



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

**Μελέτη της στοχαστικής συσχέτισης σε Σ.Η.Ε με έντονη
δειξοδυσση Αιολικής Ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΝΗ Α. ΚΟΤΣΙΦΗ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009



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

Μελέτη της στοχαστικής συσχέτισης σε Σ.Η.Ε με έντονη δείσδυση Αιολικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΝΗ Α. ΚΟΤΣΙΦΗ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

.....
Ν.ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ

.....
Σ. ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

.....

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

.....

ΕΛΕΝΗ Α. ΚΟΤΣΙΦΗ

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

Copyright © Ελένη Κοτσίφη, 2009

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.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2008- 2009 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της στοχαστικής συσχέτισης μεταξύ των μεγεθών που περιλαμβάνονται σε Σ.Η.Ε με έντονη διείδυση Αιολικής και η μοντελοποίηση των αβέβαιων εισόδων τέτοιου τύπου συστημάτων.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ν. Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Ανέστη Αναστασιάδη, για τη βοήθεια, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

ΕΛΕΝΗ Α. ΚΟΤΣΙΦΗ

Περίληψη

Πλέον, η μόνη απάντηση στην εξάντληση των συμβατικών καυσίμων και στη διαρκή επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τη λειτουργία συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η στοχαστικότητα της παραγωγής από τέτοιου τύπου μονάδες είναι η κύρια διαφοροποίησή τους από τη συμβατική παραγωγή. Το γεγονός αυτό έχει αυξήσει την αβεβαιότητα των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, κάτι το οποίο απαιτεί τη δημιουργία ενός στοχαστικού μοντέλου μελέτης των Σ.Η.Ε.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η αβεβαιότητα συστημάτων με έντονη διεύθυνση Αιολικής Ενέργειας και προτείνονται τρόποι μοντελοποίησης των αβέβαιων μεταβλητών (φορτία και παραγωγές) λαμβάνοντας υπόψιν τις συσχετίσεις που παρατηρούνται μεταξύ τους.

Δεδομένου ότι κύρια πηγή στοχαστικότητας σε τέτοιου τύπου Σ.Η.Ε είναι η μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου, το ενδιαφέρον στρέφεται σε τρόπους μοντελοποίησής της λαμβάνοντας υπόψιν όχι μόνο την κατανομή που ακολουθεί αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρά με τις υπόλοιπες μεταβλητές του συστήματος.

Η προσομοίωση Monte Carlo αποτελεί την αποτελεσματικότερη μέθοδο αντιμετώπισης του προβλήματος της στοχαστικότητας των ΣΗΕ εφόσον δίνει τη δυνατότητα παραγωγής πλήθους δειγμάτων για τις τυχαίες μεταβλητές του υπό μελέτη συστήματος, διαχωρίζοντας τη στοχαστικότητα σε δύο μέρη: μοντελοποίηση των περιθώριων κατανομών των μεταβλητών και μοντελοποίηση της μεταξύ τους συσχέτισης. Οι περιθώριες κατανομές έχουν επίδραση στη συμπεριφορά κάθε μεταβλητής ενώ οι μεταξύ τους συσχετίσεις καθορίζουν τη συνολική τους συμπεριφορά. Μέσω εφαρμογών αποδεικνύεται ότι η συνολική παραγόμενη Αιολική ισχύς ενός συστήματος επηρεάζεται έντονα από τις συσχετίσεις των ταχυτήτων του ανέμου στις περιοχές όπου είναι εγκατεστημένες οι μονάδες Αιολικής παραγωγής.

Όσον αφορά στη μοντελοποίηση της συσχέτισης, βάσει των διαθέσιμων πληροφοριών καθορίζεται η δομή συσχέτισης που θα χρησιμοποιηθεί. Σε περίπτωση που υπάρχουν πληροφορίες για τις συσχετίσεις μεταξύ όλων των μεταβλητών του συστήματος, οι συντελεστές συσχέτισης οργανώνονται σε έναν πίνακα συσχέτισης και η μοντελοποίηση

έχει ολοκληρωθεί. Ωστόσο, αυτό το σενάριο δεν ισχύει πάντα. Γι αυτό το λόγο εισάγονται έννοιες όπως τα Dependence Trees, Dependence Vines και οι συναρτήσεις copulas, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση ολόκληρου του συστήματος κάνοντας χρήση μόνο των διαθέσιμων πληροφοριών συσχέτισης.

Μελετάται, επίσης, η τεχνική των Stochastic Plants ως μέθοδος μείωσης της αβεβαιότητας των ΣΗΕ.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό UNICORN, το οποίο αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση της αβεβαιότητας συστημάτων με έντονη στοχαστικότητα. Τα μεγέθη του συστήματος εισάγονται ως τυχαίες μεταβλητές στο πρόγραμμα και καθορίζοντας τις απαραίτητες περιθώριες κατανομές και τα μοντέλα συσχέτισης, το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων.

Τα δείγματα που παράγονται μέσω της παραπάνω διαδικασίας δίνουν μια σαφή εικόνα σχετικά με τις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το σύστημα ενώ επιλύοντας ροές φορτίου βάσει αυτών των δειγμάτων προκύπτουν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με μεγέθη του συστήματος όπως οι τάσεις των ζυγών και οι ροές ισχύος των γραμμών του συστήματος.

Τέλος, μελετάται η επίλυση της Ροής φορτίου μέσω της στοχαστικής μεθόδου (Stochastic Load Flow) , η οποία παρόλο που θεωρείται λιγότερο ακριβής συγκριτικά με τη μέθοδο Monte Carlo, αποτελεί έναν αξιόπιστο τρόπο επίλυσης της ροής φορτίου για βραχυπρόθεσμες μελέτες.

Λέξεις κλειδιά: Διεσπαρμένη παραγωγή-Στοχαστική ροή φορτίου-Στοχαστική συσχέτιση- Monte Carlo – Stochastic Plant

Abstract

Concerns on environmental issues lead to an increasing implementation of environmentally friendly energy sources in electrical power systems. The uncontrollability of this stochastic Generation is its main difference from the conventional power generation.

In the frames of this diploma thesis, we will study the uncertainty of Power Systems with high Wind Power penetration and we will propose a way of modeling the stochastic inputs of a Power System (load and generation) taking into account the stochastic correlation of these inputs.

The uncertainty of Power systems with Wind Power penetration mainly comes from the uncontrollability of wind. So, it is necessary to find a model that best describes wind speed variations.

A Monte-Carlo approach is proposed for the solution of the problem described above, based on the splitting of the modeling procedure in two basic components, i.e. the modeling of the one-dimensional marginal distributions and the modeling of the multi-dimensional stochastic dependence structure. The marginals represent the output spectrum of each stochastic input, while the stochastic dependence structure determines the mutual interaction between the stochastic inputs and has a direct impact on their aggregate.

As far as the modeling of dependence is concerned, the available information defines the dependence structure that should be used. On the assumption that the correlations between all the random variables of the system are known, a correlation matrix should be used and the modeling procedure is completed. However, the scenario described above is not that realistic. So, in cases that the problem involves high uncertainty, Copula-Trees and Copula-Vines methods are used.

There are also proposed model reduction techniques in terms of simplifying approximations of parts of the stochastic model. These approximations are called stochastic plants and are defined as the comonotonic versions of vectors of stochastic inputs.

The thesis also introduces UNICORN, which is a stand-alone uncertainty analysis program. System's inputs are considered to be random variables with specific marginal distributions and by defining the dependence model between the variables, a large number of samples can be produced for each variable through simulation.

These samples describe the system's behavior and they can be used for the solution of the Load Flow equations.

Finally, Stochastic Load Flow Method is studied, which is less accurate than Monte Carlo technique but it is considered to be accurate enough for short-term studies of a power system.

Index Terms: Distributed Generation – Stochastic Load Flow – Stochastic dependence – Monte Carlo – Stochastic Plant

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	1
1.2 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	3
1.2.1 ΟΦΕΛΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	5
1.2.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	7
1.3 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	9
1.4 ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑ Σ.Η.Ε	12
1.4.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑ Σ.Η.Ε.....	13
1.4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ Σ.Η.Ε	16
1.4.2.1 <i>Μεταβλητότητα Αιολικής ισχύος</i>	16
1.4.2.2 <i>Ποιότητα Αιολικής Ισχύος</i>	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΗΕ & ΘΕΩΡΙΑ ΤΥΧΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

2.1 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	22
2.1.1 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ	23
2.1.2 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	25
2.1.2.1 <i>Μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου</i>	27
2.1.2.2 <i>Μοντελοποίηση παραγόμενης αιολικής ισχύος</i>	28
2.2 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ & ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΕΝΟΣ Σ.Η.Ε ΩΣ ΤΥΧΑΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ.....	29
2.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΥΧΑΙΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ	29
2.2.2 ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΟΡΙΑΚΟ ΘΕΩΡΗΜΑ-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ..	31
2.2.3 ΡΟΠΕΣ ΤΥΧΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	35
2.2.4 ΑΠΟ ΚΟΙΝΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΘΩΡΙΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ.....	37
2.2.5 ΡΟΠΕΣ ΖΕΥΓΟΥΣ ΤΥΧΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ.....	39
2.2.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΥΧΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ.....	40
2.2.6.1 <i>Μέτρα Συσχέτισης</i>	40
2.2.6.1.1 Ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson	41
2.2.6.1.2 Ο συντελεστής συσχέτισης του Spearman	42
2.2.6.2 <i>Συσχετισμένες μεταβλητές σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας</i>	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣΗΕ

3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	45
3.1.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	46
3.1.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	51
3.1.3 ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	52
3.2 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ	53

3.2.1	ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΩΝ – ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	54
3.2.3	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	61
3.2.3.1	Εξισώσεις Στοχαστικής μεθόδου	61
3.2.3.2	Στοχαστική μέθοδος με χρήση αναπτύγματος Taylor δευτέρας τάξης	65
3.2.4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE CARLO	70
3.2.4.1	Παραγωγή Τυχαίων αριθμών μέσω της συνάρτησης κατανομής.....	72
3.2.4.2	Ακρίβεια της μεθόδου Monte Carlo	73
3.2.4.3	Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo στη Ροή φορτίου	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΣΗΕ

4.1	ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΜΕ ΜΗ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ.....	77
4.1.1	ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΔΥΟ ΦΟΡΤΙΩΝ ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ.....	77
4.1.2	ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΕΝΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ ΜΙΑΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΕΙ WEIBULL ΚΑΤΑΝΟΜΗ.....	79
4.2	ΑΠΑΛΕΙΦΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΘΩΡΙΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΣΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΕΝΩΝ ΤΥΧΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	80
4.2.1	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΑΞΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ	81
4.2.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΜΕ ΜΗ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ	82
4.3	ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ (CORULAS)	83
4.3.1	ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ	84
4.3.2	ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΟΥ SKLAR.....	84
4.3.3	ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΕΣ ΣΥΖΕΥΞΕΩΝ	85
4.3.4	ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ CORULAS ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ.....	88
4.4	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ 2 ΤΥΧΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	90
4.5	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	92
4.5.1	ΤΥΠΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	92
4.5.2	ΠΙΝΑΚΕΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ.....	93
4.5.2.1	Δειγματοληψία μέσω πίνακα συσχέτισης (Joint Normal Transform Methology – JNT) ..	93
4.5.2.2	Μετατροπή πίνακα συσχέτισης σε θετικά ημιορισμένο	94
4.5.3	DEPENDENCE TREES	96
4.5.4	DEPENDENCE VINES.....	97
4.5.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	98
4.6	ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΩΝ STOCHASTIC PLANTS	99
4.7	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ Σ.Η.Ε ΜΕ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	103

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ UNICORN

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	105
5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΥΧΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ.....	106
5.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΤΩΝ ΤΥΧΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ.....	108
5.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ UNICORN	112
5.5 ΠΑΚΕΤΟ UNIGRAPH	114
5.6 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΗ.....	117
5.7 ΟΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ “PREV” ΚΑΙ “VARY”	118
5.8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	119

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΚΤΥΟΥ 26 ΖΥΓΩΝ ΜΕ ΕΝΤΟΝΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	122
6.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	122
6.1.2 ΠΕΡΙΘΩΡΙΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	125
6.2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚ ΠΛΑΝΤ ΣΤΟ ΖΥΓΟ 19... 127	
6.2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΤΟΥ SGP.....	128
6.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΘΩΡΙΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΤΟΥ SGP	133
6.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΙΣ ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ SGP 19 ΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	135
6.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΤΟΥ ΖΥΓΟΥ 19.....	136
6.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΓΡΑΜΜΗ 10-19	138
6.4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΤΩΝ ΖΥΓΩΝ 19 ΚΑΙ 21 ΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	140
6.4.1 ΜΕΛΕΤΗ ΤΑΣΕΩΝ.....	144
6.4.2 ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΩΝ ΙΣΧΥΟΣ.....	146
6.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	149

