	20	1.0	0	0.7	0.54	0	0
3	20	1.0	0	0.21	0.16	0	0
4	20	1.0	0	0.28	0.2	0	0
5	20	1.0	0	0.3	0.17	0	0
6	20	1.0	0	0.15	0.11	0	0
7	20	1.0	0	0.08	0.05	0	0
8	20	1.0	0	0.15	0.12	0	0
9	20	1.0	0	0.06	0.04	0	0
10	20	1.0	0	0.28	0.2	0	0
11	20	1.0	0	0.19	0.13	0	0
12	20	1.0	0	0.18	0.15	0	0
13	20	1.0	0	0.13	0.09	0	0
14	20	1.0	0	0.12	0.6	0	0
15	20	1.0	0	0.17	0.1	0	0

Πίνακας 7.10: Στοιχεία ζυγών του δικτύου 15 ζυγών.

Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	R (Ω)	X (Ω)	1/2 B (Ω <sup>-1</sup> )
1	2	1.3531	1.3235	0
2	3	1.7102	1.446	0
3	4	0.8411	0.8227	0
4	5	1.5235	1.0276	0
2	9	2.0132	1.3579	0
9	10	1.6867	1.1377	0
2	6	2.5537	1.7249	0
6	7	1.0882	0.734	0
6	8	1.2514	0.8441	0
3	11	1.7955	1.2111	0
11	12	2.4485	1.6515	0
12	13	2.0132	1.3579	0
4	14	2.2308	1.5047	0
4	15	1.179	0.8074	0

Ζητείται να βρεθεί η βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση ανεμογεννητριών, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το οικονομικό όφελος της επένδυσης.

### 7.3.2 Ανάλυση ροών φορτίου του δικτύου

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (1.2) έως (1.6), εκτελείται η ανάλυση ροών φορτίου του δικτύου στο περιβάλλον GAMS ώστε να υπολογιστούν οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου, η εγγεόμενη ενεργός ισχύς μέσω του υποσταθμού και οι τάσεις των ζυγών πριν την διείσδυση ανεμογεννητριών, με αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος της σχέσης (5.6). Ο περιορισμός που τέθηκε για το δίκτυο είναι τα μέτρα των τάσεων των ζυγών να μην υπερβαίνουν το  $\pm 5\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης τους. Ως ζυγός ταλάντωσης λήφθηκε ο ζυγός 1 του συστήματος, με μέτρο τάσης ίσο με 1.0 α.μ. και γωνία ίση με 0 rad.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου πριν την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο των 4 ζυγών δίνονται στον Πίνακα 7.11.

**Πίνακας 7.11:** Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του αρχικού δικτύου 15 ζυγών.

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (Mvar)
1	20	1	0	0	0	3.094	2.708
2	19.612	0.9806	-0.001	0.7	0.54	0	0
3	19.351	0.96755	0.00009	0.21	0.16	0	0
4	19.267	0.96335	0.0006	0.28	0.2	0	0
5	19.234	0.9617	0.0005	0.3	0.17	0	0
6	19.537	0.97685	-0.0009	0.15	0.11	0	0
7	19.531	0.97655	-0.001	0.08	0.05	0	0
8	19.522	0.9761	-0.0009	0.15	0.12	0	0
9	19.562	0.9781	-0.001	0.06	0.04	0	0
10	19.527	0.97635	-0.001	0.28	0.2	0	0
11	19.281	0.96405	0.0002	0.19	0.13	0	0
12	19.221	0.96105	0.0004	0.18	0.15	0	0
13	19.201	0.96005	0.0005	0.13	0.09	0	0
14	19.206	0.9603	0.004	0.12	0.6	0	0
15	19.252	0.9626	0.0005	0.17	0.1	0	0
<b>Σύνολο:</b>				3	2.66	3.094	2.708

Οι ετήσιες ενεργειακές απώλειες πριν την εγκατάσταση ανεμογεννητριών υπολογίστηκαν ίσες με 821.44 MWh, ενώ η ενεργός ισχύς που εγγέεται στο δίκτυο μέσω του υποσταθμού είναι ίση με 3.094 MW.

### 7.3.3 Ντετερμινιστική προσέγγιση

Κατά την ντετερμινιστική προσέγγιση θεωρείται ότι η παραγόμενη ισχύς από τις ανεμογεννήτριες είναι σταθερή και ίση με την μέση τιμή της, όπως προκύπτει από τον συντελεστή χρησιμοποίησης, CF, των ανεμογεννητριών. Στην παρούσα εργασία, οι διαθέσιμες ανεμογεννήτριες έχουν συντελεστή χρησιμοποίησης ίσο με 0.25, οπότε η παραγωγή ισχύος από ανεμογεννήτριες στο δίκτυο είναι σταθερή και ίση με το 25% της συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. Επιπλέον, ο συντελεστής ισχύος των ανεμογεννητριών θεωρείται επαγωγικός, ίσος με 0.9. Η ζήτηση φορτίου είναι σταθερή στην αιχμή της. Ουσιαστικά, η προσέγγιση αυτή αποτελεί την παραδοσιακή τεχνική επίλυσης του προβλήματος και προκύπτει αν θεωρηθεί μια πιθανή κατάσταση στις σχέσεις (5.5) έως (5.18).

Οι περιορισμοί που τέθηκαν κατά την επίλυση του προβλήματος είναι οι εξής: α) Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών να μην υπερβαίνουν το  $\pm 5\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης τους, β) η συνολική διείσδυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο να μην ξεπερνά το 30% της ζήτησης φορτίου γ) οι υποψήφιοι ζυγοί σύνδεσης ανεμογεννητριών είναι οι ζυγοί 2, 5, 8, 10 και 13 ενώ δ) το όριο της αρχικής επένδυσης ορίζεται στα 3,000,000 \$.

Τα αποτελέσματα, όπως προέκυψαν από το GAMS, δίνονται στον Πίνακα 7.12.

**Πίνακας 7.12:** Αποτελέσματα Τάσεων και Παραγωγής ζυγών μετά την βέλτιστη εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο των 15 ζυγών (Ντετερμινιστική προσέγγιση).

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (Mvar)
1	20	1	0	0	0	2.868	2.593
2	19.634	0.9817	-0.0007	0.7	0.54	0	0
3	19.401	0.97005	0.0008	0.21	0.16	0	0
4	19.317	0.96585	0.001	0.28	0.2	0	0
5	19.285	0.96425	0.001	0.3	0.17	0	0
6	19.56	0.978	-0.0005	0.15	0.11	0	0
7	19.554	0.9777	-0.0006	0.08	0.05	0	0
8	19.545	0.97725	-0.0005	0.15	0.12	0	0
9	19.585	0.97925	-0.0009	0.06	0.04	0	0
10	19.55	0.9775	-0.008	0.28	0.2	0	0
11	19.358	0.9679	0.001	0.19	0.13	0	0
12	19.334	0.9667	0.002	0.18	0.15	0	0
13	19.343	0.96715	0.002	0.13	0.09	0.2125	0.1029
14	19.256	0.9628	0.004	0.12	0.6	0	0
15	19.303	0.96515	0.001	0.17	0.1	0	0
<b>Σύνολο:</b>				3	2.66	3.0805	2.6959

Υπολογίστηκε ότι ο βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης των ανεμογεννητριών είναι ο ζυγός 13 του δικτύου, ενώ η βέλτιστη εγκατεστημένη αιολική ισχύς είναι ίση με 0.85 MW. Εφόσον η παραγόμενη αιολική ισχύς έχει θεωρηθεί σταθερή στην μέση τιμή της, από τον συντελεστή

χρησιμοποίησης ( $CF=0.25$ ) προκύπτει ότι η ισχύς που παράγουν οι ανεμογεννήτριες είναι ίση με 0.2125 MW, ενώ η ετήσια ενεργειακή τους απόδοση υπολογίζεται σε 1861.5 MWh. Οι ετήσιες ενεργειακές απώλειες είναι ίσες με 709.56 MWh, ενώ η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο μέσω του υποσταθμού είναι ίση με 2.868 MW.

Στον Πίνακα 7.13 παρουσιάζεται η οικονομική μελέτη της επένδυσης, θεωρώντας το χρόνο ζωής των ανεμογεννητριών ίσο με 20 χρόνια και λαμβάνοντας το επιτόκιο αναγωγής ίσο με 8%. Για κάθε χρόνο υπολογίζεται το κέρδος λόγω της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, το κέρδος από την μείωση της εγχεόμενης ενεργού ισχύος μέσω του υποσταθμού, το σταθερό και μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης των ανεμογεννητριών καθώς και η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης.

**Πίνακας 7.13:** Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών στο δίκτυο 15 ζυγών (Ντετερμινιστική προσέγγιση).