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	154
7.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ	155
7.2.1 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	155
7.2.2 ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ	156
7.2.3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	158

7.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΑΝΕΜΟΥ & ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ	158
7.3.1 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΑΝΕΜΟΥ	159
7.3.2 ΣΧΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΕΣ	160
7.3.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΑΝΕΜΟΥ	162
7.4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΕΤΑΙ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	164
7.4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	165
7.4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 6.....	168
7.5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΤΙΣ ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΕΣ.....	169
7.5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΡΟΕΣ ΙΣΧΥΟΣ	172
7.5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΑΠΩΛΕΙΕΣ	174
7.5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΖΥΓΩΝ	175
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	177
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	181

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1	Σ.Η.Ε με συμμετοχή Α.Π.Ε.....	2
Σχήμα 1.2	Σύγκριση Εγκατάστασης Κεντρικής Παραγωγής με εγκατάσταση Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	4
Σχήμα 1.3	Απώλειες παραδοσιακού Σ.Η.Ε.....	5
Σχήμα 1.4	Απώλειες μελλοντικών δικτύων.....	6
Σχήμα 1.5	Ανεμογεννήτριες οριζόντιου & Κατακόρυφου άξονα.....	9
Σχήμα 1.6	Καμπύλη ισχύος-ταχύτητας ανέμου.....	11
Σχήμα 1.7	Σ.Η.Ε με Διεσπαρμένη Παραγωγή.....	12
Σχήμα 1.8	Συμβατικό Σύστημα Διανομής.....	13
Σχήμα 1.9	Σύστημα Διανομής με συμμετοχή μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	14
Σχήμα 1.10	Όραμα Ε.Π για τα μελλοντικά Δίκτυα.....	15
Σχήμα 2.1	Μεταβολή συνολικού φορτίου Κρήτης – 01/01/08.....	23
Σχήμα 2.2	Μεταβολή συνολικού φορτίου Κρήτης – 02/01/08.....	24
Σχήμα 2.3	Μεταβολή συνολικού φορτίου Κρήτης – 03/01/08.....	24
Σχήμα 2.4	Μεταβολή της συνολικής Αιολικής παραγωγής της Κρήτης – 01/01/08.....	25
Σχήμα 2.5	Μεταβολή της συνολικής Αιολικής παραγωγής της Κρήτης – 02/01/08.....	26
Σχήμα 2.6	Μεταβολή της συνολικής Αιολικής παραγωγής της Κρήτης – 03/01/08.....	26
Σχήμα 2.7	Κατανομή συνολικής Αιολικής παραγωγής 2 μονάδων.....	33
Σχήμα 2.8	Κατανομή συνολικής Αιολικής παραγωγής 4 μονάδων.....	33
Σχήμα 2.9	Κατανομή συνολικής Αιολικής παραγωγής 8 μονάδων.....	34
Σχήμα 2.10	Κατανομή συνολικής Αιολικής παραγωγής 16 μονάδων.....	34
Σχήμα 2.11	Κατανομή συνολικής Αιολικής παραγωγής 32 μονάδων.....	35
Σχήμα 3.1	Τυπικό μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	47
Σχήμα 3.2	Γενικευμένος ζυγός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	49
Σχήμα 3.3	Δειγματοληψία μέσω της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής.....	73
Σχήμα 4.1	Διασπορά φορτίων για $\rho = -1$	78
Σχήμα 4.2	Διασπορά φορτίων για $\rho = -0.8$	78

Σχήμα 4.3 Διασπορά φορτίων για $\rho = -0.5$	78
Σχήμα 4.4 Διασπορά φορτίων για $\rho = -0.2$	78
Σχήμα 4.5 Διασπορά φορτίων για $\rho = 0.2$	78
Σχήμα 4.6 Διασπορά φορτίων για $\rho = 0.5$	78
Σχήμα 4.7 Διασπορά φορτίων για $\rho = 0.8$	79
Σχήμα 4.8 Διασπορά φορτίων για $\rho = 1$	79
Σχήμα 4.9 Διασπορά φορτίου-ταχύτητας ανέμου για $\rho = 1$	80
Σχήμα 4.10 Διασπορά L-W για $\rho = 1$ (Product Moment Correlation)	82
Σχήμα 4.11 Διασπορά L-W για $\rho = 1$ (Rank Correlation)	83
Σχήμα 4.12 Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου με Normal Copula	89
Σχήμα 4.13 Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου με Elliptical Copula	89
Σχήμα 4.14 Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου με Frank Copula	89
Σχήμα 4.15 Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου με Diagonal Band Copula	90
Σχήμα 4.16 Κατανομή $U_1 + U_2$ για $\rho = 0$	91
Σχήμα 4.17 Κατανομή $U_1 + U_2$ για $\rho = 0.6$	91
Σχήμα 4.18 Κατανομή $U_1 + U_2$ για $\rho = 1$	91
Σχήμα 4.19 Παράδειγμα Dependence Tree για 6 μεταβλητές	96
Σχήμα 4.20 Παράδειγμα Vine για 4 μεταβλητές	97
Σχήμα 4.21 Vine με καθορισμένες υπο συνθήκη συσχετίσεις	98
Σχήμα 4.22 Συνολικό φορτίο για $\rho = 0$	100
Σχήμα 4.23 Συνολικό φορτίο για $\rho = 0.5$	100
Σχήμα 4.24 Συνολικό φορτίο για $\rho = 1$	100
Σχήμα 4.25 Stochastic Plant Παραγωγών	101
Σχήμα 4.26 Stochastic Plant Φορτίων	102
Σχήμα 4.27 Stochastic Plant φορτίων και παραγωγών	102
Σχήμα 5.1 Menu εισαγωγής τυχαίων μεταβλητών	107
Σχήμα 5.2 Menu Εισαγωγής συναρτήσεων	108
Σχήμα 5.3 Menu εισαγωγής δομής συσχέτισης	109
Σχήμα 5.4 Dependence Tree 5 μεταβλητών	110

Σχήμα 5.5 D-Vine.....	110
Σχήμα 5.6 C-Vine.....	111
Σχήμα 5.67 Menu εισαγωγής Copula.....	112
Σχήμα 5.8 Menu προσομοίωσης.....	113
Σχήμα 5.9 Παράδειγμα διαγράμματος διασποράς στο UNICORN.....	115
Σχήμα 5.10 Διαγράμματα διασποράς για 4 είδη Copulas.....	115
Σχήμα 5.11 Cobweb διαγράμματα στο UNICORN.....	116
Σχήμα 5.12 Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας.....	117
Σχήμα 5.13 Menu ανάλυσης ευαισθησίας.....	120
Σχήμα 5.14 Διαδικασία ανάλυσης ευαισθησίας.....	121
Σχήμα 6.1 Σύστημα 26 ζυγών.....	123
Σχήμα 6.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος Α/Γ Vestas 0.85 MW.....	127
Σχήμα 6.3 Κατανομή ανέμου –Περιοχή 1.....	128
Σχήμα 6.4 Κατανομή ανέμου –Περιοχή 2.....	129
Σχήμα 6.5 Κατανομή ανέμου –Περιοχή 3.....	129
Σχήμα 6.6 Κατανομή Αιολικής παραγωγής –Independence Scenario.....	130
Σχήμα 6.7 Κατανομή Αιολικής παραγωγής –Medium Correlation Scenario.....	130
Σχήμα 6.8 Κατανομή Αιολικής παραγωγής –High Correlation Scenario.....	131
Σχήμα 6.9 Κατανομή Αιολικής παραγωγής – Σενάριο 1.....	134
Σχήμα 6.10 Κατανομή Αιολικής παραγωγής – Σενάριο 2.....	134
Σχήμα 6.11 Κατανομή Αιολικής παραγωγής – Σενάριο 3.....	135
Σχήμα 6.12 Κατανομή τάσης ζυγού 19 – High Correlation Scenario.....	137
Σχήμα 6.13 Κατανομή τάσης ζυγού 19 – Independence Scenario.....	137
Σχήμα 6.14 Μεταβολές τάσης ζυγού 19 για 2 σενάρια συσχέτισης.....	138
Σχήμα 6.15 Κατανομή της Ροής ισχύος της γραμμής 10-19 (High Correlation Scenario).....	139
Σχήμα 6.16 Κατανομή της Ροής ισχύος της γραμμής 10-19 (Independence Scenario).....	140
Σχήμα 6.17 Μεταβολές παραγωγών (independence).....	142
Σχήμα 6.18 Μεταβολές παραγωγών (medium correlation).....	143
Σχήμα 6.19 Μεταβολές παραγωγών (high correlation)	143

Σχήμα 6.20	Μεταβολές παραγωγών (high negative correlation).....	144
Σχήμα 6.21	Κατανομή τάσης 19 (independence)	144
Σχήμα 6.22	Κατανομή τάσης 21 (independence).....	144
Σχήμα 6.23	Κατανομή τάσης 19 (medium corr.)	145
Σχήμα 6.24	Κατανομή τάσης 21 (medium corr.).....	145
Σχήμα 6.25	Κατανομή τάσης 19 (high corr.)	145
Σχήμα 6.26	Κατανομή τάσης 21 (high corr.).....	145
Σχήμα 6.27	Κατανομή τάσης 19 (negative corr.)	145
Σχήμα 6.28	Κατανομή τάσης 21 (negative corr.).....	145
Σχήμα 6.29	Κατανομή ροής ισχύος (6-19) –Indep.	147
Σχήμα 6.30	Κατανομή ροής ισχύος (17-21) –Indep.....	147
Σχήμα 6.31	Κατανομή ροής ισχύος (6-19) –Med.Corr	147
Σχήμα 6.32	Κατανομή ροής ισχύος (17-21) –Med.Corr.....	147
Σχήμα 6.33	Κατανομή ροής ισχύος (6-19) –High Corr.	147
Σχήμα 6.34	Κατανομή ροής ισχύος (17-21) –High Corr.....	147
Σχήμα 6.35	Κατανομή ροής ισχύος (6-19) –Neg.Corr.	148
Σχήμα 6.36	Κατανομή ροής ισχύος (17-21) –Neg.Corr.....	148
Σχήμα 6.37	Κατανομή των συντελεστών συσχέτισης φορτίων-παραγωγών.....	150
Σχήμα 6.38	Σύγκριση κατανομών τάσης (ζυγός 7) για Monte Carlo και Στοχαστική Ροή.....	152
Σχήμα 6.39	Σύγκριση κατανομών ροής ισχύος (11-25) για Monte Carlo και Στοχαστική Ροή.....	152
Σχήμα 7.1	Σύστημα Παραγωγής-Μεταφοράς της Κρήτης.....	155
Σχήμα 7.2	Μονογραμμικό διάγραμμα Υποσταθμού Σητείας.....	157
Σχήμα 7.3	Πραγματική κατανομή ανέμου	160
Σχήμα 7.4	Κατανομή ανέμου-Προσομοίωση.....	160
Σχήμα 7.5	Καμπύλη ισχύος Α/Γ Vestas 0.85MW.....	160
Σχήμα 7.6	Κατανομή συντελεστών συσχέτισης ταχυτήτων ανέμου.....	162
Σχήμα 7.7	Κοινές μεταβολές συσχετισμένων Αιολικών Πάρκων.....	163
Σχήμα 7.8	Κοινές μεταβολές ανεξάρτητων Αιολικών Πάρκων.....	163
Σχήμα 7.9	Μεταβολές ταχ. ανέμου- Σενάριο 1	166

Σχήμα 7.10	Μεταβολές ταχ. ανέμου- Σενάριο 2166
Σχήμα 7.11	Μεταβολές ταχ. ανέμου- Σενάριο 3.....	166
Σχήμα 7.12	Κατανομή συνολικής Αιολικής Παραγωγής – Σενάριο 1.....	166
Σχήμα 7.13	Κατανομή συνολικής Αιολικής Παραγωγής – Σενάριο 2.....	167
Σχήμα 7.14	Κατανομή συνολικής Αιολικής Παραγωγής – Σενάριο 3.....	167
Σχήμα 7.15	Κατανομή παραγωγής- 26 ζυγοί-Indep.168
Σχήμα 7.16	Κατανομή παραγωγής- 26 ζυγοί-High Corr.168
Σχήμα 7.17	Μεταβολές φορτίου-Αιολ.Παραγωγής-Αρνητική Συσχέτιση.....	171
Σχήμα 7.18	Μεταβολές φορτίου-Αιολ.Παραγωγής-Ανεξαρτησία.....	172
Σχήμα 7.19	Μεταβολές Ροές ισχύος για τα 2 σενάρια συσχέτισης.....	174