χρόνος	Κέρδος μείωσης απωλειών (\$)	Κέρδος μείωσης εγχεόμενης ισχύος (\$)	Σταθερό κόστος (\$)	Μεταβλητό κόστος (\$)	Κόστος Αρχικής Επένδυσης (\$)	Καθαρή Παρούσα Αξία (\$)
0	5,370.43	98,988.00	-42,500.00	-18,615.00	-1,700,000.00	-1,656,756.57
1	4,972.62	91,655.56	-39,351.85	-17,236.11	0.00	-1,616,716.36
2	4,604.28	84,866.26	-36,436.90	-15,959.36	0.00	-1,579,642.09
3	4,263.22	78,579.87	-33,737.87	-14,777.19	0.00	-1,545,314.06
4	3,947.43	72,759.14	-31,238.77	-13,682.58	0.00	-1,513,528.85
5	3,655.02	67,369.57	-28,924.79	-12,669.06	0.00	-1,484,098.10
6	3,384.28	62,379.23	-26,782.21	-11,730.61	0.00	-1,456,847.40
7	3,133.59	57,758.55	-24,798.34	-10,861.67	0.00	-1,431,615.28
8	2,901.48	53,480.14	-22,961.43	-10,057.11	0.00	-1,408,252.20
9	2,686.55	49,518.64	-21,260.58	-9,312.13	0.00	-1,386,619.71
10	2,487.55	45,850.60	-19,685.72	-8,622.35	0.00	-1,366,589.64
11	2,303.29	42,454.26	-18,227.52	-7,983.65	0.00	-1,348,043.27
12	2,132.67	39,309.50	-16,877.33	-7,392.27	0.00	-1,330,870.71
13	1,974.70	36,397.68	-15,627.16	-6,844.70	0.00	-1,314,970.19
14	1,828.42	33,701.56	-14,469.59	-6,337.68	0.00	-1,300,247.49
15	1,692.98	31,205.15	-13,397.77	-5,868.22	0.00	-1,286,615.36
16	1,567.58	28,893.65	-12,405.34	-5,433.54	0.00	-1,273,993.01
17	1,451.46	26,753.38	-11,486.43	-5,031.06	0.00	-1,262,305.66
18	1,343.94	24,771.65	-10,635.58	-4,658.39	0.00	-1,251,484.03
19	1,244.39	22,936.71	-9,847.76	-4,313.32	0.00	-1,241,464.01
<b>Σύνολο:</b>	<b>56,945.88</b>	<b>1,049,629.08</b>	<b>-450,652.97</b>	<b>-197,386.00</b>	<b>-1,700,000.00</b>	<b>-1,241,464.01</b>

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.13, η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης μετά το πέρας του χρόνου ζωής της είναι αρνητική, οπότε η επένδυση κρίνεται ασύμφορη.

### 7.3.4 Πιθανοτική προσέγγιση

Οι περιορισμοί που τέθηκαν κατά την επίλυση του προβλήματος είναι οι εξής: α) Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών να μην υπερβαίνουν το  $\pm 5\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης τους, β) η συνολική διείσδυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο να μην ξεπερνά το 30% της ζήτησης φορτίου γ) οι υποψήφιοι ζυγοί σύνδεσης ανεμογεννητριών είναι οι ζυγοί 2, 5, 8, 10 και 13 ενώ δ) το όριο της αρχικής επένδυσης ορίζεται στα 3,000,000 \$.

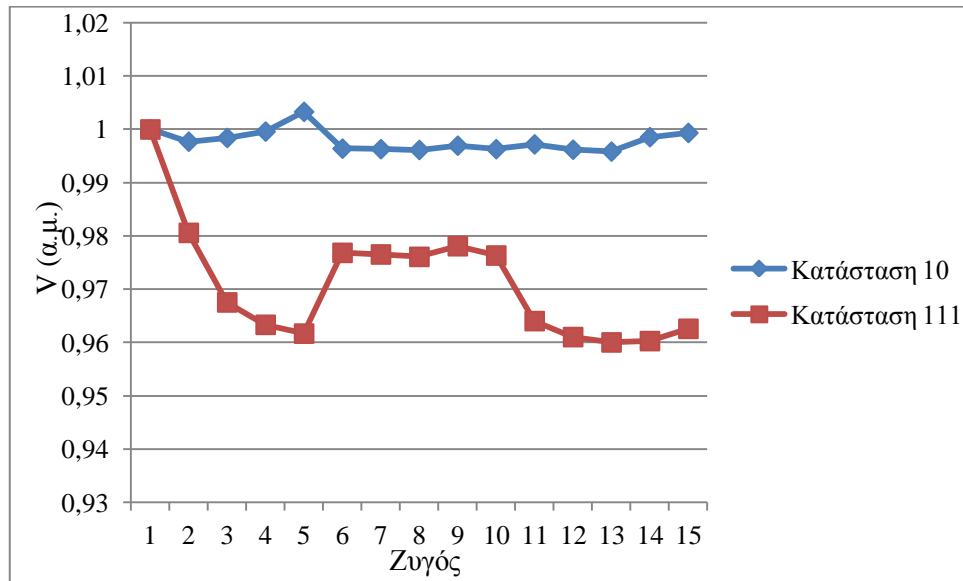
Τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από το GAMS παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.14.

**Πίνακας 7.14:** Αποτελέσματα Τάσεων και Παραγωγής ζυγών μετά την βέλτιστη εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο των 15 ζυγών (Πιθανοτική προσέγγιση).

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (Mvar)
1	20	1	0	0	0	1.667	1.524
2	19.768	0.9884	-0.0004	0.431	0.332	0	0
3	19.654	0.9827	0.0006	0.129	0.098	0	0
4	19.616	0.9808	0.001	0.172	0.123	0	0
5	19.618	0.9809	0.001	0.185	0.105	0.21	0.1017
6	19.74	0.987	-0.0002	0.092	0.068	0	0
7	19.737	0.98685	-0.0003	0.049	0.031	0	0
8	19.731	0.98655	-0.0002	0.092	0.074	0	0
9	19.757	0.98785	-0.0005	0.037	0.025	0	0
10	19.735	0.98675	-0.0005	0.172	0.123	0	0
11	19.611	0.98055	0.0007	0.117	0.080	0	0
12	19.575	0.97875	0.0008	0.111	0.092	0	0
13	19.563	0.97815	0.0009	0.080	0.055	0	0
14	19.579	0.97895	0.003	0.074	0.369	0	0
15	19.607	0.98035	0.001	0.105	0.062	0	0
<b>Σύνολο:</b>				1.846	1.637	1.877	1.6257

Υπολογίστηκε ότι η βέλτιστη εγκατεστημένη αιολική ισχύς είναι ίση με 0.85 MW, όπως προέκυψε και κατά την ντετερμινιστική προσέγγιση, αλλά βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ανεμογεννητριών είναι ο ζυγός 5 του δικτύου, σε αντίθεση με την ντετερμινιστική προσέγγιση όπου ως βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης υπολογίστηκε ο ζυγός 13. Η μέση παραγόμενη ισχύς από τις ανεμογεννήτριες υπολογίστηκε σε 0.21 MW, ενώ η ετήσια ενεργειακή τους απόδοση είναι ίση με 1836 MWh. Οι ετήσιες απώλειες ενεργού ισχύος είναι ίσες με 262.07 MWh, ενώ η μέση εγχεόμενη ενεργός ισχύς μέσω του υποσταθμού ισούται με 1.667 MW.

Στο Σχήμα 7.6, παρουσιάζονται οι τιμές της τάσης των ζυγών στις δυο ακραίες περιπτώσεις, όταν η παραγωγή αιολικής ισχύος είναι μέγιστη και η ζήτηση ελάχιστη και όταν η ζήτηση είναι στην αιχμή της και η παραγωγή αιολικής ισχύος μηδενική, στις καταστάσεις 10 και 111 δηλαδή, του Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α αντίστοιχα.



**Σχήμα 7.6:** Τάση των ζυγών στις δυο ακραίες περιπτώσεις παραγωγής και ζήτησης.

Στον Πίνακα 7.15 παρουσιάζεται η οικονομική μελέτη της επένδυσης, θεωρώντας το χρόνο ζωής των ανεμογεννητριών ίσο με 20 χρόνια και λαμβάνοντας το επιτόκιο αναγωγής ίσο με 8%.

**Πίνακας 7.15:** Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών στο δίκτυο 15 ζυγών (Πιθανοτική προσέγγιση).

χρόνος	Κέρδος μείωσης απωλειών (\$)	Κέρδος μείωσης εγγεόμενης ισχύος (\$)	Σταθερό κόστος (\$)	Μεταβλητό κόστος (\$)	Κόστος Αρχικής Επένδυσης (\$)	Καθαρή Παρούσα Αξία (\$)
0	26,849.86	625,026.00	-42,500.00	-18,360.00	-1,700,000.00	-1,108,984.14
1	24,860.98	578,727.78	-39,351.85	-17,000.00	0.00	-561,747.23
2	23,019.43	535,859.05	-36,436.90	-15,740.74	0.00	-55,046.39
3	21,314.28	496,165.79	-33,737.87	-14,574.76	0.00	414,121.05
4	19,735.45	459,412.77	-31,238.77	-13,495.15	0.00	848,535.35
5	18,273.56	425,382.19	-28,924.79	-12,495.51	0.00	1,250,770.82
6	16,919.97	393,872.40	-26,782.21	-11,569.91	0.00	1,623,211.06
7	15,666.64	364,696.67	-24,798.34	-10,712.88	0.00	1,968,063.14
8	14,506.14	337,682.10	-22,961.43	-9,919.34	0.00	2,287,370.62
9	13,431.61	312,668.61	-21,260.58	-9,184.57	0.00	2,583,025.69
10	12,436.68	289,507.97	-19,685.72	-8,504.23	0.00	2,856,780.39
11	11,515.44	268,062.94	-18,227.52	-7,874.29	0.00	3,110,256.96
12	10,662.45	248,206.42	-16,877.33	-7,291.01	0.00	3,344,957.49
13	9,872.64	229,820.76	-15,627.16	-6,750.93	0.00	3,562,272.80
14	9,141.33	212,797.00	-14,469.59	-6,250.86	0.00	3,763,490.67
15	8,464.20	197,034.26	-13,397.77	-5,787.84	0.00	3,949,803.52