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη μετατροπής της αεροδυναμικής ισχύος του ανέμου.....	10
Πίνακας 6.1 Εγκατεστημένη ισχύς Αιολικών Πάρκων.....	123
Πίνακας 6.2 Κατανομή εγκατεστημένου ισχύος στις 3 περιοχές του SGP.....	124
Πίνακας 6.3 Χαρακτηριστικά των γραμμών του δικτύου.....	124
Πίνακας 6.4 Αναμενόμενες τιμές φορτίων.....	125
Πίνακας 6.5 Στοιχεία προσομοίωσης συμβατικών παραγωγών.....	126
Πίνακας 6.6 Παράμετροι κατανομών Weibull ταχυτήτων ανέμου.....	126
Πίνακας 6.7 Πιθανότητες ακραίων τιμών αιολικής παραγωγής.....	131
Πίνακας 6.8 Αναμενόμενη τιμή και τυπική απόκλιση συνολικής παραγωγής ζυγού 19.....	132
Πίνακας 6.9 Παράμετροι Weibull για τα 3 σενάρια.....	133
Πίνακας 6.10 Αναμενόμενη τιμή και τυπική απόκλιση συνολικής παραγωγής για 3 σενάρια κατανομών.....	133
Πίνακας 6.11 Παράμετροι κατανομής Weibull για τις 3 περιοχές του SGP.....	136
Πίνακας 6.12 Αναμενόμενη τιμή και τυπική απόκλιση τάσης ζυγού 19.....	136
Πίνακας 6.13 Όρια της τάσης του ζυγού 19.....	137
Πίνακας 6.14 Όρια ροής ισχύος – γραμμή 10-19.....	139
Πίνακας 6.15 Αναμενόμενη τιμή και τυπική απόκλιση ροής ισχύος στη γραμμή 10-19.....	139
Πίνακας 6.16 Χαρακτηριστικά σεναρίου 1.....	141
Πίνακας 6.17 Χαρακτηριστικά σεναρίου 2.....	141
Πίνακας 6.18 Χαρακτηριστικά σεναρίου 3.....	141
Πίνακας 6.19 Χαρακτηριστικά σεναρίου 4.....	142
Πίνακας 6.20 Αναμενόμενες τιμές και τυπικές αποκλίσεις τάσεων.....	146
Πίνακας 6.21 Αναμενόμενες τιμές και τυπικές αποκλίσεις ροών ισχύος.....	148

Πίνακας 6.22	Χαρακτηριστικά κατανομών και συσχέτισης σεναρίου.....	149
Πίνακας 6.23	Αποτελέσματα Στοχαστική Ροής για τις αναμενόμενες τιμές των τάσεων.....	150
Πίνακας 6.24	Αποτελέσματα Στοχαστικής Ροής φορτίου για ροές ισχύος και απώλειες.....	151
Πίνακας 6.25	Σύγκριση αποτελεσμάτων Monte Carlo και Στοχαστικής Ροής.....	151
Πίνακας 7.1	Χαρακτηριστικά συμβατικών σταθμών Κρήτης.....	156
Πίνακας 7.2	Χαρακτηριστικά ΑΠΕ της Κρήτης.....	158
Πίνακας 7.3	Παράμετροι Weibull των ταχυτήτων του ανέμου στα πάρκα της Κρήτης.....	159
Πίνακας 7.4	Αριθμός Α/Γ στα Αιολικά πάρκα της Κρήτης.....	161
Πίνακας 7.5	Μέσες τιμές και αποκλίσεις συνολικής παραγωγής για 3 σενάρια συσχέτισης....	168
Πίνακας 7.6	Μέγιστη Αιολική σχύς για 3 σενάρια συσχέτισης.....	169
Πίνακας 7.7	Ανασόμενες τιμές φορτίων.....	170
Πίνακας 7.8	Αναμενόμενες τιμές των παραγωγών των Αιολικών Πάρκων.....	171
Πίνακας 7.9	Αναμενόμενες μέσες τιμές ρών ισχύος για 2 σενάρια συσχέτισης.....	173
Πίνακας 7.10	Τυπικές αποκλίσεις ρών ισχύος για 2 σενάρια συσχέτισης.....	173
Πίνακας 7.11	Όρια εμπιστοσύνης ρών ισχύος.....	173
Πίνακας 7.12	Αναμενόμενες τιμές απωλειών στη γραμμή 10-40.....	174
Πίνακας 7.13	Αναμενόμενες τιμές συνολικών απωλειών.....	175
Πίνακας 7.14	Τυπική απόκλιση συνολικών απωλειών.....	175
Πίνακας 7.15	Όρια εμπιστοσύνης για την τάση του ζυγού 60.....	175

1

Σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.1 Εισαγωγή στη μη συμβατική παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις της βιομηχανικής εποχής που διανύουμε οδήγησαν τον άνθρωπο στην αλόγιστη και σπάταλη εκμετάλλευση των συμβατικών καυσίμων αγνοώντας τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αν αυτή η νοοτροπία δεν ανατραπεί σύντομα θα θέσει σε κίνδυνο τη μελλοντική επιβίωση του ανθρώπου. Η συνεχής αύξηση της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας, σε συνδυασμό με την έντονη ανομοιομορφία της ενεργειακής ζήτησης στις διάφορες περιοχές του πλανήτη, εγγυώνται τη διατήρηση υψηλών ρυθμών κατανάλωσης ενέργειας και κατά τα επόμενα χρόνια.

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικά αναπόφευκτες απώλειες ενέργειας στα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς, καθώς και τη μη ορθολογική χρήση της ενέργειας, όπως και την αδιαφορία και έλλειψη ενημέρωσης των πολιτών για την αναμενόμενη εξάντληση των βεβαιωμένων ενεργειακών αποθεμάτων, αρκετοί επιστήμονες πιστεύουν ότι η άφιξη του «ενεργειακού χειμώνα» στον πλανήτη μας καθίσταται σχεδόν αναπόφευκτη.

Τέλος, η διαδικασία παραγωγής ενέργειας με τη χρήση συμβατικών καυσίμων επιβαρύνει έντονα το περιβάλλον (όξινη βροχή, φαινόμενο θερμοκηπίου, ραδιενεργά απόβλητα, αλλοίωση τοπίου). Συνεπώς, η μόνη απάντηση στην εξάντληση των συμβατικών καυσίμων και στη διαρκή επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τη λειτουργία συμβατικών σταθμών παραγωγής, είναι η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

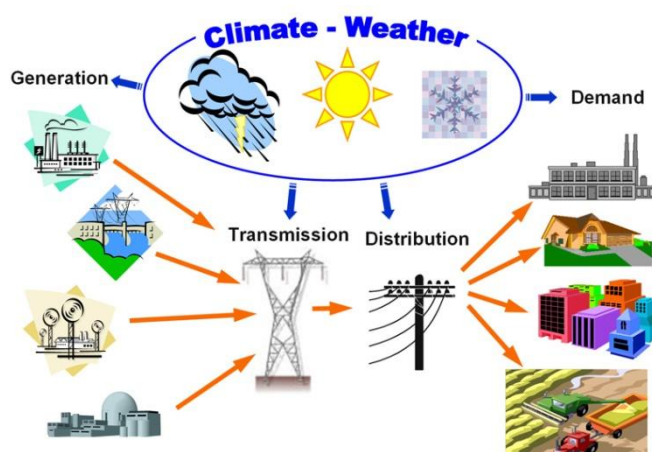
Σήμερα, για πολλές χώρες, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας αποτελούν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο.

Ως ανανεώσιμη ενέργεια ορίζεται 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 τη βιομάζα. Οι ανανεώσιμες πηγές δεν εξαντλούνται πρακτικά ποτέ και δεν ρυπαίνουν. Αντιθέτως, συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο. Παράλληλα, συντελούν και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο πρωταρχικά υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών παρουσιάσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1979 και παγιώθηκε την τελευταία δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Βασικό πλεονέκτημα των ΑΠΕ έναντι των συμβατικών πηγών είναι το ότι ανανεώνονται από τη φύση και δεν προκαλούν μόλυνση της ατμόσφαιρας. Όμως, ο ρυθμός με τον οποίο παρέχεται η ενέργεια από τις ΑΠΕ δεν είναι ελεγχόμενος, ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να παρέχεται όταν το απαιτούν οι ανθρώπινες ανάγκες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι η ηλεκτρική ενέργεια δύσκολα αποθηκεύεται σε μεγάλες ποσότητες, οδηγεί στην ανάγκη της σύνδεσης των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο και την παράλληλη λειτουργία τους με το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Δεδομένου δε ότι για τεχνολογικούς λόγους οι μονάδες των ΑΠΕ είναι μικρής ισχύος, συγκριτικά με τις μονάδες της συμβατικής παραγωγής, συνδέονται κατά γενικό κανόνα στο επίπεδο του δικτύου Διανομής, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.1 Σ.Η.Ε με συμμετοχή Α.Π.Ε

1.2 Διεσπαρμένη Παραγωγή

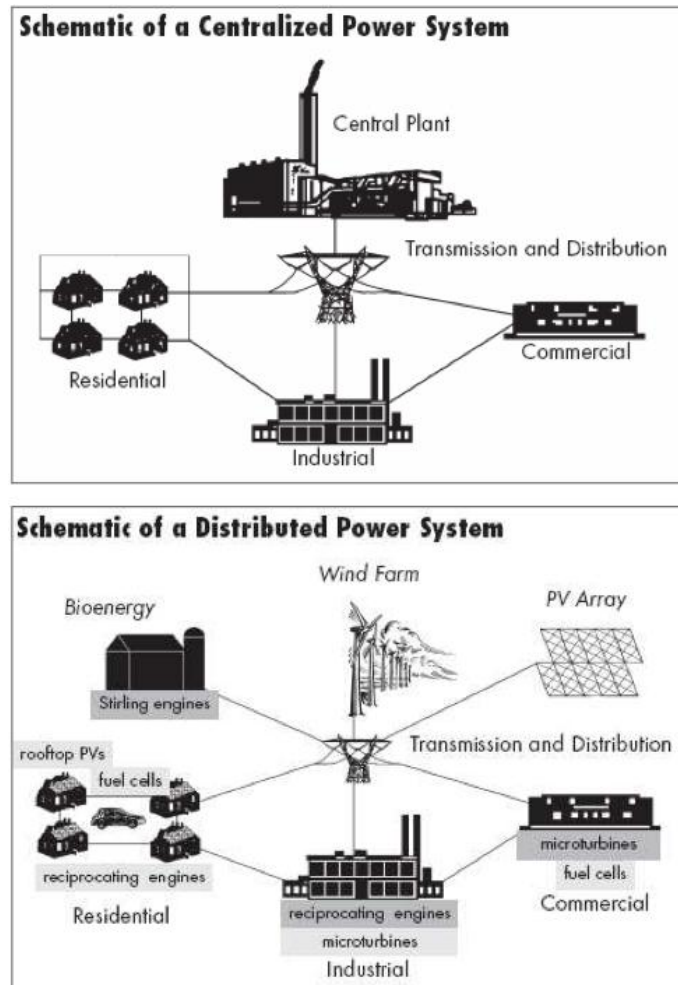
Όπως αναφέρθηκε ήδη, ένα από τα χαρακτηριστικά της μη-συμβατικής παραγωγής είναι το μικρό μέγεθος της παραγωγής. Για να γίνει σαφές αυτό το χαρακτηριστικό γίνεται αναφορά στη διεσπαρμένη παραγωγή και τα χαρακτηριστικά της.

Η διεσπαρμένη παραγωγή εφαρμόζεται κυρίως τα τελευταία χρόνια και ορίζεται ως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες παραγωγής σημαντικά μικρότερες σε ισχύ από τις μονάδες των εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να είναι εφικτή η σύνδεσή τους σχεδόν σε κάθε σημείο ενός ΣΗΕ η παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής είναι τα εξής:

- Όχι κεντρικά σχεδιαζόμενη και αναπτυσσόμενη (από την εταιρεία ηλεκτρισμού ή κάποιον διαχειριστή).
- Δεν υπάρχει κεντρικός προγραμματισμός λειτουργίας των μονάδων από το διαχειριστή του συστήματος.
- Η ισχύς των μονάδων που εγκαθίστανται δεν υπερβαίνει τα 50-100 MW αλλά συνήθως είναι της τάξης λίγων εκατοντάδων kW.
- Είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο Διανομής ανάλογα με το πώς ορίζεται για κάθε υπό μελέτη σύστημα.