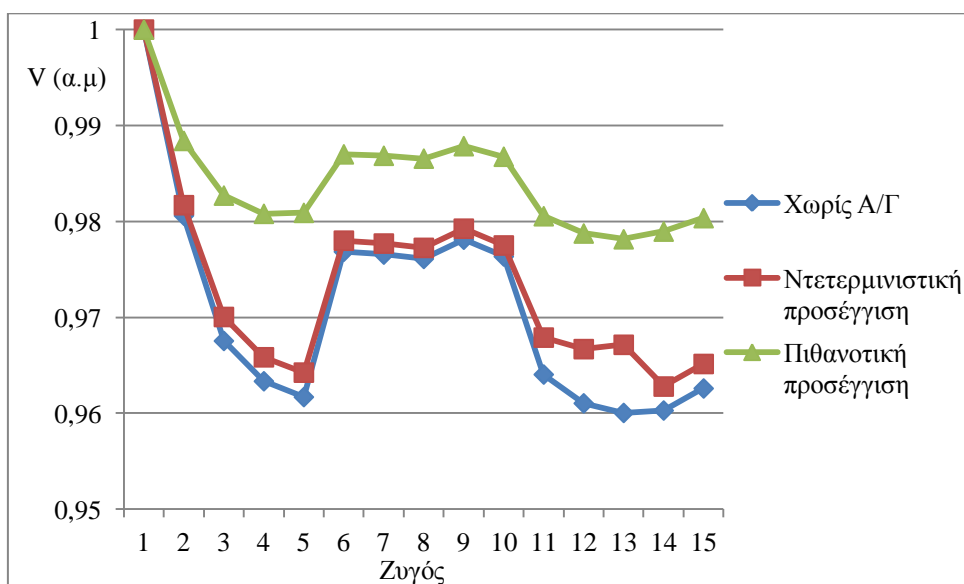
**Πίνακας 7.15:** Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών στο δίκτυο 15 ζυγών (Πιθανοτική προσέγγιση) (συνέχεια).

χρόνος	Κέρδος μείωσης απωλειών (\$)	Κέρδος μείωσης εγγεόμενης ισχύος (\$)	Σταθερό κόστος (\$)	Μεταβλητό κόστος (\$)	Κόστος Αρχικής Επένδυσης (\$)	Καθαρή Παρούσα Αξία (\$)
16	7,837.22	182,439.13	-12,405.34	-5,359.11	0.00	4,122,315.41
17	7,256.68	168,925.12	-11,486.43	-4,962.14	0.00	4,282,048.65
18	6,719.15	156,412.15	-10,635.58	-4,594.57	0.00	4,429,949.80
19	6,221.44	144,826.06	-9,847.76	-4,254.23	0.00	4,566,895.30
<b>Σύνολο:</b>	<b>284,705.15</b>	<b>6,627,525.19</b>	<b>-450,652.97</b>	<b>-194,682.08</b>	<b>-1,700,000.00</b>	<b>4,566,895.30</b>

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.15, η απόσβεση της επένδυσης για την εγκατάσταση 0.85 MW αιολικής ισχύος στο δίκτυο πραγματοποιείται 3 χρόνια μετά από την αρχική επένδυση. Η μεγαλύτερη συνεισφορά στα έσοδα κάθε χρόνου οφείλεται στην σημαντική μείωση της εγγεόμενης ενεργού ισχύος μέσω του υποσταθμού.

### 7.3.5 Σύγκριση των δυο προσεγγίσεων

Παρόλο που και από τις δυο προσεγγίσεις του προβλήματος προέκυψε ότι η βέλτιστη εγκατεστημένη αιολική ισχύς είναι ίση με 0.85 MW, ως βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ανεμογεννητριών για το δίκτυο των 15 ζυγών υπολογίστηκε ο ζυγός 5 από την πιθανοτική προσέγγιση και ο ζυγός 13 από την ντετερμινιστική προσέγγιση. Επιπλέον, τα αποτελέσματα όσον αφορά τις απώλειες ενεργού ισχύος, την εγγεόμενη ενεργό ισχύ μέσω του υποσταθμού, τις τάσεις των ζυγών και γενικότερη την αξιολόγηση της επένδυσης διαφέρουν σημαντικά ανάμεσα στις δυο προσεγγίσεις. Στο Σχήμα 7.7 παρουσιάζονται τα μέτρα της τάσης των ζυγών του δικτύου, για τις τρεις προσεγγίσεις.



**Σχήμα 7.7:** Τάση των ζυγών κάθε προσέγγισης για το δίκτυο 15 ζυγών.

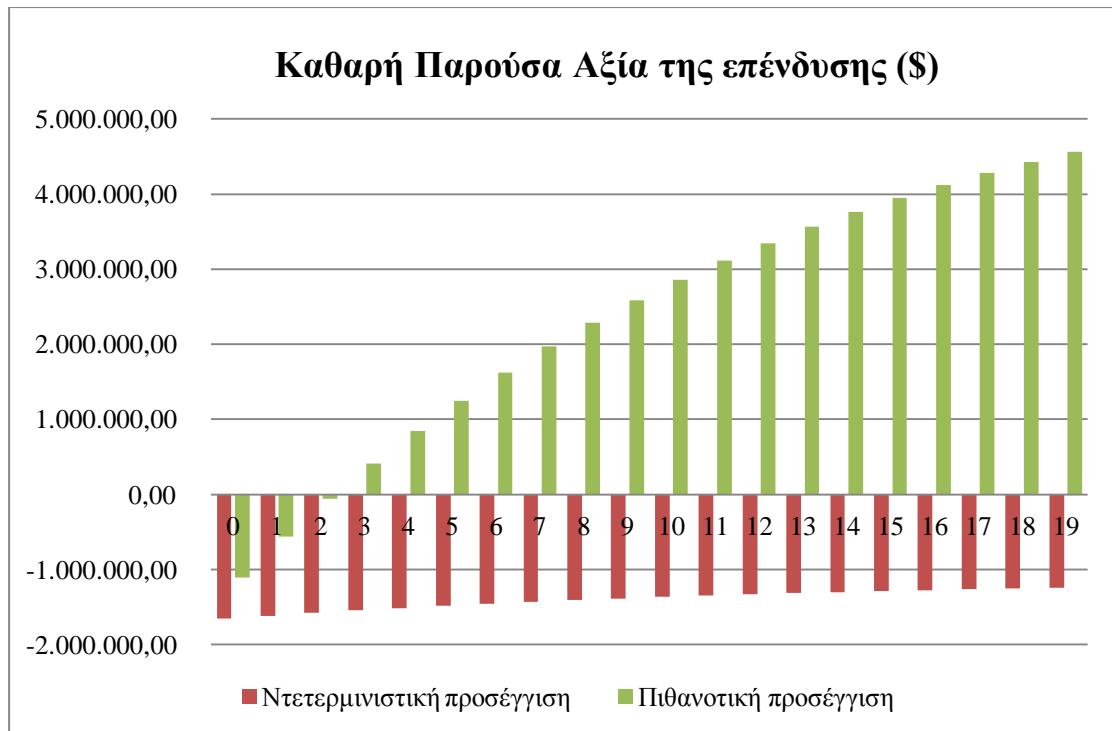
Στον Πίνακα 7.16 παρουσιάζεται η σύγκριση των κύριων παραμέτρων των δυο προσεγγίσεων για το δίκτυο των 15 ζυγών, τον 1<sup>ο</sup> χρόνο της επένδυσης.

**Πίνακας 7.16:** Σύγκριση της ντετερμινιστικής και της πιθανοτικής προσέγγισης για το δίκτυο των 15 ζυγών, τον 1<sup>ο</sup> χρόνο της επένδυσης.

Παράμετρος	Αρχικό δίκτυο	Ντετερμινιστική προσέγγιση	Πιθανοτική προσέγγιση
Ενεργειακές απώλειες (MWh)	821.44	709.56	262.07
Μείωση ενεργειακών απωλειών (%)	-	13.62	68.10
Οικονομικό όφελος από την μείωση των απωλειών (\$)	-	5,370.43	26,849.86
Ενεργός ισχύς υποσταθμού (MW)	3.094	2.87	1.67
Μείωση ενεργού ισχύος υποσταθμού (%)	-	7.30	46.12
Οικονομικό όφελος από την μείωση ενεργού ισχύος υποσταθμού (\$)	-	98,988.00	625,026.00
Συνολικό φορτίο (MVA <sub>r</sub> )	3+j2.66	3+j2.66	1.846+j1.637
Μείωση συνολικού φορτίου (%)	-	-	38.47
Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	-	0.85	0.85
Ετήσια ενεργειακή απόδοση ανεμογεννητριών (MWh)	-	1861.5	1836.00
Αρχική επένδυση (\$)	-	1,700,000.00	1,700,000.00

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.16, σημαντικό ρόλο στη διαφοροποίηση των δυο προσεγγίσεων διαδραματίζει η συνολική ζήτηση φορτίου. Κατά την ντετερμινιστική προσέγγιση, το φορτίο θεωρείται σταθερό στην αιχμή του, ενώ στην πιθανοτική προσέγγιση μεταβάλλεται σύμφωνα με τον Πίνακα 5.3. Με τον τρόπο αυτό, η συνολική μέση ζήτηση φορτίου μειώνεται κατά 38.47% σε σχέση με την ζήτηση του αρχικού δικτύου, μειώνοντας έτσι τόσο τις ενεργειακές απώλειες, όσο και την εγγεόμενη ισχύ μέσω του υποσταθμού, μεγιστοποιώντας παράλληλα τα οικονομικά οφέλη.

Στο Σχήμα 7.8 αναπαρίσταται η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης των δυο προσεγγίσεων κατά την περίοδο των 20 χρόνων.

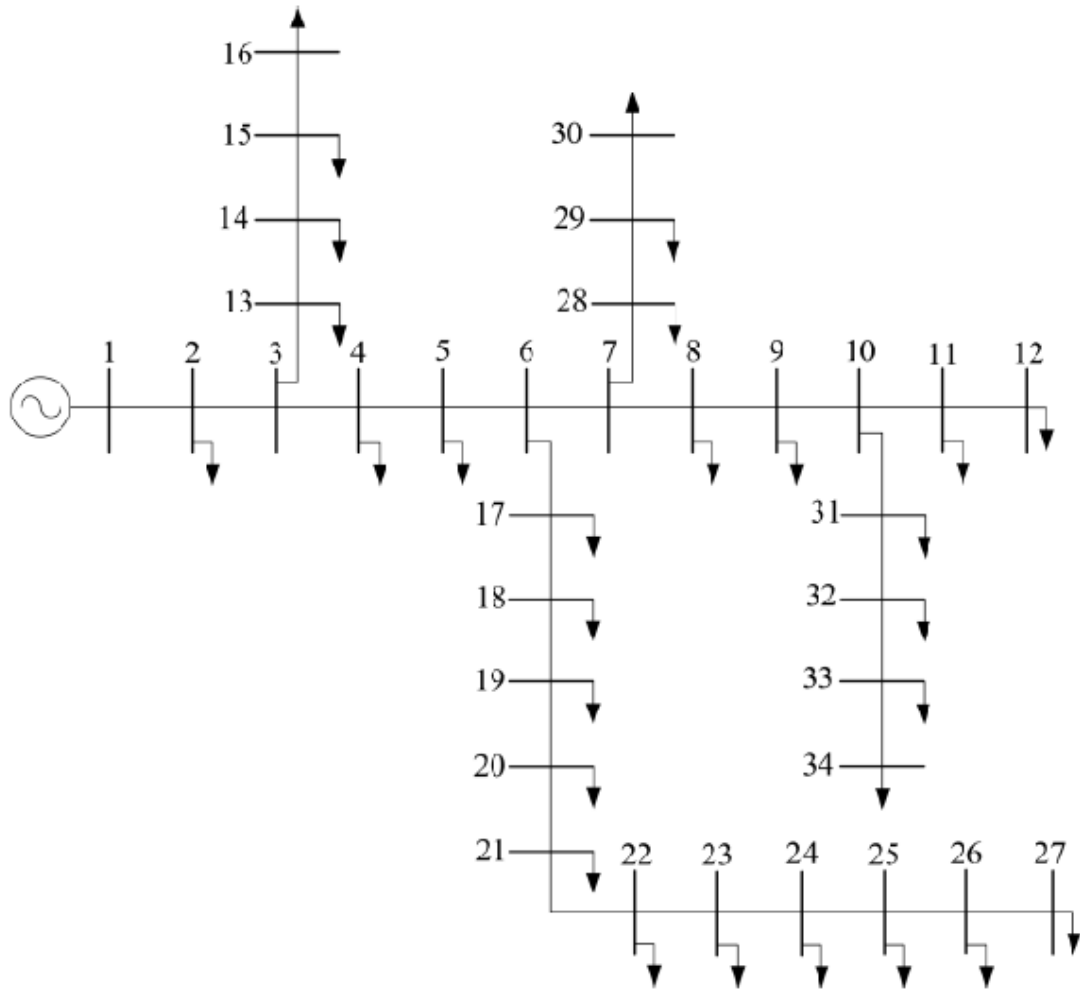


**Σχήμα 7.8:** Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης των δυο προσεγγίσεων για το δίκτυο των 15 ζυγών.

## 7.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ 34 ΖΥΓΩΝ

### 7.4.1 Διατύπωση του προβλήματος και δεδομένα του συστήματος

Η τοπολογία του δικτύου των 34 ζυγών φαίνεται στο Σχήμα 7.9 και τα δεδομένα του στους Πίνακες 7.17 και 7.18. Πρόκειται για ακτινικό δίκτυο διανομής τάσης 11 kV, που αποτελείται από 33 γραμμές και έχει συνολικό φορτίο  $(4.635+2.8735)$  MVA. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για αυτό το λόγο θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης του συστήματος, οπότε στον ζυγό 1 δεν μπορούν να συνδεθούν ανεμογεννήτριες.



Σχήμα 7.9: Μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου 34 ζυγών.

Πίνακας 7.17: Στοιχεία γραμμών του δικτύου 34 ζυγών.

Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	R (Ω)	X (Ω)	1/2 B (Ω <sup>-1</sup> )
1	2	0.117	0.048	0
2	3	0.1073	0.044	0
3	4	0.1645	0.0457	0
4	5	0.1495	0.0414	0
5	6	0.1495	0.0414	0
6	7	0.3144	0.054	0
7	8	0.2096	0.036	0
8	9	0.3144	0.054	0
9	10	0.2096	0.036	0
10	11	0.131	0.0225	0
11	12	0.1048	0.018	0

Πίνακας 7.17: Στοιχεία γραμμών του δικτύου 34 ζυγών (συνέχεια).

Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	1/2 B ( $\Omega^{-1}$ )
3	13	0.1572	0.027	0
13	14	0.2096	0.036	0
14	15	0.1048	0.018	0
15	16	0.0524	0.009	0
6	17	0.1794	0.0498	0
17	18	0.1645	0.0457	0
18	19	0.2079	0.0473	0
19	20	0.189	0.043	0
20	21	0.189	0.043	0
21	22	0.262	0.045	0
22	23	0.262	0.045	0
23	24	0.3144	0.054	0
24	25	0.2096	0.036	0
25	26	0.131	0.0225	0
26	27	0.1048	0.018	0
7	28	0.1572	0.027	0
28	29	0.1572	0.027	0
29	30	0.1572	0.027	0
10	31	0.1572	0.027	0
31	32	0.2096	0.036	0
32	33	0.1572	0.027	0
33	34	0.1048	0.018	0

Πίνακας 7.18: Στοιχεία ζυγών του δικτύου 34 ζυγών.

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVA <sub>r</sub> )	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVA <sub>r</sub> )
1	11	1.0	0	0	0	0	0
2	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
3	11	1.0	0	0	0	0	0
4	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
5	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
6	11	1.0	0	0	0	0	0
7	11	1.0	0	0	0	0	0
8	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
9	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
10	11	1.0	0	0	0	0	0
11	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0

Πίνακας 7.18: Στοιχεία ζυγών του δικτύου 34 ζυγών (συνέχεια).

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVA <sub>r</sub> )	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVA <sub>r</sub> )
12	11	1.0	0	0.137	0.084	0	0
13	11	1.0	0	0.072	0.045	0	0
14	11	1.0	0	0.072	0.045	0	0
15	11	1.0	0	0.072	0.045	0	0
16	11	1.0	0	0.0135	0.0075	0	0
17	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
18	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
19	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
20	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
21	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
22	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
23	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
24	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
25	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
26	11	1.0	0	0.23	0.1425	0	0
27	11	1.0	0	0.137	0.085	0	0
28	11	1.0	0	0.075	0.048	0	0
29	11	1.0	0	0.075	0.048	0	0
30	11	1.0	0	0.075	0.048	0	0
31	11	1.0	0	0.057	0.0345	0	0
32	11	1.0	0	0.057	0.0345	0	0
33	11	1.0	0	0.057	0.0345	0	0
34	11	1.0	0	0.057	0.0345	0	0

Όπως και στα δίκτυα των 4 και 15 ζυγών, ζητείται να βρεθούν οι βέλτιστοι ζυγοί εγκατάστασης ανεμογεννητριών καθώς και το μέγεθος της βέλτιστης εγκατεστημένης αιολικής ισχύος ώστε να μεγιστοποιηθεί το οικονομικό όφελος του διαχειριστή-παραγωγού του δικτύου.

Αρχικά, επιλύεται η βέλτιστη ροή φορτίου του δικτύου για να υπολογιστούν οι ενεργειακές απώλειες και η εγγεόμενη ενεργός ισχύς μέσω του υποσταθμού. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η ντετερμινιστική μέθοδος, όπου η παραγωγή και η ζήτηση θεωρούνται σταθερές και η πιθανοτική μέθοδος, όπου τα μεγέθη αυτά μεταβάλλονται. Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των διαφορετικών προσεγγίσεων.

### 7.4.2 Ανάλυση ροών φορτίου του δικτύου

Εκτελείται η ανάλυση ροών φορτίου του δικτύου στο περιβάλλον GAMS ώστε να υπολογιστούν οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου, η εγγεόμενη ενεργός ισχύς μέσω του υποσταθμού και οι τάσεις των ζυγών πριν την διείσδυση ανεμογεννητριών, με αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος. Ο περιορισμός που τέθηκε για το δίκτυο είναι τα μέτρα των τάσεων των ζυγών να μην υπερβαίνουν το  $\pm 6\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης τους. Ως ζυγός ταλάντωσης λήφθηκε ο ζυγός 1 του συστήματος, με μέτρο τάσης ίσο με 1.0 α.μ. και γωνία ίση με 0 rad.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου πριν την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο των 34 ζυγών δίνονται στον Πίνακα 7.19.