Η στροφή προς τη διεσπαρμένη παραγωγή είναι αποτέλεσμα μιας σειράς λόγων, οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι η συνεχής επιβάρυνση του περιβάλλοντος (η οποία σταδιακά επιφέρει σημαντικές κλιματικές αλλαγές), η αδυναμία δημιουργίας νέων γραμμών μεταφοράς ενέργειας και η ανάγκη για απεξάρτηση από τον παραδοσιακό τρόπο παραγωγής ενέργειας.

Για τους παραπάνω λόγους, τα τελευταία χρόνια έχει γίνει σπουδαία πρόοδος στην ανάπτυξη τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής με σκοπό την παροχή ενέργειας στους καταναλωτές με έναν αξιόπιστο τρόπο με ταυτόχρονη μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται οι εγκαταστάσεις ενός Σ.Η.Ε κεντρικής παραγωγής συγκριτικά με τις εγκαταστάσεις ενός Σ.Η.Ε διεσπαρμένης Παραγωγής:



Σχήμα 1.2 Σύγκριση Εγκατάστασης Κεντρικής Παραγωγής με εγκατάσταση Διεσπαρμένης Παραγωγής

Οι τυπικές χρήσεις της διεσπαρμένης παραγωγής είναι οι εξής:

- Οικιακή (ηλεκτρισμός και θέρμανση)
- Εμπορική (ηλεκτρισμός και θέρμανση)
- Θερμοκήπια (ηλεκτρισμός θέρμανση και διοξείδιο του άνθρακα από τη γονιμοποίηση της σοδειάς)
- Βιομηχανική (ηλεκτρισμός και ατμός)
- Περιφερειακή θέρμανση (ηλεκτρισμός και θέρμανση μέσω του δικτύου διανομής θέρμανσης)
- Ισχύς δικτύου (μόνο ηλεκτρισμός που παρέχεται στο δίκτυο)

1.2.1 Οφέλη Διεσπαρμένης Παραγωγής

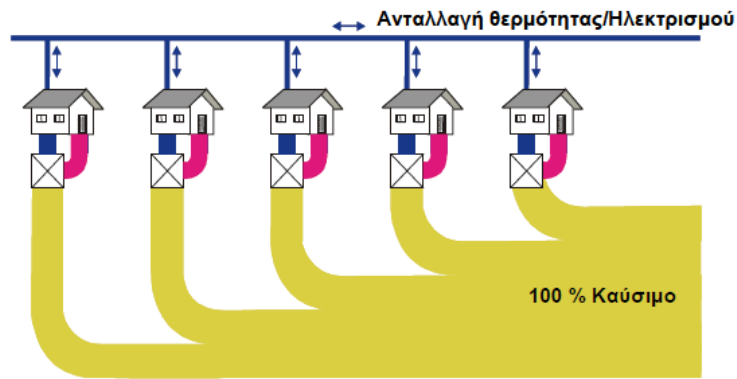
Οι λόγοι που οδηγούν στην εγκατάσταση διεσπαρμένης παραγωγής αντικατοπτρίζοντας και τα αναμενόμενα πιθανά οφέλη τόσο για τους ιδιοκτήτες τους, όσο και για το συνδεδεμένο σύστημα συνοψίζονται στους παρακάτω άξονες:

- Η ύπαρξη εγκατεστημένης ισχύος για παροχή εφεδρείας σε περίπτωση διακοπής τροφοδοσίας ή και για ψαλιδισμό αιχμών του καταναλωτή και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, με τα αντίστοιχα οικονομικά οφέλη.
- Η ανάγκη για αυξημένη αξιοπιστία και βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας ισχύος σε τοπικό επίπεδο μπορεί να οδηγήσει στην απόφαση εγκατάστασης μίας τοπικής μονάδας. Δεδομένου ότι τα συστήματα ελέγχου και αυτοματισμού για τα δίκτυα διανομής βελτιώνονται συνεχώς, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής θα μπορούν να δημιουργήσουν τοπικές νησίδες προσφέροντας ισχύ στους τοπικούς πελάτες σε περιόδους σφάλματος στο ανάντη δίκτυο, αυξάνοντας έτσι την ασφάλεια τροφοδοσίας.
- Ως εναλλακτική μέθοδος της επέκτασης του δικτύου και μείωσης των απωλειών του καθώς το απαιτούμενο φορτίο εξυπηρετείται τοπικά. Μάλιστα είναι ευκολότερο να αυξηθεί σταδιακά η εγκατεστημένη ισχύς σύμφωνα με την πορεία αύξησης της ζήτησης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια αναπαράσταση της αποδοτικότητας της πρωτογενούς ενέργειας σε ένα παραδοσιακό Σ.Η.Ε. :



Σχήμα 1.3 Απώλειες παραδοσιακού Σ.Η.Ε

ενώ ακολουθεί η αποδοτικότητα πρωτογενούς ενέργειας όπως αναμένεται να είναι στα μελλοντικά ηλεκτρικά δίκτυα:



Σχήμα 1.4. Απώλειες μελλοντικών δικτύων

- Βελτίωση του συντελεστή χρησιμοποίησης των δικτύων δεδομένου ότι πλέον περιορίζονται οι απαιτήσεις για την υπέρ-διαστασιολόγηση των εγκαταστάσεων για την αντιμετώπιση μικρών σε διάρκεια αιχμών.
- Υποστήριξη δικτύου με βοηθητικές υπηρεσίες όπως είναι i) η παροχή άεργου ισχύος και υποστήριξης τάσης ii) η παροχή παραγωγής με γρήγορη απόκριση για αποφυγή διακοπής της
- Η εκμετάλλευση Συνδυασμένης Παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού η οποία γίνεται σε τοπικό επίπεδο π.χ σε βιομηχανικές διεργασίες κτλ
- Αποτελεσματική χρήση των δυνατοτήτων για φτηνά τοπικά παραγόμενα καύσιμα και η επιτόπου αξιοποίησή τους όπως για παράδειγμα το τοπικά παραγόμενο βιοαέριο στους βιολογικούς καθαρισμούς .
- Ο μικρός χρόνος εγκατάστασης των μονάδων και τα χαμηλά αρχικά κόστη κεφαλαίου που απαιτούνται σε σχέση με την κατασκευή μεγάλων σταθμών παραγωγής.
- Ευκολία εύρεσης θέσεων για την εγκατάσταση των μονάδων αυτών, ακόμη και στην οροφή ενός κτιρίου π.χ. τα φωτοβολταϊκά.
- Μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων ειδικά αν χρησιμοποιηθούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλά και επειδή χρησιμοποιούνται περισσότερο εξευγενισμένα καύσιμα

π.χ. φυσικό αέριο. Συνάμα η εκμετάλλευση της συμπαραγωγής που αυξάνει την αποδοτικότητα της πρωτογενούς ενέργειας μπορεί να συμβάλλει στο σκοπό αυτό.

- Δημιουργία ευκαιριών για καινοτόμες εφαρμογές . Πιο συγκεκριμένα επειδή το μέγεθος των μονάδων είναι μικρό, τα απαιτούμενα κεφάλαια για τη δημιουργία σειράς παραγωγής είναι σχετικά μικρά και περισσότεροι ενδιαφερόμενοι μπορούν να εισέλθουν. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να διαχέεται η γνώση, να βελτιώνονται οι καμπύλες μάθησης όσων ασχολούνται με το αντικείμενο και εν τέλει να δημιουργούνται οι συνθήκες για την ανάπτυξη καινοτομιών. Επιπρόσθετα, η τοπική εγκατάσταση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής δημιουργεί προϋποθέσεις ανταλλαγής ιδεών σε τοπικό επίπεδο και επαφή με τους πολλούς τελικούς χρήστες της τεχνολογίας. Αναμένεται λοιπόν καταγραφή των δυσκολιών ακόμη και σε πολύ τοπικό επίπεδο, η υπέρβαση των οποίων απαιτεί πλέον καινοτόμες παρεμβάσεις που θα στηρίζονται στις παρατηρήσεις των πελατών.
- Τέλος το γεγονός των πολλών διακριτών τμημάτων που αποτελείται μία μονάδα Διεσπαρμένης παραγωγής, των αναγκών για τοπικούς ελεγκτές, ηλεκτρονικά ισχύος κτλ, θα δημιουργήσει νέες ανάγκες αναζήτησης λύσεων σε επί μέρους προβλήματα για επί μέρους τμήματα μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, από αρκετές διαφορετικές εταιρίες που θα δραστηριοποιηθούν στο χώρο. Επομένως και νέες ευκαιρίες για καινοτόμες εφαρμογές και αύξηση της απασχόλησης.

1.2.2 Μειονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η διεσπαρμένη παραγωγή εκτός των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων, έχει και ορισμένα μειονεκτήματα, που αφορούν οικονομικά, τεχνικά ακόμα και περιβαλλοντικά θέματα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δεν έχει φθάσει σε επίπεδο να μπορεί να ανταγωνιστεί οικονομικά τις μεγάλες μονάδες παραγωγής, με αποτέλεσμα να απαιτείται επιχορήγηση από το κράτος για να μπορεί η επένδυση σε αυτές να είναι βιώσιμη.

Επιπλέον, η σύνδεση εγκαταστάσεων παραγωγής στο δίκτυο διανομής μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ποιότητα ισχύος του δικτύου. Συγκεκριμένα, μπορούν να

προκληθούν μεταβολές και διακυμάνσεις στην τάση του δικτύου εξαιτίας της μονάδας παραγωγής αλλά και γρήγορες μεταβολές της τάσης που έχουν ως συνέπεια τη διακύμανση της φωτεινότητας των λαμπτήρων πυρακτώσεως και την οπτική ενόχληση από αυτή (flicker). Μπορεί να υπάρξει επίσης και αρμονική παραμόρφωση στο δίκτυο εξαιτίας αυτών των εγκαταστάσεων παραγωγής. Για να μην υπάρχουν σημαντικές επιπτώσεις από τα παραπάνω, έχουν θεσπιστεί ορισμένοι κανόνες και όρια στις διακυμάνσεις της τάσης και την αρμονική παραμόρφωση που πρέπει να τηρούνται ώστε να δίνεται η δυνατότητα στις μονάδες να συνδέονται στο δίκτυο.

Εκτός από τα προαναφερθέντα ζητήματα, ωστόσο, υπάρχει και το θέμα της δυσκολίας ακριβούς πρόβλεψης για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων εγκαταστάσεων παραγωγής, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τα αιολικά πάρκα. Πρέπει να γίνεται μετεωρολογική πρόβλεψη, που δεν μπορεί όμως να προβλέψει ακριβώς την ποσότητα ισχύος που θα είναι δυνατό να παραχθεί. Σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών όπως είναι για παράδειγμα ο άνεμος. Έτσι υπάρχει συγκεκριμένο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές, η διεύθυνση είναι δηλαδή περιορισμένη και πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

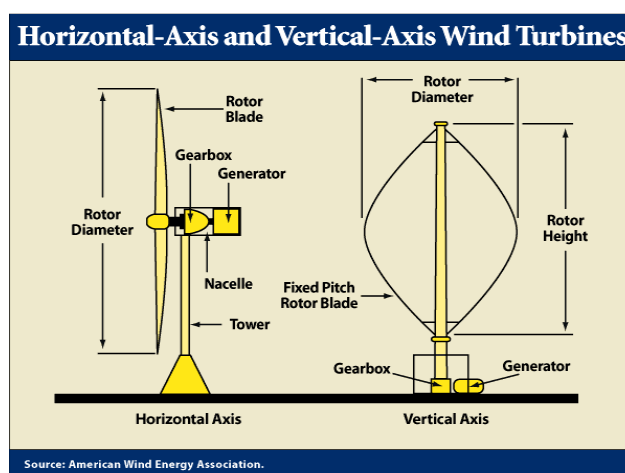
Τέλος, περιβαλλοντικά ζητήματα μπορούν να προκύψουν, όπως μπορεί να είναι για παράδειγμα η παραγωγή θορύβου αλλά και αισθητικά ζητήματα από την παρουσία των μονάδων σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Πολλές φορές μπορούν να υπάρξουν προβλήματα σε σχέση με τοπικούς παράγοντες, από τους οποίους μπορεί να εμφανιστούν αντιδράσεις που θα δυσχεράνουν, θα καθυστερήσουν ή ακόμα και θα ματαιώσουν την τοποθέτηση εγκαταστάσεων παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Βεβαίως, τα προβλήματα που ενδέχεται να προκύψουν από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από διεσπαρμένες πηγές πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη και σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να αγνοηθούν. Ωστόσο, τα οφέλη που προκύπτουν από την παραγωγή ενέργειας από διεσπαρμένες πηγές όπως τα φωτοβολταϊκά, οι ανεμογεννήτριες και άλλες, είναι σαφώς τεράστια. Γι αυτό έχει γίνει πλέον παγκοσμίως επιτακτική η ανάγκη για απεξάρτηση από τους παραδοσιακούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η Αιολική Ενέργεια αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη συνιστώσα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μεγάλης ισχύος καθώς παρατηρείται μια συνεχής βελτίωση της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, και επιπλέον, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια σε τιμές συγκρίσιμες με αυτές των συμβατικών μονάδων και σε μεγάλες σχετικά ισχύεις.