**Πίνακας 7.19:** Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του αρχικού δικτύου 34 ζυγών.

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (Mvar)
1	11	1.0000	0	0	0	4.786	2.938
2	10.936	0.9942	0.0009	0.23	0.1425	0	0
3	10.881	0.9892	0.002	0	0	0	0
4	10.805	0.9823	0.004	0.23	0.1425	0	0
5	10.74	0.9764	0.006	0.23	0.1425	0	0
6	10.679	0.9708	0.007	0	0	0	0
7	10.638	0.9671	0.009	0	0	0	0
8	10.616	0.9651	0.01	0.23	0.1425	0	0
9	10.59	0.9627	0.011	0.23	0.1425	0	0
10	10.578	0.9616	0.011	0	0	0	0
11	10.573	0.9612	0.011	0.23	0.1425	0	0
12	10.571	0.9610	0.011	0.137	0.084	0	0
13	10.877	0.9888	0.002	0.072	0.045	0	0
14	10.873	0.9885	0.002	0.072	0.045	0	0
15	10.872	0.9884	0.002	0.072	0.045	0	0
16	10.872	0.9884	0.002	0.0135	0.0075	0	0
17	10.63	0.9664	0.009	0.23	0.1425	0	0
18	10.589	0.9626	0.01	0.23	0.1425	0	0
19	10.544	0.9585	0.011	0.23	0.1425	0	0
20	10.508	0.9553	0.012	0.23	0.1425	0	0
21	10.477	0.9525	0.013	0.23	0.1425	0	0
22	10.441	0.9492	0.015	0.23	0.1425	0	0
23	10.411	0.9465	0.016	0.23	0.1425	0	0
24	10.384	0.9440	0.017	0.23	0.1425	0	0
25	10.37	0.9427	0.017	0.23	0.1425	0	0
26	10.365	0.9423	0.017	0.23	0.1425	0	0
27	10.364	0.9422	0.017	0.137	0.085	0	0
28	10.335	0.9395	0.009	0.075	0.048	0	0

**Πίνακας 7.19:** Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του αρχικού δικτύου 34 ζυγών (συνέχεια).

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (Mvar)
29	10.333	0.9394	0.009	0.075	0.048	0	0
30	10.332	0.9393	0.009	0.075	0.048	0	0
31	10.574	0.9613	0.011	0.057	0.0345	0	0
32	10.571	0.9610	0.011	0.057	0.0345	0	0
33	10.569	0.9608	0.012	0.057	0.0345	0	0
34	10.568	0.9607	0.012	0.057	0.0345	0	0
<b>Σύνολο:</b>				4.6365	2.8735	4.786	2.938

Οι ετήσιες ενεργειακές απώλειες πριν την εγκατάσταση ανεμογεννητριών υπολογίστηκαν ίσες με 1900.98 MWh, ενώ η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο μέσω του υποσταθμού είναι ίση με 4.786 MW.

#### 7.4.3 Ντετερμινιστική προσέγγιση

Οι περιορισμοί που τέθηκαν κατά την επίλυση του προβλήματος είναι οι εξής: α) Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών να μην υπερβαίνουν το  $\pm 6\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης τους, β) η συνολική διείσδυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο να μην ξεπερνά το 30% της ζήτησης φορτίου γ) οι υποψήφιοι ζυγοί σύνδεσης ανεμογεννητριών είναι οι ζυγοί 6, 7, 12, 16, 20, 27, 30 και 34 ενώ δ) το όριο της αρχικής επένδυσης ορίζεται στα 3,500,000 \$.

Τα αποτελέσματα, όπως προέκυψαν από το GAMS, δίνονται στον Πίνακα 7.20.

**Πίνακας 7.20:** Αποτελέσματα Τάσεων και Παραγωγής ζυγών μετά την βέλτιστη εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο των 34 ζυγών (Ντετερμινιστική προσέγγιση).

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (Mvar)
1	11	1.0000	0	0	0	4.544	2.827
2	10.939	0.9945	0.0009	0.23	0.1425	0	0
3	10.887	0.9897	0.002	0	0	0	0
4	10.815	0.9832	0.004	0.23	0.1425	0	0
5	10.753	0.9775	0.005	0.23	0.1425	0	0
6	10.696	0.9724	0.007	0	0	0	0
7	10.656	0.9687	0.009	0	0	0	0
8	10.633	0.9666	0.009	0.23	0.1425	0	0
9	10.607	0.9643	0.01	0.23	0.1425	0	0
10	10.595	0.9632	0.011	0	0	0	0



**Πίνακας 7.20:** Αποτελέσματα Τάσεων και Παραγωγής ζυγών μετά την βέλτιστη εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο των 34 ζυγών (Ντετερμινιστική προσέγγιση) (συνέχεια).

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (Mvar)
11	10.59	0.9627	0.011	0.23	0.1425	0	0
12	10.589	0.9626	0.011	0.137	0.084	0	0
13	10.883	0.9894	0.002	0.072	0.045	0	0
14	10.879	0.9890	0.002	0.072	0.045	0	0
15	10.878	0.9889	0.002	0.072	0.045	0	0
16	10.878	0.9889	0.002	0.0135	0.0075	0	0
17	10.652	0.9684	0.008	0.23	0.1425	0	0
18	10.615	0.9650	0.009	0.23	0.1425	0	0
19	10.575	0.9614	0.011	0.23	0.1425	0	0
20	10.543	0.9585	0.012	0.23	0.1425	0	0
21	10.516	0.9560	0.013	0.23	0.1425	0	0
22	10.486	0.9533	0.014	0.23	0.1425	0	0
23	10.463	0.9512	0.015	0.23	0.1425	0	0
24	10.442	0.9493	0.015	0.23	0.1425	0	0
25	10.434	0.9485	0.016	0.23	0.1425	0	0
26	10.431	0.9483	0.016	0.23	0.1425	0	0
27	10.432	0.9484	0.016	0.137	0.085	0.2125	0.103
28	10.652	0.9684	0.009	0.075	0.048	0	0
29	10.65	0.9682	0.009	0.075	0.048	0	0
30	10.649	0.9681	0.009	0.075	0.048	0	0
31	10.592	0.9629	0.011	0.057	0.0345	0	0
32	10.588	0.9625	0.011	0.057	0.0345	0	0
33	10.586	0.9624	0.011	0.057	0.0345	0	0
34	10.586	0.9624	0.011	0.057	0.0345	0	0
<b>Σύνολο:</b>				4.6365	2.8735	4.7565	2.930

Υπολογίστηκε ότι ο βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης των ανεμογεννητριών είναι ο ζυγός 27 του δικτύου, ενώ η βέλτιστη εγκατεστημένη αιολική ισχύς είναι ίση με 0.85 MW. Εφόσον η παραγόμενη αιολική ισχύς έχει θεωρηθεί σταθερή στην μέση τιμή της, από τον συντελεστή χρησιμοποίησης (CF=0.25) προκύπτει ότι η ισχύς που παράγουν οι ανεμογεννήτριες είναι ίση με 0.2125 MW, ενώ η ετήσια ενεργειακή τους απόδοση υπολογίζεται σε 1861.5 MWh. Οι ετήσιες ενεργειακές απώλειες είναι ίσες με 1646.88 MWh, ενώ η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο μέσω του υποσταθμού είναι ίση με 4.544 MW.

Στον Πίνακα 7.21 παρουσιάζεται η οικονομική μελέτη της επένδυσης, θεωρώντας το χρόνο ζωής των ανεμογεννητριών ίσο με 20 χρόνια και λαμβάνοντας το επιτόκιο αναγωγής ίσο με 8%. Για κάθε χρόνο υπολογίζεται το κέρδος λόγω της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, το κέρδος από την μείωση της εγχεόμενης ενεργού ισχύος μέσω του υποσταθμού, το

σταθερό και μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης των ανεμογεννητριών καθώς και η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης.

**Πίνακας 7.21:** Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών στο δίκτυο 34 ζυγών (Ντετερμινιστική προσέγγιση).

χρόνος	Κέρδος μείωσης απωλειών (\$)	Κέρδος μείωσης εγγεόμενης ισχύος (\$)	Σταθερό κόστος (\$)	Μεταβλητό κόστος (\$)	Κόστος Αρχικής Επένδυσης (\$)	Καθαρή Παρούσα Αξία (\$)
0	12,196.93	105,996.00	-42,500.00	-18,615.00	-1,700,000.00	-1,642,922.07
1	11,293.45	98,144.44	-39,351.85	-17,236.11	0.00	-1,590,072.13
2	10,456.90	90,874.49	-36,436.90	-15,959.36	0.00	-1,541,137.01
3	9,682.32	84,143.04	-33,737.87	-14,777.19	0.00	-1,495,826.71
4	8,965.11	77,910.22	-31,238.77	-13,682.58	0.00	-1,453,872.73
5	8,301.03	72,139.10	-28,924.79	-12,669.06	0.00	-1,415,026.45
6	7,686.13	66,795.46	-26,782.21	-11,730.61	0.00	-1,379,057.67
7	7,116.79	61,847.65	-24,798.34	-10,861.67	0.00	-1,345,753.24
8	6,589.62	57,266.34	-22,961.43	-10,057.11	0.00	-1,314,915.81
9	6,101.50	53,024.39	-21,260.58	-9,312.13	0.00	-1,286,362.64
10	5,649.54	49,096.66	-19,685.72	-8,622.35	0.00	-1,259,924.51
11	5,231.05	45,459.87	-18,227.52	-7,983.65	0.00	-1,235,444.77
12	4,843.57	42,092.47	-16,877.33	-7,392.27	0.00	-1,212,778.34
13	4,484.79	38,974.51	-15,627.16	-6,844.70	0.00	-1,191,790.90
14	4,152.58	36,087.51	-14,469.59	-6,337.68	0.00	-1,172,358.09
15	3,844.98	33,414.36	-13,397.77	-5,868.22	0.00	-1,154,364.74
16	3,560.17	30,939.22	-12,405.34	-5,433.54	0.00	-1,137,704.24
17	3,296.45	28,647.43	-11,486.43	-5,031.06	0.00	-1,122,277.85
18	3,052.27	26,525.40	-10,635.58	-4,658.39	0.00	-1,107,994.15
19	2,826.18	24,560.55	-9,847.76	-4,313.32	0.00	-1,094,768.51
<b>Σύνολο:</b>	129,331.36	1,123,939.10	-450,652.97	-197,386.00	-1,700,000.00	-1,094,768.51

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.21, η επένδυση για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο κρίνεται ασύμφορη.

#### 7.4.4 Πιθανοτική προσέγγιση

Οι περιορισμοί που τέθηκαν κατά την επίλυση του προβλήματος είναι οι εξής: α) Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών να μην υπερβαίνουν το  $\pm 6\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης τους, β) η συνολική διείσδυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο να μην ξεπερνά το 30% της ζήτησης φορτίου γ) οι υποψήφιοι ζυγοί σύνδεσης ανεμογεννητριών είναι οι ζυγοί 6, 7, 12, 16, 20, 27, 30 και 34 ενώ δ) το όριο της αρχικής επένδυσης ορίζεται στα 3,500,000 \$.

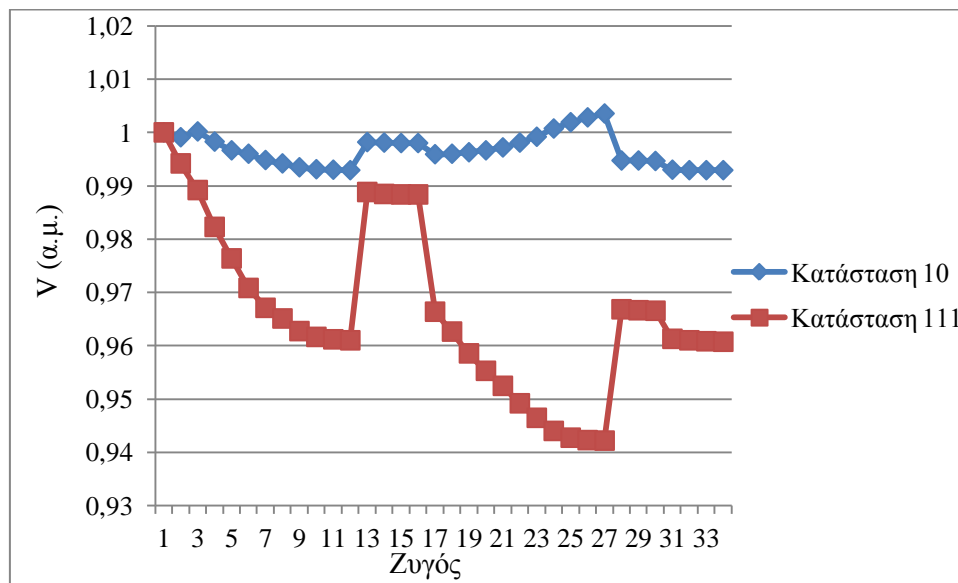
Τα αποτελέσματα, όπως προέκυψαν από το GAMS, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.22.

**Πίνακας 7.22:** Αποτελέσματα Τάσεων και Παραγωγής ζυγών μετά την βέλτιστη εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο δίκτυο των 34 ζυγών (Πιθανοτική προσέγγιση).

Ζυγός	Μέτρο τάσης (kV)	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (rad)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (Mvar)
1	11	1.0000	0	0	0.0000	2.642	1.688
2	10.964	0.9967	0.0005	0.1381	0.0856	0	0
3	10.933	0.9939	0.001	0	0	0	0
4	10.892	0.9902	0.002	0.1381	0.0856	0	0
5	10.856	0.9869	0.003	0.1381	0.0856	0	0
6	10.823	0.9839	0.004	0	0	0	0
7	10.799	0.9817	0.005	0	0	0	0
8	10.786	0.9805	0.006	0.1381	0.0856	0	0
9	10.771	0.9792	0.006	0.1381	0.0856	0	0
10	10.763	0.9785	0.007	0	0	0	0
11	10.76	0.9782	0.007	0.1381	0.0856	0	0
12	10.76	0.9782	0.007	0.0823	0.0504	0	0
13	10.931	0.9937	0.001	0.0432	0.0270	0	0
14	10.929	0.9935	0.001	0.0432	0.0270	0	0
15	10.928	0.9935	0.001	0.0432	0.0270	0	0
16	10.928	0.9935	0.001	0.0081	0.0045	0	0
17	10.798	0.9816	0.005	0.1381	0.0856	0	0
18	10.777	0.9797	0.006	0.1381	0.0856	0	0
19	10.754	0.9776	0.006	0.1381	0.0856	0	0
20	10.737	0.9761	0.007	0.1381	0.0856	0	0
21	10.722	0.9747	0.007	0.1381	0.0856	0	0
22	10.706	0.9733	0.008	0.1381	0.0856	0	0
23	10.694	0.9722	0.008	0.1381	0.0856	0	0
24	10.684	0.9713	0.009	0.1381	0.0856	0	0
25	10.681	0.9710	0.009	0.1381	0.0856	0	0
26	10.68	0.9709	0.009	0.1381	0.0856	0	0
27	10.682	0.9711	0.009	0.0823	0.0510	0.21	0.102
28	10.797	0.9815	0.005	0.0450	0.0288	0	0
29	10.796	0.9815	0.005	0.0450	0.0288	0	0
30	10.795	0.9814	0.005	0.0450	0.0288	0	0
31	10.762	0.9784	0.007	0.0342	0.0207	0	0
32	10.759	0.9781	0.007	0.0342	0.0207	0	0
33	10.758	0.9780	0.007	0.0342	0.0207	0	0
34	10.758	0.9780	0.007	0.0342	0.0207	0	0
<b>Σύνολο:</b>				2.784	1.7255	2.852	1.790

Υπολογίστηκε ότι ο βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ανεμογεννητριών είναι ο ζυγός 27 του δικτύου και η βέλτιστη εγκατεστημένη αιολική ισχύς είναι ίση με 0.85 MW. Η μέση παραγόμενη ισχύς από τις ανεμογεννήτριες υπολογίστηκε σε 0.21, ενώ η ετήσια ενεργειακή τους απόδοση είναι ίση με 1836 MWh. Οι ετήσιες απώλειες ενεργού ισχύος είναι ίσες με 595.68 MWh, ενώ η μέση εγγεόμενη ενεργός ισχύς μέσω του υποσταθμού ισούται με 2.642 MW.

Στο Σχήμα 7.10, παρουσιάζονται οι τιμές της τάσης των ζυγών στις δυο ακραίες περιπτώσεις, όταν η παραγωγή αιολικής ισχύος είναι μέγιστη και η ζήτηση ελάχιστη και όταν η ζήτηση είναι στην αιχμή της και η παραγωγή αιολική ισχύος μηδενική, στις καταστάσεις 10 και 111 δηλαδή, του Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α αντίστοιχα.



**Σχήμα 7.10:** Τάση των ζυγών στις δυο ακραίες περιπτώσεις παραγωγής και ζήτησης.

Στον Πίνακα 7.23 παρουσιάζεται η οικονομική μελέτη της επένδυσης, θεωρώντας το χρόνο ζωής των ανεμογεννητριών ίσο με 20 χρόνια και λαμβάνοντας το επιτόκιο αναγωγής ίσο με 8%.

**Πίνακας 7.23:** Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών στο δίκτυο 34 ζυγών (Πιθανοτική προσέγγιση).

χρόνος	Κέρδος μείωσης απωλειών (\$)	Κέρδος μείωσης εγγεόμενης ισχύος (\$)	Σταθερό κόστος (\$)	Μεταβλητό κόστος (\$)	Κόστος Αρχικής Επένδυσης (\$)	Καθαρή Παρούσα Αξία (\$)
0	62,654.53	939,072.00	-42,500.00	-18,360.00	-1,700,000.00	-759,133.47
1	58,013.27	869,511.11	-39,351.85	-17,000.00	0.00	112,039.06
2	53,715.99	805,102.88	-36,436.90	-15,740.74	0.00	918,680.29
3	49,737.03	745,465.63	-33,737.87	-14,574.76	0.00	1,665,570.32
4	46,052.80	690,245.95	-31,238.77	-13,495.15	0.00	2,357,135.16
5	42,641.48	639,116.62	-28,924.79	-12,495.51	0.00	2,997,472.97

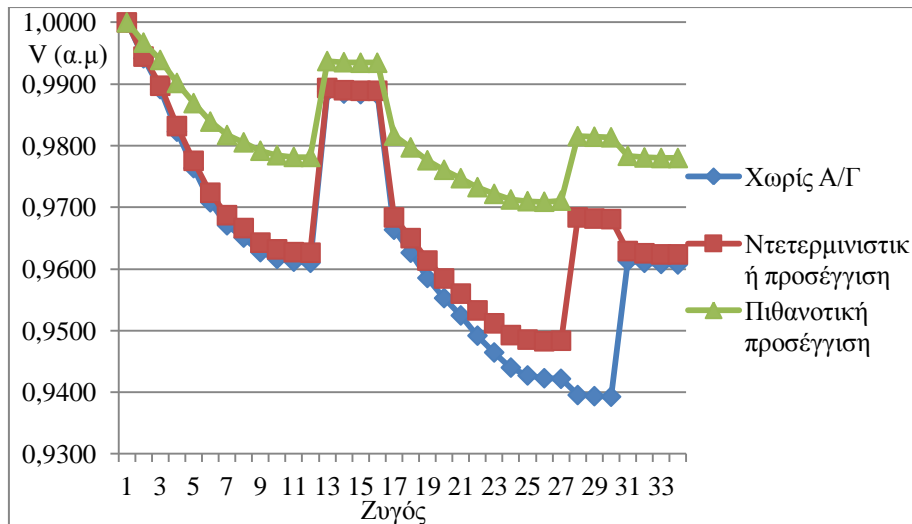
**Πίνακας 7.23:** Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών στο δίκτυο 34 ζυγών (Πιθανοτική προσέγγιση) (συνέχεια).