1.3 Θεμελιώδεις έννοιες Αιολικών Συστημάτων

Ένα σύστημα αιολικής ενέργειας μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ή ηλεκτρική με χρήσεις σε μια πληθώρα εφαρμογών, όπως φόρτιση μπαταριών, άντληση νερού σε απομακρυσμένες περιοχές ή ως υβριδικό σύστημα παροχής ηλεκτρισμού σε απομακρυσμένα νησιά ή χωριά χωρίς παροχή ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα συστήματα αιολικής ενέργειας γενικά μπορούν να διαχωριστούν σε δύο τύπους ανάλογα με τον τρόπο περιστροφής του άξονα της τουρμπίνας. Στον πρώτο τύπο ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους, ενώ στον δεύτερο τύπο ο άξονας περιστροφής είναι οριζόντιος. Τα πιο δεδομένα συστήματα είναι εκείνα στα οποία ο άξονας περιστρέφεται οριζόντια και καταλαμβάνουν ποσοστό 95% των διαθέσιμων συστημάτων αιολικής ενέργειας. Οι δύο τύποι συστημάτων (Ανεμογεννήτριες) που περιγράφηκαν φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, στο οποίο φαίνονται και τα υποσυστήματα που τα απαρτίζουν:



Σχήμα 1.5 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου & Κατακόρυφου άξονα

Η σημερινή τεχνολογία βασίζεται σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, 2 ή 3 πτερυγίων, με αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ 200-400 kW. Μια συστοιχία ανεμογεννητριών, λοιπόν, απαρτίζει ένα αιολικό πάρκο.

Ο υπολογισμός της παραγόμενης από ένα αιολικό πάρκο ισχύος βασίζεται στην παρακάτω στατική σχέση, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η μετατροπή της αεροδυναμικής ισχύος του προσπίπτοντος ανέμου σε μηχανική από το δρομέα της Α/Γ:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_R \cdot V_w^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (1.1)$$

όπου:

P_w	Μηχανική ισχύς του δρομέα [W]
ρ	Πυκνότητα του αέρα [kg/m ³]
V_w	Ταχύτητα ανέμου [m/s ²]
C_p	Αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος του δρομέα
$A = \pi R^2$	Επιφάνεια δίσκου του δρομέα ακτίνας R [m ²]

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη μετατροπής της αεροδυναμικής ισχύος του ανέμου

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει όταν η ροή του ανέμου είναι σταθερή, κατάσταση η οποία δεν υφίσταται στην πράξη. Οι απότομες μεταβολές του ανέμου είναι δυνατό να παράσχουν ισχύ κατά πολύ μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη θεωρητικά υπολογιζόμενη, εξαιτίας των αεροδυναμικών φαινομένων. Πιο συγκεκριμένα, η στατική αυτή σχέση δεν εκφράζει την εμφάνιση των ανώτερων αρμονικών στην αεροδυναμική ροπή που οφείλονται στην μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος (wind shear) και το φαινόμενο σκίασης του πύργου (tower shadow) . Οι ταλαντώσεις αυτές της αεροδυναμικής ροπής είναι θεμελιώδους συχνότητας $n \cdot f_r$, όπου n ο αριθμός των πτερυγίων (συνήθως είναι τρία) και f_r η συχνότητα περιστροφής του δρομέα.

Ωστόσο, στην παρούσα εργασία, όπου χρειαστεί, θα χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη εξίσωση καθώς τα φαινόμενα αυτά δεν αποτελούν αντικείμενο της εργασίας.

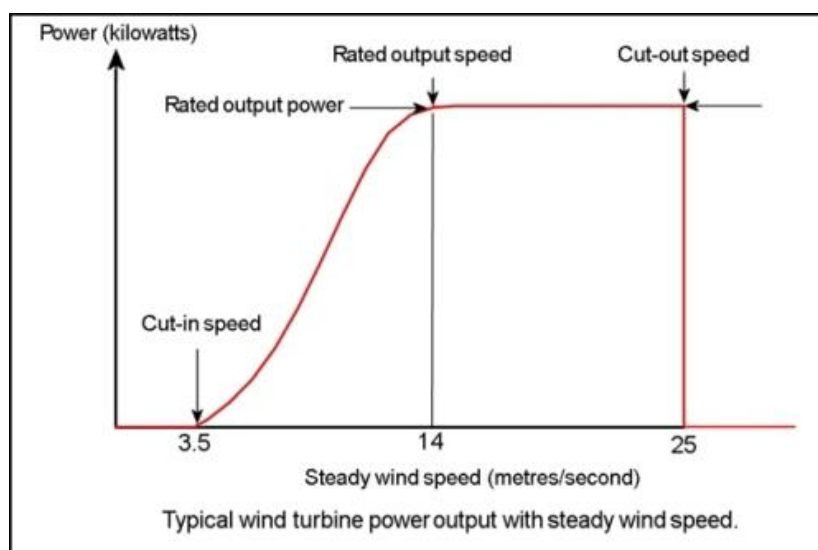
Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p εξαρτάται από δύο παράγοντες, δηλαδή είναι μια συνάρτηση της μορφής: $C_p = C_p(\lambda, \beta)$

Ο παράγοντας β που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του αεροδυναμικού συντελεστή είναι η τιμή της γωνίας του βήματος της έλικας των πτερυγίων, και λ είναι ο λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου (tip speed ratio) προς την ταχύτητα του ανέμου και ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_R}{V_w} \quad (1.2)$$

όπου ω_R : είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της έλικας (rad/sec).

Πρακτικά, η παραγόμενη ισχύς των Αιολικών Πάρκων προκύπτει μέσω της καμπύλης ισχύος – ταχύτητας ανέμου των Α/Γ που τα απαρτίζουν, η οποία έχει την εξής μορφή:



Σχήμα 1.6 Καμπύλη ισχύος-ταχύτητας ανέμου

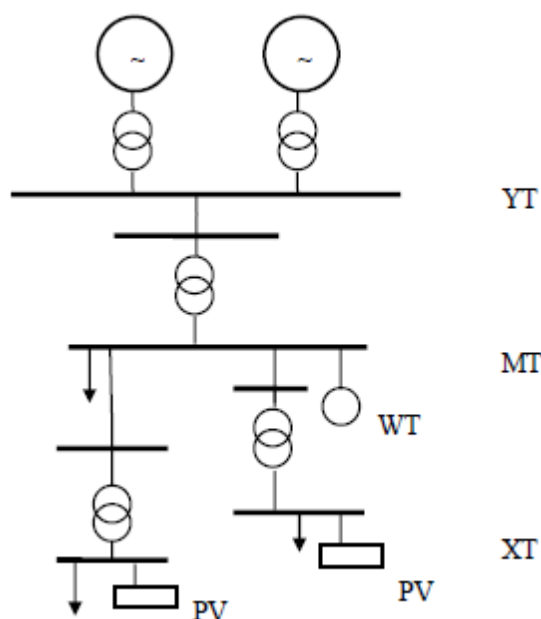
Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί την τιμή ταχύτητα έναρξης (Cut-in speed) η ανεμογεννήτρια μπορεί να αναπτύξει ισχύ η οποία υπερβαίνει τις μηχανικές της απώλειες (τριβές κ.λπ) και τίθεται σε λειτουργία. Για τιμή της ταχύτητας $V_{\text{ανέμου}} > \text{Cut-in speed}$ η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται μέχρι $V_{\text{ανέμου}} = \text{Rated output speed}$ για την οποία η Α/Γ

παράγει την ονομαστική της ισχύ. Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την τιμή ονομαστική ταχύτητα η παραγόμενη ισχύς πρέπει να μην αυξηθεί γιατί αλλιώς θα προκληθεί υπερφόρτιση των επί μέρους στοιχείων της Α/Γ (π.χ. του πολλαπλασιαστή στροφών της γεννήτριας). Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα να αποφεύγεται η φόρτιση της Α/Γ πέρα από τα όρια για τα οποία έχει σχεδιαστεί. Τέλος, για $V_{\text{ανέμου}} \geq \text{Cut-out Speed}$ (ταχύτητα αποκοπής) η λειτουργία της Α/Γ διακόπτεται για να αποφευχθεί υπέρβαση των ορίων αντοχής της σε μηχανικές καταπονήσεις.

1.4 Σύνδεση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα Σ.Η.Ε

Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι δεν είναι τοποθετημένες σε ένα συγκεκριμένο κεντρικό σημείο αλλά βρίσκονται διασκορπισμένες στο σύστημα. Συνήθως τοποθετούνται στο δίκτυο διανομής, ενώ κατά κανόνα οι δυνατότητες παραγωγής τους είναι μικρότερες από 50-100 MW.

Ένα τυπικό Σύστημα Ηλεκτρικής ενέργειας με παρουσία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (συγκεκριμένα υπάρχουν 2 μονάδες με φωτοβολταϊκά και ένα Αιολικό πάρκο) φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 1.7 Σ.Η.Ε με Διεσπαρμένη Παραγωγή

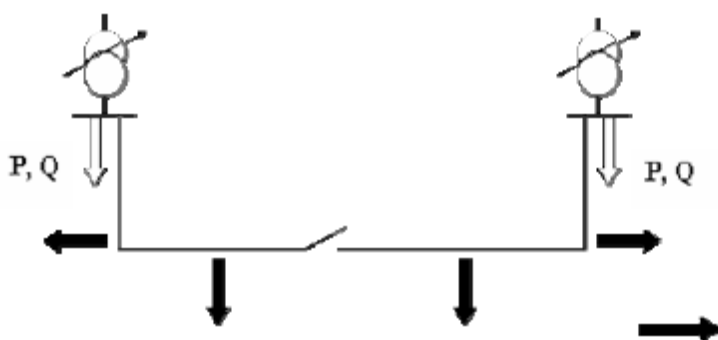
1.4.1 Επίδραση ένταξης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα Σ.Η.Ε

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει κεντρική παραγωγή που τροφοδοτεί με ισχύ τους καταναλωτές. Έτσι, η ροή της ισχύος γινόταν από την υψηλή προς τη χαμηλή τάση.

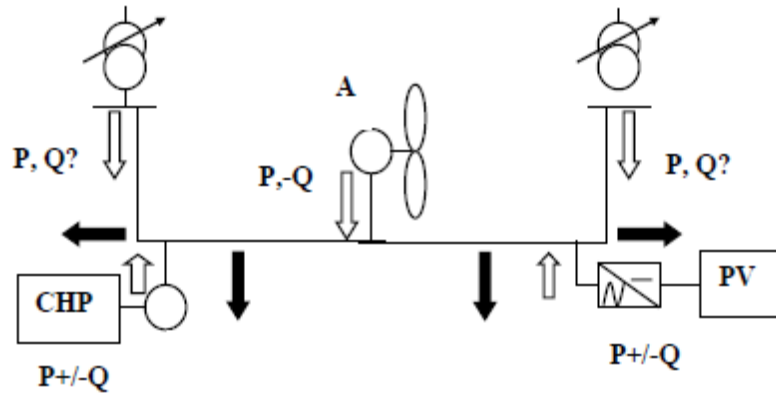
Με τη διείσδυση όμως της διεσπαρμένης παραγωγής στη διαδικασία παραγωγής, η ροή της ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να αντιστραφεί, αν η διείσδυση αυτή είναι αρκετά σημαντική. Μπορεί πλέον σε κάποιες περιπτώσεις να έχουμε αντίστροφη πορεία του ρεύματος, αν υπερκαλύπτεται το φορτίο ενός ζυγού από την παραγωγή της διεσπαρμένης μονάδας που βρίσκεται στο συγκεκριμένο ζυγό.

Έτσι, οι τάσεις και οι ροές ισχύος μεταβάλλονται και καθορίζονται πλέον από τις μονάδες παραγωγής που υπάρχουν διεσπαρμένες στο δίκτυο και τα φορτία. Ο συντελεστής ισχύος με τον οποίο μπορεί να λειτουργήσουν οι μονάδες αυτές μεταβάλλει τις τάσεις στο δίκτυο, ενώ μπορεί να υπάρξουν και αρμονικές συνιστώσες στο ρεύμα από την παρουσία ηλεκτρονικών ισχύος.