χρόνος	Κέρδος μείωσης απωλειών (\$)	Κέρδος μείωσης εγγεόμενης ισχύος (\$)	Σταθερό κόστος (\$)	Μεταβλητό κόστος (\$)	Κόστος Αρχικής Επένδυσης (\$)	Καθαρή Παρούσα Αξία (\$)
6	39,482.86	591,774.65	-26,782.21	-11,569.91	0.00	3,590,378.35
7	36,558.20	547,939.49	-24,798.34	-10,712.88	0.00	4,139,364.82
8	33,850.18	507,351.38	-22,961.43	-9,919.34	0.00	4,647,685.62
9	31,342.76	469,769.80	-21,260.58	-9,184.57	0.00	5,118,353.03
10	29,021.08	434,972.04	-19,685.72	-8,504.23	0.00	5,554,156.19
11	26,871.37	402,751.88	-18,227.52	-7,874.29	0.00	5,957,677.63
12	24,880.90	372,918.41	-16,877.33	-7,291.01	0.00	6,331,308.60
13	23,037.87	345,294.83	-15,627.16	-6,750.93	0.00	6,677,263.19
14	21,331.36	319,717.43	-14,469.59	-6,250.86	0.00	6,997,591.52
15	19,751.26	296,034.66	-13,397.77	-5,787.84	0.00	7,294,191.83
16	18,288.20	274,106.17	-12,405.34	-5,359.11	0.00	7,568,821.74
17	16,933.52	253,802.00	-11,486.43	-4,962.14	0.00	7,823,108.70
18	15,679.19	235,001.86	-10,635.58	-4,594.57	0.00	8,058,559.59
19	14,517.76	217,594.31	-9,847.76	-4,254.23	0.00	8,276,569.66
<b>Σύνολο:</b>	664,361.60	9,957,543.11	-450,652.97	-194,682.08	-1,700,000.00	8,276,569.66

#### 7.4.5 Σύγκριση των δυο προσεγγίσεων

Τόσο στην ντετερμινιστική, όσο και στην πιθανοτική προσέγγιση του προβλήματος η βέλτιστη εγκατεστημένη αιολική ισχύς υπολογίστηκε ίση με 0.85 MW και ο βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ανεμογεννητριών βρέθηκε ο ζυγός 27 του δικτύου. Ωστόσο, όπως και στις δυο προηγούμενες εφαρμογές, οι αποκλίσεις στα αποτελέσματα των δυο προσεγγίσεων ήταν σημαντικές.

Στο Σχήμα 7.11 παρουσιάζονται τα μέτρα της τάσης των ζυγών του δικτύου πριν την διείσδυση ανεμογεννητριών και αυτά που υπολογίστηκαν μετά την εγκατάσταση ανεμογεννητριών, κατά την ντετερμινιστική και πιθανοτική προσέγγιση. Όσον αφορά την πιθανοτική προσέγγιση, αναπαρίσταται η μέση τιμή της τάσης των ζυγών, όπως προκύπτει από την πιθανότητα εμφάνισης κάθε κατάστασης. Επίσης, στον Πίνακα 7.24 εξετάζονται οι κύριες παράμετροι των δυο προσεγγίσεων, κατά το 1<sup>ο</sup> χρόνο της επένδυσης.

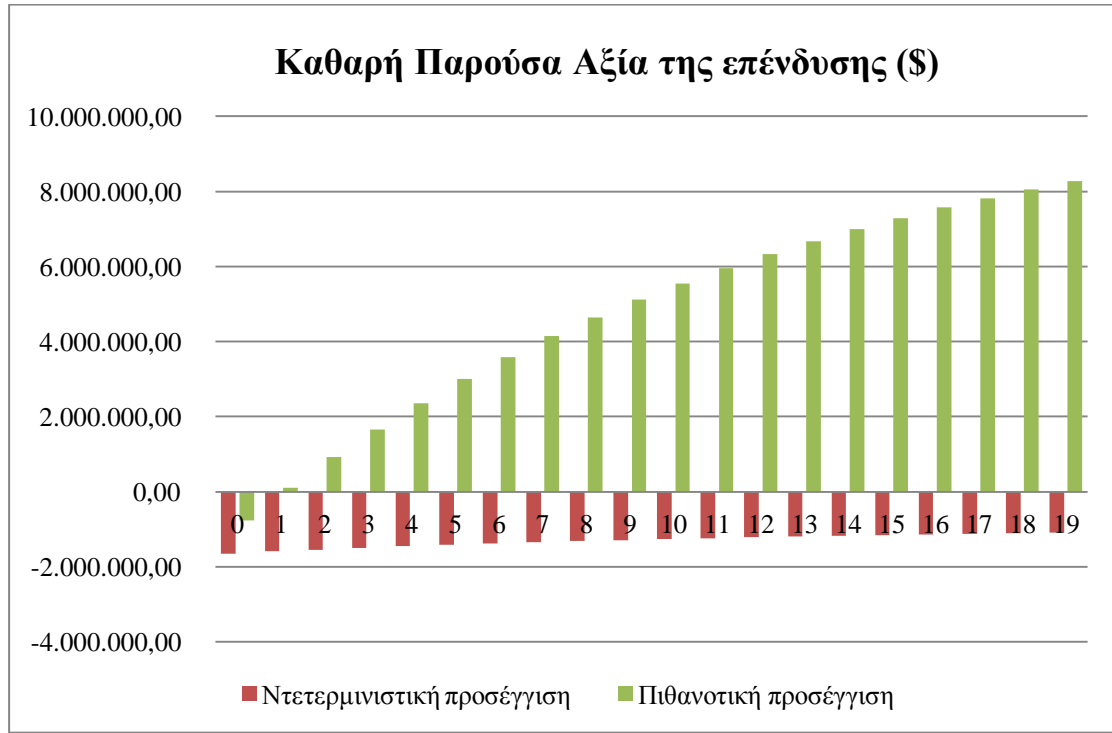


Σχήμα 7.11: Τάση των ζυγών κάθε προσέγγισης για το δίκτυο 34 ζυγών.

Πίνακας 7.24: Σύγκριση της ντετερμινιστικής και της πιθανοτικής προσέγγισης για το δίκτυο των 34 ζυγών, τον 1<sup>ο</sup> χρόνο της επένδυσης.

Παράμετρος	Αρχικό δίκτυο	Ντετερμινιστική προσέγγιση	Πιθανοτική προσέγγιση
Ενεργειακές απώλειες (MWh)	1900.98	1846.88	595.68
Μείωση ενεργειακών απωλειών (%)	-	2.85	68.66
Οικονομικό όφελος από την μείωση των απωλειών (\$)	-	12,196.93	62,654.43
Ενεργός ισχύς υποσταθμού (MW)	4.786	4.544	2.642
Μείωση ενεργού ισχύος υποσταθμού (%)	-	5.06	44.80
Οικονομικό όφελος από την μείωση ενεργού ισχύος υποσταθμού (\$)	-	105,996.00	939,072.00
Συνολικό φορτίο (MVA <sub>r</sub> )	4.6365+j2.8735	4.6365+j2.8735	2.784+j1.7275
Μείωση συνολικού φορτίου (%)	-	-	39.95
Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	-	0.85	0.85
Ετήσια ενεργειακή απόδοση ανεμογεννητριών (MWh)	-	1861.5	1836.00
Αρχική επένδυση (\$)	-	1,700,000.00	1,700,000.00

Η αξιολογημένη διαφορά των δυο προσεγγίσεων αποτυπώνεται στο Σχήμα 7.12, που αναπαριστά την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης, κατά τον χρόνο ζωής της, δηλαδή τα 20 χρόνια.



**Σχήμα 7.12:** Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης των δυο προσεγγίσεων για το δίκτυο των 34 ζυγών.





## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **8.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ**

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης ανεμογεννητριών σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους της επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη την τυχαία συμπεριφορά της ταχύτητας του ανέμου και της ζήτησης φορτίου. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε βασίστηκε στην υπόθεση ότι ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να λειτουργήσει ως ανεξάρτητος παραγωγός και να εγκαταστήσει ανεμογεννήτριες στο δίκτυο που διαχειρίζεται, αναλαμβάνοντας τα κόστη που συνδέονται με αυτή την επένδυση και καρπώνοντας τα οφέλη της.

Για την επίλυση του προβλήματος, αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον GAMS. Το περιβάλλον GAMS είναι κατάλληλο για εφαρμογές βελτιστοποίησης, διακρίνεται για το μαθηματικοποιημένο συντακτικό του και δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να ασχοληθεί αποκλειστικά με την μοντελοποίηση του προβλήματος. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε, εφαρμόστηκε σε τρία ακτινικά δίκτυα διανομής 4, 15 και 34 ζυγών.

Για κάθε ένα από τα δίκτυα, αρχικά, εκτελείται η βέλτιστη ροή φορτίου με αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η παραδοσιακή τεχνική επίλυσης του προβλήματος, κατά την οποία η παραγόμενη ισχύς των ανεμογεννητριών θεωρείται σταθερή στην μέση τιμή της και η ζήτηση φορτίου σταθερή στην αιχμή της, υπολογίζονται οι βέλτιστοι ζυγοί εγκατάστασης και το μέγεθος της βέλτιστης εγκατεστημένης αιολικής ισχύος σε αυτούς και αξιολογείται η επένδυση. Τέλος, εφαρμόζεται η μέθοδος που αναπτύχθηκε, στην οποία τόσο η παραγόμενη αιολική ισχύς, όσο και η ζήτηση φορτίου μεταβάλλονται και ομοίως υπολογίζονται οι βέλτιστοι ζυγοί εγκατάστασης και το μέγεθος της βέλτιστης εγκατεστημένης αιολικής ισχύος σε αυτούς και αξιολογείται η επένδυση.

Από τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 7 προκύπτει ότι η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε δίκτυα διανομής επιφέρει σημαντικά οφέλη. Τόσο κατά την ντετερμινιστική προσέγγιση, όσο και κατά την πιθανοτική προσέγγιση του προβλήματος, η διείσδυση της αιολικής ισχύος μείωσε σημαντικά τις ενεργειακές απώλειες των δικτύων και την εγγεόμενη ισχύ μέσω του υποσταθμού και βελτίωσε τις τάσεις στους ζυγούς. Συγκεκριμένα, οι ενεργειακές απώλειες μειώθηκαν από 13 έως 25% κατά την ντετερμινιστική προσέγγιση και περίπου 70% κατά την πιθανοτική. Όσον αφορά την εγγεόμενη ισχύ μέσω του υποσταθμού, η μείωση ήταν της τάξης του 10% για την ντετερμινιστική προσέγγιση και 50% για την πιθανοτική. Επιπλέον, η βελτίωση της τάσης των ζυγών ήταν 1% για την ντετερμινιστική και έως 3% για την πιθανοτική προσέγγιση.

Η σύγκλιση των δύο προσεγγίσεων ήταν εμφανής στην περίπτωση εύρεσης της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης των ανεμογεννητριών και στον υπολογισμό της βέλτιστης εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. Και στα τρία δίκτυα, η πιθανοτική και η ντετερμινιστική

προσέγγιση πρότειναν τους ίδιους ζυγούς ως βέλτιστους για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στις περισσότερες περιπτώσεις, ενώ και η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς ήταν σχεδόν ίδια.

Η κυριότερη διαφοροποίηση στις δυο προσεγγίσεις αφορά την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών σε δίκτυα διανομής. Από τα αποτελέσματα προέκυψε, ότι σύμφωνα με την ντετερμινιστική προσέγγιση η επένδυση κρίνεται ασύμφορη, καθώς σε όλα τα δίκτυα, η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης μετά το χρόνο ζωής της ήταν αρνητική. Αντίθετα, από την πιθανοτική προσέγγιση προέκυψε ότι ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης ποικίλει από 3 έως 10 χρόνια. Λαμβάνοντας τον χρόνο ζωής των ανεμογεννητριών ίσο με 20 χρόνια, τα αποτελέσματα έδειξαν αποδόσεις έως και 300% για την πιθανοτική προσέγγιση. Αυτό οφείλεται κύριως στο γεγονός ότι κατά την πιθανοτική προσέγγιση, η συνολική ζήτηση φορτίου μειώνεται κατά 40% σε σχέση με το αρχικό δίκτυο, σε αντίθεση με την ντετερμινιστική προσέγγιση όπου το φορτίο θεωρείται σταθερό, στην αιχμή του. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα στον διαχειριστή του δικτύου, σε περιπτώσεις που η ζήτηση είναι χαμηλή και η παραγωγή αιολικής ισχύος υψηλή, να επωφεληθεί πουλώντας το πλεόνασμα της ενέργειας στο δίκτυο μεταφοράς μέσω του υποσταθμού.

## 8.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε το οικονομικό όφελος της επένδυσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών σε δίκτυα διανομής από την σκοπιά του διαχειριστή-παραγωγού του δικτύου. Μια πρώτη επέκταση της εργασίας θα μπορούσε να ήταν η μελέτη του οικονομικού οφέλους είτε από την πλευρά του διαχειριστή είτε από την πλευρά του ανεξάρτητου παραγωγού του δικτύου, τροποποιώντας κατάλληλα την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, με βάση την ισχύουσα νομοθεσία.

Μια άλλη επέκταση της εργασίας θα ήταν η χρησιμοποίηση διαφόρων τύπων ανεμογεννητριών στο ίδιο δίκτυο και η ταυτόχρονη διείσδυση και άλλων τεχνολογιών Διεσπαρμένης Παραγωγής, όπως φωτοβολταϊκά, βιομάζα και μονάδες συμπαραγωγής ή επίσης τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι κυψέλες καυσίμου και οι μπαταρίες.

Επίσης, στην παρούσα εργασία έγινε η παραδοχή ότι η οριακή τιμή του συστήματος και η ζήτηση φορτίου είναι σταθερή κάθε χρόνο μελέτης. Μια πιθανή μελλοντική επέκταση είναι η αντιμετώπιση των παραμέτρων αυτών ως μεταβλητών κάθε χρόνο.

Τέλος, η ζήτηση φορτίου αυξάνεται κάθε χρόνο, οπότε θα μπορούσε να γίνει ανάλυση κόστους για την επιλογή μεταξύ της επέκτασης των υφιστάμενων γραμμών και της διείσδυσης μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής για την ικανοποίηση της αυξανόμενης ζήτησης.

---

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

---

## ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΖΗΤΗΣΗΣ

Πίνακας Α.1: Συνδυασμοί των πιθανών καταστάσεων παραγωγής και ζήτησης.

Κατάσταση	Παραγωγή (%)	Ζήτηση (%)	Πιθανότητα	Κατάσταση	Παραγωγή (%)	Ζήτηση (%)	Πιθανότητα
1	100	100	0.00015253	30	85	35.1	0.00063213
2	100	85.3	0.00085418	31	75	100	0.00029351
3	100	77.4	0.00161227	32	75	85.3	0.00164367
4	100	71.3	0.00252289	33	75	77.4	0.00310243
5	100	65	0.00252289	34	75	71.3	0.00485471
6	100	58.5	0.00248628	35	75	65	0.00485471
7	100	51	0.00248628	36	75	58.5	0.00478426
8	100	45.1	0.0013911	37	75	51	0.00478426
9	100	40.6	0.00072148	38	75	45.1	0.00267684
10	100	35.1	0.00050336	39	75	40.6	0.00138832
11	95	100	0.00011905	40	75	35.1	0.00096859
12	95	85.3	0.00066665	41	65	100	0.00042776
13	95	77.4	0.00125831	42	65	85.3	0.00239546
14	95	71.3	0.001969	43	65	77.4	0.00452142
15	95	65	0.001969	44	65	71.3	0.00707515
16	95	58.5	0.00194043	45	65	65	0.00707515
17	95	51	0.00194043	46	65	58.5	0.00697249
18	95	45.1	0.00108569	47	65	51	0.00697249
19	95	40.6	0.00056308	48	65	45.1	0.00390117
20	95	35.1	0.00039285	49	65	40.6	0.0020233
21	85	100	0.00019156	50	65	35.1	0.00141161
22	85	85.3	0.00107271	51	55	100	0.00059204
23	85	77.4	0.00202475	52	55	85.3	0.00331544
24	85	71.3	0.00316834	53	55	77.4	0.00625789
25	85	65	0.00316834	54	55	71.3	0.00979239
26	85	58.5	0.00312236	55	55	65	0.00979239
27	85	51	0.00312236	56	55	58.5	0.0096503
28	85	45.1	0.00174699	57	55	51	0.0096503
29	85	40.6	0.00090606	58	55	45.1	0.00539943

Πίνακας Α.1: Συνδυασμοί των πιθανών καταστάσεων παραγωγής και ζήτησης (συνέχεια).

Κατάσταση	Παραγωγή (%)	Ζήτηση (%)	Πιθανότητα	Κατάσταση	Παραγωγή (%)	Ζήτηση (%)	Πιθανότητα
59	55	40.6	0.00280036	90	25	35.1	0.00370801
60	55	35.1	0.00195374	91	15	100	0.00122701
61	45	100	0.00077661	92	15	85.3	0.00687126
62	45	85.3	0.00434904	93	15	77.4	0.0129695
63	45	77.4	0.00820881	94	15	71.3	0.02029475
64	45	71.3	0.0128452	95	15	65	0.02029475
65	45	65	0.0128452	96	15	58.5	0.02000026
66	45	58.5	0.01265881	97	15	51	0.02000026
67	45	51	0.01265881	98	15	45.1	0.01119033
68	45	45.1	0.00708272	99	15	40.6	0.00580376
69	45	40.6	0.00367338	100	15	35.1	0.00404913
70	45	35.1	0.00256283	101	5	100	0.00124167
71	35	100	0.00096281	102	5	85.3	0.00695335
72	35	85.3	0.00539176	103	5	77.4	0.01312445
73	35	77.4	0.01017694	104	5	71.3	0.02053722
74	35	71.3	0.01592494	105	5	65	0.02053722
75	35	65	0.01592494	106	5	58.5	0.02023922
76	35	58.5	0.01569387	107	5	51	0.02023922
77	35	51	0.01569387	108	5	45.1	0.01132403
78	35	45.1	0.00878086	109	5	40.6	0.0058731
79	35	40.6	0.00455411	110	5	35.1	0.00409751
80	35	35.1	0.00317729	111	0	100	0.00289147
81	25	100	0.00112364	112	0	85.3	0.01619225
82	25	85.3	0.00629238	113	0	77.4	0.03056288
83	25	77.4	0.01187687	114	0	71.3	0.04782498
84	25	71.3	0.01858501	115	0	65	0.04782498
85	25	65	0.01858501	116	0	58.5	0.04713103
86	25	58.5	0.01831533	117	0	51	0.04713103
87	25	51	0.01831533	118	0	45.1	0.02637024
88	25	45.1	0.0102476	119	0	40.6	0.01367667
89	25	40.6	0.00531482	120	0	35.1	0.00954186