Αυτές οι μεταβολές έχουν πολύ σημαντικές επιπτώσεις στα χαρακτηριστικά του δικτύου. Η μεταβολή της ροής της ισχύος εξαιτίας της παρουσίας μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 1.8 Συμβατικό Σύστημα Διανομής



Σχήμα 1.9 Σύστημα Διανομής με συμμετοχή μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Ήδη η εγκατάσταση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέσης τάσης (MT) και χαμηλής τάσης (XT) αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς σε διάφορες χώρες της Ευρώπης, στις ΗΠΑ, Ιαπωνία με κάποιες χώρες όπως η Δανία να έχει πολύ σημαντικό ποσοστό της εγκατεστημένης της ισχύος με τη μορφή διεσπαρμένων αιολικών πάρκων και μονάδων ΣΗΘ.

Ενώ λοιπόν αυξάνεται η διείσδυση Διεσπαρμένης παραγωγής στα σύγχρονα δίκτυα διανομής συμβάλλοντας σημαντικά στην αποφυγή νέων εγκαταστάσεων μεταφοράς και διανομής, η αντιμετώπισή του ελέγχου στα παθητικά δίκτυα, που στόχο είχαν τη μεταφορά της ισχύος από την κεντρική παραγωγή στους καταναλωτές, δεν μπορεί να είναι σύμφωνα με τη λογική «συνδέομαι και το ξεχνάω» (“fit and forget”).

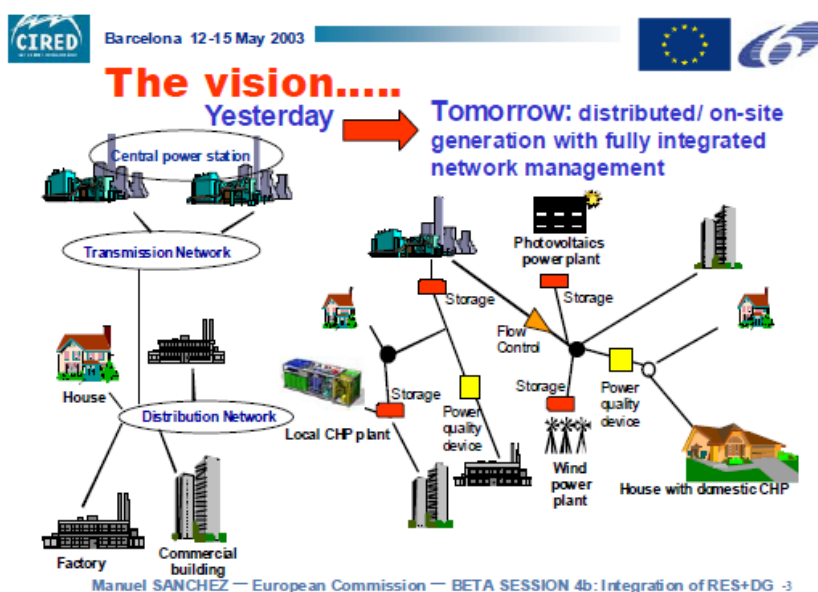
Επιπλέον δεν μπορεί πλέον η διεσπαρμένη παραγωγή να θεωρηθεί ως «αρνητικό» φορτίο και απλός εξοικονομητής καυσίμου. Αυτού του είδους η αντιμετώπιση ήδη έχει επιφέρει σημαντικό «πονοκέφαλο» στους διαχειριστές των δικτύων μεταφοράς για παράδειγμα στη Δανία, όπου η διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής ΣΗΘ και αιολικής ενέργειας της τάξης του 40% δημιουργεί λειτουργικά προβλήματα, επιβαρύνει τις αγορές εξισορρόπησης (Balancing markets) και οδηγεί σε ανάσχεση της περαιτέρω εγκατάστασης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Τα προβλήματα αυτά επιτείνονται και από την ιδιαιτερότητα του ελέγχου πηγών χωρίς αδράνεια με τη σύνδεση ηλεκτρονικών ισχύος.

Από την άλλη οι καταναλωτές ζητούν μεγαλύτερη αξιοπιστία και καλύτερη ποιότητα ισχύος η οποία είναι συχνά δύσκολο να επιτευχθεί με την παρούσα διάταξη των δικτύων

μεταφοράς και διανομής, αλλά και την ανεξέλεγκτη εγκατάσταση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Επομένως η αυξανόμενη εγκατάσταση διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα Μέσης και Χαμηλής Τάσης αποτελεί ήδη μία ερευνητική πρόκληση ώστε όλο το δίκτυο από τη Χ.Τ μέχρι και την Υψηλή Τάση (επίπεδο Μεταφοράς) να μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά με ασφάλεια και με διαφορετικά επίπεδα αξιοπιστίας.

Για να αμβλυνθούν τα προβλήματα και να επιτευχθούν ολοένα και περισσότερα οφέλη για τα ΣΗΕ από τη σύνδεση της Διεσπαρμένης παραγωγής απαιτούνται ευέλικτες δομές και πρωτότυπες τεχνικές ελέγχου, εκμεταλλευόμενες τις δυνατότητες που παρέχονται από τις μεθόδους διασύνδεσης των μικροπηγών.

Η αρμονική συνεργασία κεντρικής και διεσπαρμένης παραγωγής σε μορφή ολοκληρωμένης διαχείρισης είναι αντικείμενο της ερευνητικής πλατφόρμας SmartGrids (Ευφυή Δίκτυα) της ευρωπαϊκής επιτροπής της οποίας το όραμα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.10 Όραμα Ε.Π για τα μελλοντικά Δίκτυα

1.4.2 Επίδραση της διείσδυσης Αιολικής παραγωγής στη διαχείριση των Σ.Η.Ε

Στην προηγούμενη παράγραφο εξετάστηκαν οι επιπτώσεις της ένταξης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Στην παρούσα παράγραφο δίνεται έμφαση στις επιπτώσεις της Διείσδυσης αιολικής ενέργειας σε ένα Σ.Η.Ε με έμφαση στο πρόβλημα της Στοχαστικής Παραγωγής και τα προβλήματα ποιότητας ισχύος.

1.4.2.1 Μεταβλητότητα Αιολικής ισχύος

Δύο σημαντικά ζητήματα σχετικά με την αιολική παραγωγή είναι η μεταβλητότητα και η προβλεψιμότητα. Η μεταβλητότητα της ισχύος εξόδου μιας μόνο Α/Γ είναι μικρή σε κλίμακα χρόνου μερικών λεπτών και, για αιολικά πάρκα κατά μήκος μιας μεγάλης περιοχής, είναι μικρή σε κλίμακα χρόνου μερικών ωρών. Πληροφόρηση υψηλού επιπέδου επιτρέπει στους διαχειριστές του συστήματος να καθορίζουν το βαθμό εφεδρείας. Οι τεχνικές πρόβλεψης του ανέμου είναι προς το παρόν σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης, και κάθε βελτίωση εδώ μπορεί να βοηθήσει σημαντικά τους διαχειριστές να ελέγχουν την αιολική παραγωγή με τη μείωση και τον καθορισμό με ακρίβεια του σφάλματος πρόβλεψης.

Είναι επίσης πιθανό σε μία μικρή χώρα όπως Ελλάδα να μεταβληθεί σε αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα ο άνεμος και έτσι η ισχύς που θα παρείχαν τα αιολικά πάρκα να πρέπει να παραχθεί από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Αυτό το ζήτημα είναι κυρίως μετεωρολογικό.

Έκτος όμως από το πρόβλημα της αβεβαιότητας της αιολικής παραγωγής υπάρχει και το πρόβλημα που θα διοχετευτεί πιθανή περίσσεια ενέργειας. Για αυτό το λόγο χρειάζονται ισχυρές διασυνδέσεις με γειτονικές χώρες έτσι ώστε και να μπορεί να διοχετευτεί η περίσσεια ενέργειας, αλλά και να είναι ικανές να σταθεροποιήσουν το σύστημα σε ξαφνικές διακυμάνσεις της παραγωγής, οι οποίες θα είναι ολοένα και πιο πιθανές όσο η αιολική διείσδυση αυξάνει.

Έχει προταθεί ότι θέματα ευστάθειας του συστήματος μπορούν να αναγερθούν αν η αιολική παραγωγή ξεπεράσει κάποιο όριο διείσδυσης. Τέτοιες ανησυχίες πρέπει να λάβουν υπ' όψιν τους τα πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένου της τοπικής ενίσχυσης του δικτύου και της δυνατότητας των Α/Γ μεταβλητών στροφών να συμβάλλουν στην ευστάθεια

του συστήματος. Για την εξασφάλιση της ισορροπίας στο σύστημα έτσι ώστε να μπορεί να δεχθεί τη μεταβαλλόμενη ισχύ εξόδου των Α/Π, είναι διαθέσιμες στους διαχειριστές των συστημάτων μια σειρά από τεχνικές. Σε μια κατάσταση όπου πολύς άνεμος είναι διαθέσιμος, για παράδειγμα, ο διαχειριστής μπορεί να διατηρεί άλλους τύπους σταθμών παραγωγής σε χαμηλά επίπεδα εξόδου. Άλλες λύσεις είναι πιθανόν να γίνουν εξαιρετικά σημαντικές καθώς η διείσδυση της αιολικής παραγωγής επεκτείνεται συνεχώς. Αυτές περιλαμβάνουν πρόβλεψη, διασυνδέσεις και αποθήκευση ηλεκτρισμού. Χρησιμοποιώντας τέτοιες τεχνικές, όπως επίσης και ενίσχυση του ίδιου του δικτύου, και αυξημένη γεωγραφική εξάπλωση της αιολικής ισχύος, είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί πολύ υψηλό επίπεδο διείσδυσης στα Ευρωπαϊκά ηλεκτρικά συστήματα χωρίς επίδραση στην ποιότητα της παροχής.

Από την άλλη μεριά οι ανεμογεννήτριες συνήθως είναι εξοπλισμένες με ασύγχρονες γεννήτριες οι οποίες ως γνωστόν διεγείρονται από το δίκτυο καταναλώνοντας άεργο ισχύ, και για το λόγο αυτό δεν συμβάλλουν στον έλεγχο των τάσεων του δικτύου. Το πρόβλημα συνήθως αντιμετωπίζεται με συσκευές αντιστάθμισης αέργου ισχύος, αν και τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί συστήματα ελέγχου του συντελεστή ισχύος των Α/Γ με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος.

Η καλή και ασφαλής λειτουργία των Σ.Η.Ε με διείσδυση Α/Π αφορά στην επίλυση προβλημάτων μόνιμης κατάστασης λειτουργίας (ικανότητα του δικτύου μεταφοράς να μεταφέρει την παραγόμενη ισχύ, διατήρηση των τάσεων των ζυγών του συστήματος σε κανονικές και έκτακτες καταστάσεις λειτουργίας εντός προκαθορισμένων ορίων κ.λ.π.) και μεταβατικής συμπεριφοράς του συστήματος σε περιπτώσεις σημαντικών διαταραχών.

Η ανάλυση των παραπάνω οδηγεί στη διατύπωση κανόνων λειτουργίας που εξασφαλίζουν την καλή και ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Οι κανόνες αυτοί επικεντρώνονται κυρίως στα εξής:

- Στον καθορισμό του τρόπου ένταξης των συμβατικών μονάδων παραγωγής, δηλαδή ποιες μονάδες θα πρέπει να βρίσκονται κάθε στιγμή εντός λειτουργίας προκειμένου να εξασφαλίζεται η ομαλή και ασφαλής λειτουργία του συστήματος .
- Στον καθορισμό της **Μέγιστης Επιτρεπόμενης Αιολικής Διείσδυσης**, στην μέγιστη δηλαδή παραγόμενη ισχύ από τα Α/Π που μπορεί ασφαλώς να απορροφηθεί από το δίκτυο κάθε χρονική στιγμή.

Οι δύο παραπάνω κανόνες οι οποίοι καθορίζουν τον ασφαλή τρόπο ένταξης των Α/Π στα ΣΗΕ καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το ποσοστό της ενέργειας από Α/Π που εγχέεται στα δίκτυα και άρα το ανά μονάδα κόστος της παραγόμενης από αυτά ενέργειας.

Στην επόμενη παράγραφο δίνεται μια σύντομη περιγραφή των προβλημάτων ισχύος που ενδέχεται να παρουσιαστούν κατά την ένταξη Αιολικών Πάρκων σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.

1.4.2.2 Ποιότητα Αιολικής Ισχύος

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες, παρουσιάζει συνήθως τα ακόλουθα προβλήματα ισχύος :

- διαταραχές πλάτους τάσης σταθερής κατάστασης (steady state voltage level)
- διακυμάνσεις τάσης (voltage variations or fluctuations)
- μεταβατικά φαινόμενα (transients)
- αρμονικές (harmonics)
- διακυμάνσεις βασικής συχνότητας (power frequency variations).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ο τρόπος με τον οποίο τα ανωτέρω προβλήματα ισχύος προκαλούνται από τις ανεμογεννήτριες, η έντασή τους και οι πιθανές τους συνέπειες στην ομαλή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

➤ Διαταραχές Πλάτους σταθερής κατάστασης

Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από αιολικά πάρκα μπορεί να επηρεάσει το πλάτος τάσης σταθερής κατάστασης. Η επίδραση εξαρτάται από το πόσο ισχυρό είναι το ηλεκτρικό δίκτυο και τη συνολική παραγωγή αιολικής ισχύος. Σε ένα ασθενές δίκτυο, μεγάλη διείσδυση αιολικής ισχύος μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση του πλάτους της τάσης έξω από τα επιτρεπτά όρια. Τούτο αυτομάτως θέτει ένα περιορισμό στη μέγιστη αιολική διείσδυση.

Η αιτία αλλαγής του πλάτους τάσης σταθερής κατάστασης είναι η μακροχρόνια αλλαγή της μέσης ταχύτητας του ανέμου, σε κλίμακα χρόνου μερικών λεπτών. Το πλάτος τάσης, ως

συνάρτηση της παραγόμενης ενεργού και άεργου ισχύος, μπορεί να οριστεί προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$V = R \frac{P}{V} - X \frac{Q}{V_n} + V_n \quad (1.3)$$

όπου:

V_n : Ονομαστικό πλάτος τάσης δικτύου

V : Πλάτος τάσης στο σημείο σύνδεσης του Αιολικού Πάρκου

P : Παραγόμενη ενεργή ισχύς

Q : Καταναλισκόμενη άεργος ισχύς

R : Αντίσταση Δικτύου

X : Άεργη αντίσταση δικτύου (επαγωγική ή χωρητική)

Η επίδραση στο πλάτος τάσης σταθερής κατάστασης ανεμογεννητριών με γεννήτριες επαγωγής απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο (σταθερών στροφών) εξαρτάται, σε μικρό βαθμό, από τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας και, κυρίως, από το λόγο X/R του δικτύου. Δίκτυα με τιμή του λόγου αυτού από 2 έως 3 συνήθως δεν είναι επιρρεπή από τις ανεμογεννήτριες, όσον αφορά στη μεταβολή του πλάτους τάσης σταθερής κατάστασης. Τούτο ισχύει με την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι εφοδιασμένο με τους κατάλληλους πυκνωτές για την κάλυψη των αναγκών σε άεργη ισχύ της επαγωγικής γεννήτριας των ανεμογεννητριών.

Ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν μετασχηματιστές με ηλεκτρονικά ισχύος παρέχουν αυτόματο έλεγχο άεργου ισχύος. Θεωρητικά μπορούν να ελέγξουν την παραγωγή τους βάσει οποιουδήποτε κριτηρίου, όπως, για παράδειγμα, να διατηρήσουν το συντελεστή ισχύος κοντά στη μονάδα, ή να ελέγξουν το πλάτος τάσης στην έξοδο της ανεμογεννήτριας.

➤ Διακυμάνσεις τάσης

Μία ανεμογεννήτρια παράγει, γενικά, ισχύ που μεταβάλλεται, εξαρτώμενη από την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης και λειτουργίας της. Αυτή η μεταβαλλόμενη ηλεκτρική ισχύς μπορεί να προκαλέσει διακυμάνσεις τάσης συχνότητας 0,01 – 10 Hz . Οι διακυμάνσεις της παραγόμενης ενεργού ισχύος είναι πιο ήπιες στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.

Η επίδραση των διακυμάνσεων τάσης σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο μετράται με βάση την ένταση του προκαλούμενου flicker φωτισμού. Μετρήσεις έχουν δείξει ότι η εφαρμογή αυστηρών περιορισμών σχετικά με το προκαλούμενο flicker, μπορεί να αποτελέσει αιτία για περιορισμό της διείσδυσης αιολικής ισχύος, όταν χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών.

Η χρήση μετασχηματιστών με ηλεκτρονικά ισχύος στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών παρέχει δυνατότητα μείωσης των διακυμάνσεων τάσης. Στις περιπτώσεις αυτές, ακόμα και αυστηροί περιορισμοί στις εκπομπές flicker δεν είναι δυνατό να αποτελέσουν αιτία απόρριψης αιολικής ισχύος. Πάντως, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών, μπορούν να παράγουν στη χείριστη των περιπτώσεων flicker έντασης περίπου 50% μεγαλύτερης από τις αντίστοιχες μηχανές μεταβλητών στροφών. Ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις, το προκαλούμενο flicker δεν είναι ορατό και δεν αποτελεί λόγο απόρριψης αιολικής ισχύος.

➤ **Μεταβατικά φαινόμενα**

Δύο ήδη μεταβατικών φαινομένων προκαλούνται από τη λειτουργία ανεμογεννητριών σε ασθενή δίκτυα. Το πρώτο αναφέρεται στην προκαλούμενη πτώση τάσης (voltage sag) κατά την εκκίνηση μιας ανεμογεννήτριας. Η πτώση τάσης οφείλεται στα ρεύματα υψηλής εντάσεως που καταναλώνει η γεννήτρια κατά την εκκίνησή της. Το δεύτερο αναφέρεται στις διαδικασίες ηλέκτρισης – αποφόρτισης πυκνωτών. Η ηλέκτριση ή η αποφόρτιση πυκνωτών συνοδεύονται από ρεύματα υψηλών συχνοτήτων, τα οποία προκαλούν μεταβατικό φαινόμενο τάσης στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Η πρόκληση μεταβατικών φαινομένων από ανεμογεννήτριες δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως σημαντικό πρόβλημα ισχύος, παρά μόνο αν ευαίσθητος ηλεκτρικός εξοπλισμός είναι συνδεδεμένος στο ίδιο δίκτυο χαμηλής τάσης με την ανεμογεννήτρια από την οποία προέρχεται το μεταβατικό φαινόμενο.

➤ **Αρμονικές**

Ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν μετασχηματιστές με ηλεκτρονικά ισχύος παράγουν αρμονικές και ενδιάμεσες αρμονικές υψηλής τάξης. Η προκαλούμενη παραμόρφωση της κυματομορφής τάσης είναι τόσο εντονότερη, όσο πιο ασθενές είναι το ηλεκτρικό δίκτυο.

Επομένως, προκειμένου να ενταχθούν σε ένα ασθενές δίκτυο ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με μετασχηματιστές με ηλεκτρονικά ισχύος, θα πρέπει να ελεγχθούν οι εκπεμπόμενες αρμονικές στο δίκτυο. Συμβατότητα με τους περιορισμούς του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση φίλτρων.

Ένα κοινό συμπέρασμα σχετικών εργασιών είναι ότι οι αρμονικές που προκαλούνται από τις ανεμογεννήτριες είναι κάτω από τα επιτρεπτά όρια και δεν αποτελούν λόγω απόρριψης αιολικής ισχύος.

➤ **Διακυμάνσεις συχνότητας**

Η εισαγωγή ενός σχετικά μικρού ποσοστού αιολικής ισχύος σε ένα σύστημα παραγωγής, δεν επηρεάζει τη συχνότητα του συστήματος, καθώς οι εισερχόμενες διαταραχές συχνότητας από τα αιολικά πάρκα, λόγω μεταβλητότητας του ανέμου, είναι μικρές και αντισταθμίζονται εύκολα από τις θερμοηλεκτρικές μηχανές του συστήματος. Ωστόσο, η εισαγωγή μεγάλου σχετικά ποσοστού αιολικής ισχύος σε ένα σύστημα, μπορεί να είναι πολύ σημαντική όσον αφορά τη σταθερότητα της συχνότητας, ιδιαίτερα αν οι εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες είναι σταθερών στροφών .

Η συχνότητα του συστήματος ρυθμίζεται κλασσικά από τις θερμοηλεκτρικές μηχανές. Πάντως, οι νέες ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών παρουσιάζουν πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά σχετικά με τη συχνότητα του συστήματος.

2

Αβεβαιότητα των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας & Θεωρία Τυχαίων Μεταβλητών

2.1 Στοχαστική Συμπεριφορά Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Πριν την ένταξη των Α.Π.Ε στη διαδικασία παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, η στοχαστική-πιθανοτική θεώρηση της συμπεριφοράς ενός Σ.Η.Ε σχετιζόταν με:

- Τη λειτουργία των μονάδων παραγωγής (βλάβες,επισκευές)
- Την αβεβαιότητα πρόβλεψης της ζήτησης φορτίου (ωριαία διακύμανση)

Πλέον,η αβεβαιότητα των Σ.Η.Ε έχει αυξηθεί λόγω της συμμετοχής μονάδων μη συμβατικής παραγωγής. Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκαν κάποιες από τις πλέον διαδεδομένες τεχνολογίες μη συμβατικής παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Με εξαίρεση τη βιομάζα, τη γεωθερμική ενέργεια, τις μικροτουρμπίνες και τις κυψέλες καυσίμου, οι υπόλοιπες μορφές που αναφέρθηκαν είναι μη-ελεγχόμενες, κάτι το οποίο συνεπάγεται στοχαστικότητα όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια που θα παραχθεί κάνοντας χρήση των συγκεκριμένων πηγών-τεχνολογιών.

Η παραγόμενη ενέργεια από τέτοιου τύπου μονάδες παρουσιάζει τυχαίες μεταβολές κάτι το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι οι «πηγές» τις οποίες χρησιμοποιούν δεν μπορούν να ελεγχούν έτσι ώστε να ρυθμιστεί το ποσό ενέργειας που εν τέλει θα προκύψει.

Η στοχαστική παραγωγή έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή κάποιου βαθμού αβεβαιότητας στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας στο οποίο έχουν ενταχθεί οι στοχαστικές μονάδες παραγωγής. Γι αυτό το λόγο η μελέτη ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί διαφορετική αντιμετώπιση από,τι ένα σύστημα αποτελούμενο από ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής.

Συνεπώς, για την ασφαλέστερη διαχείριση ενός Σ.Η.Ε με έντονα στοιχεία αβεβαιότητας είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση των μεταβλητών που παρουσιάζουν στοχαστική συμπεριφορά.

2.1.1 Αβεβαιότητα Φορτίου

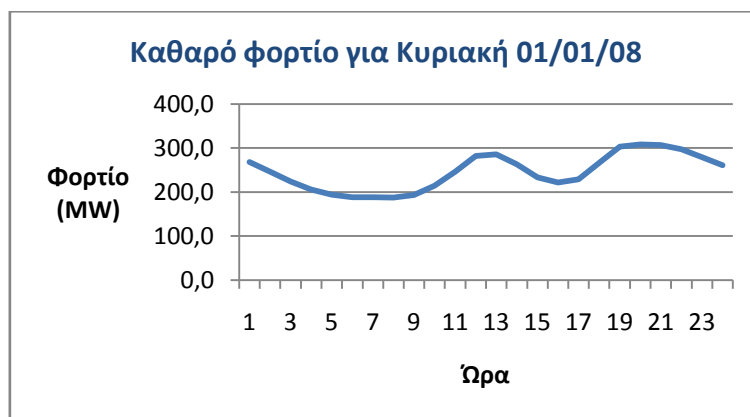
Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας το φορτίο χαρακτηρίζεται από στοχαστικότητα, κάτι το οποίο στην πράξη συνεπάγεται συνεχείς τυχαίες μεταβολές στις τιμές του. Η στοχαστικότητα του φορτίου θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως «χρονική στοχαστικότητα» καθώς οι μεταβολές που παρατηρούνται σχετίζονται άμεσα με παράγοντες όπως η εποχή του χρόνου, ο μήνας, η ημέρα, ακόμα και η ώρα της ημέρας στην οποία μετράται το φορτίο.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες, βέβαια, συνδέονται με την ανθρώπινη δραστηριότητα και πιο συγκεκριμένα με εκείνες τις ανθρώπινες δραστηριότητες που επηρεάζουν την κατανάλωση φορτίου.

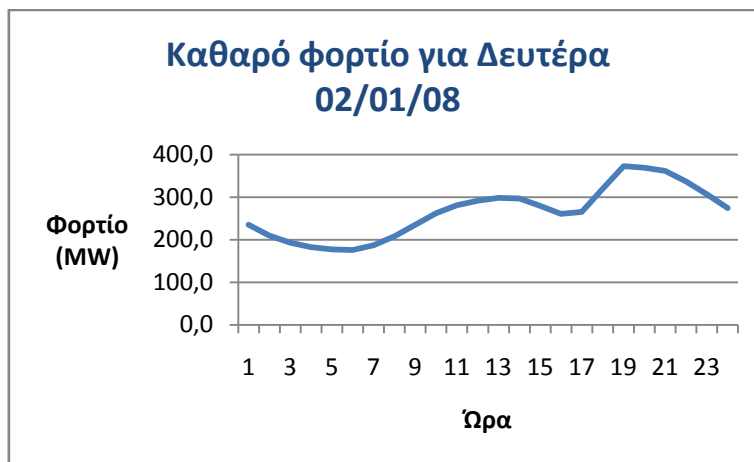
Εφόσον, λοιπόν, το φορτίο καθορίζεται από τη δραστηριότητα των καταναλωτών, είναι επόμενο οι τιμές που λαμβάνει να παρουσιάζουν μια σχετική περιοδικότητα. Η υπόθεση αυτή ισχύει βέβαια σε περίπτωση που και οι δραστηριότητες των καταναλωτών είναι επίσης περιοδικές, κάτι που σε μεγάλο βαθμό ισχύει.

Τα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζουν τα καθαρά μέσα ωριαία φορτία (συνολικά) για το σύστημα της Κρήτης για 3 μέρες του Ιανουαρίου κατά το έτος 2008. Οι ημέρες που επιλέχθηκαν είναι μια μη εργάσιμη (Κυριακή) και δύο εργάσιμες (Δευτέρα και Τρίτη).

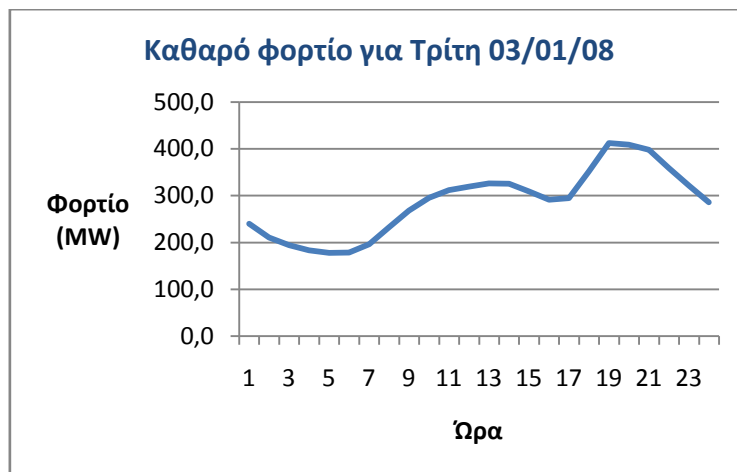
Από τη σύγκριση των παρακάτω διαγραμμάτων προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την περιοδικότητα εμφάνισης κάποιων τιμών του συνολικού φορτίου του συστήματος και τις μεταβολές του φορτίου από ώρα σε ώρα για κάθε τύπο ημέρας (εργάσιμη-μη εργάσιμη).



Σχήμα 2.1 Μεταβολή συνολικού φορτίου Κρήτης – 01/01/08



Σχήμα 2.2 Μεταβολή συνολικού φορτίου Κρήτης – 02/01/08



Σχήμα 2.3 Μεταβολή συνολικού φορτίου Κρήτης – 03/01/08

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανής η περιοδικότητα του φορτίου όσον αφορά τις ώρες της ημέρας. Συγκεκριμένα, εμφανίζουν περιοδικότητα οι μεταβολές των τιμών του φορτίου κατά τη διάρκεια των 3 ημερών.

Ωστόσο, ενώ μεταξύ των ημερών Δευτέρας και Τρίτης οι μεταβολές είναι παρεμφερείς, παρατηρώντας τις αντίστοιχες τιμές για την Κυριακή παρατηρούνται κάποιες διαφοροποιήσεις.

Για παράδειγμα, τις πρώτες πρωινές ώρες (01.00 έως 06.00) η τιμή του φορτίου μειώνεται συνεχώς κατά τις εργάσιμες μέρες και η αύξηση του φορτίου ξεκινάει στις 06.30 περίπου.

Αντιθέτως, κατά την Κυριακή, η οποία είναι μη εργάσιμη ημέρα, η αύξηση του φορτίου ξεκινάει αργότερα και συγκεκριμένα στις 09.30 περίπου. Επίσης, είναι προφανές ότι την Κυριακή οι τιμές του φορτίου κατά τη διάρκεια της ημέρας κινούνται σε χαμηλότερα επίπεδα από εκείνες των εργάσιμων ημερών.

Αυτή η περιοδικότητα που προαναφέρθηκε διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τη μοντελοποίηση της στοχαστικότητας του φορτίου. Σε περίπτωση που μελετάμε τις μεταβολές του φορτίου σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, η περιοδικότητα που παρατηρείται μας επιτρέπει να χωρίσουμε το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε επιμέρους υποδιαστήματα, στα οποία το φορτίο ακολουθεί μια κανονική κατανομή με συγκεκριμένες παραμέτρους.

Τα παραπάνω αποτελούν την αρχή-παραδοχή με την οποία πραγματοποιείται η μοντελοποίηση της στοχαστικότητας του φορτίου.

2.1.2 Αβεβαιότητα Παραγωγής

Όπως και στην περίπτωση του φορτίου έτσι και στην περίπτωση της παραγωγής, παρατηρούνται συνεχείς μεταβολές στις τιμές της. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις μεταβολές που παρατηρούνται στις τιμές του φορτίου, οι μεταβολές της παραγωγής δεν παρουσιάζουν περιοδικότητα. Είναι απολύτως στοχαστικές καθώς κάθε χρονική στιγμή η οποιαδήποτε αυξομείωση στην τιμή της παραγωγής είναι πιθανή.

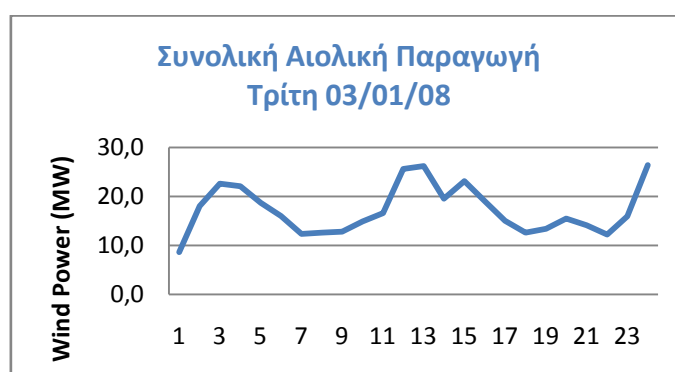
Για παράδειγμα, η συνολική Αιολική παραγωγή της Κρήτης για τις ίδιες μέρες για τις οποίες μελετήθηκε το φορτίου παρουσιάζει τις εξής μεταβολές:



Σχήμα 2.4 Μεταβολή της συνολικής Αιολικής παραγωγής της Κρήτης – 01/01/08



Σχήμα 2.5 Μεταβολή της συνολικής Αιολικής παραγωγής της Κρήτης – 02/01/08



Σχήμα 2.6 Μεταβολή της συνολικής Αιολικής παραγωγής της Κρήτης – 03/01/08

Από τα παραπάνω διαγράμματα μεταβολών είναι εμφανές ότι δεν παρατηρείται καμία χρονική περιοδικότητα.

Εφόσον, λοιπόν, δεν παρατηρείται χρονική εξάρτηση της παραγωγής, η μοντελοποίηση της στοχαστικότητάς της δεν μπορεί να βασιστεί εκεί. Κι επομένως η κανονική κατανομή για συγκεκριμένα υποδιαστήματα είναι αδύνατον να εφαρμοστεί στην περίπτωση της παραγωγής.

Η αβεβαιότητα της παραγωγής έχει γίνει ακόμη πιο έντονη τα τελευταία χρόνια καθώς έχει αυξηθεί η συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η παραγωγή αυτού του είδους εξαρτάται από πηγές όπως ο άνεμος και ο ήλιος, δηλαδή μη ελεγχόμενες πηγές. Αυτό φάνηκε, άλλωστε, από τις συνεχείς τυχαίες μεταβολές των Αιολικών παραγωγών που μελετήθηκαν παραπάνω.

Η «πηγή» για την παραγωγή μιας ανεμογεννήτριας είναι η ταχύτητα του ανέμου, η οποία, όμως, παρουσιάζει έντονη στοχαστικότητα. Για το λόγο αυτό, οι τιμές της παραγωγής αυξομειώνονται με τυχαίο τρόπο ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην υπό μελέτη περιοχή.

2.1.2.1 Μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου

Για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής απαιτούνται αναλυτικά δεδομένα της κατανομής συχνοτήτων των διαφόρων ταχυτήτων του ανέμου και μάλιστα κατά διεύθυνση ώστε να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τις κύριες διευθύνσεις του ανέμου.

Επίσης, η μελέτη των διαδοχικών ημερών ή ωρών με νηνεμία ή χαμηλές ταχύτητες του ανέμου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί προσδιορίζουν την περίοδο όπου μια αιολική μηχανή βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

Για να καταλήξουμε σε ασφαλή αποτελέσματα για την εγκατάσταση μιας αιολικής μηχανής απαιτούνται μακροχρόνιες και αναλυτικές μετρήσεις. Ωστόσο, το κόστος των μετρήσεων και η αναπόφευκτη καθυστέρηση του έργου σε συνδυασμό με την συχνή έλλειψη μακροχρόνιων μετρήσεων στις περιοχές που ενδιαφερόμαστε οδηγούν στην χρήση ημιεμπειρικών μοντέλων.

Τα μοντέλα αυτά μπορούν να περιγράψουν το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής βάσει μικρού αριθμού παραμέτρων, ώστε να εκτιμηθεί η ενέργεια που μπορούμε να πάρουμε από τον άνεμο.

Για μακροπρόθεσμες μελέτες έχει αποδειχθεί ότι η κατανομή Weibull περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για ύψος μέχρι 100m από το έδαφος. Η συγκεκριμένη κατανομή εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$P(V)dV = \frac{k}{c} \left[\frac{V}{c} \right]^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} dV \quad (2.1)$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζει την πιθανότητα η ταχύτητα V να βρίσκεται στην περιοχή $V-dV/2$ και $V+dV/2$.

Η αναγωγή των τιμών της παραμέτρου c σε διάφορα ύψη μπορεί να γίνει με βάση το μοντέλο κατανομής του ανέμου το οποίο χρησιμοποιούμε για την συγκεκριμένη περιοχή της μελέτης και η μεταβολή της παραμέτρου k καθ' ύψος υπολογίζεται από νομόγραμμα το οποίο δίνει την μεταβολή της καθ' ύψος.

Για ένα Σ.Η.Ε που αποτελείται από μονάδες αιολικής παραγωγής σε διαφορετικές τοποθεσίες, όπου σε κάθε τοποθεσία οι κατανομές Weibull του ανέμου διαφέρουν ως προς τους συντελεστές k και c , μεταξύ των τιμών της ταχύτητας του ανέμου υπάρχουν μικρού ή μεγαλύτερου βαθμού συσχετίσεις. Αυτές οι συσχετίσεις υπολογίζονται με βάση τα δεδομένα που έχουν μετρηθεί και συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη του συστήματος για την αποφυγή σφαλμάτων που προκύπτουν αν αγνοηθούν.

2.1.2.2 Μοντελοποίηση παραγόμενης αιολικής ισχύος

Η αιολική ισχύς που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια και κατ'επέκταση από μια συστοιχία ανεμογεννητριών σε μια τοποθεσία προκύπτει ως μη γραμμικός μετασχηματισμός της κατανομής Weibull της ταχύτητας του ανέμου.

Σημαντικό ενδιαφέρον και χρησιμότητα παρουσιάζει η πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής αιολικής ισχύος, για την οποία έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι. Για την καλύτερη δυνατή διαχείριση ενός συστήματος με μεγάλη διείσδυση αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται εκτιμήσεις για την παραγωγή ισχύος για κάποιο αριθμό ωρών μπροστά.

Ωστόσο, πλέον, το ενδιαφέρον στρέφεται στην ανάπτυξη μεθόδων για τον καθορισμό των σφαλμάτων στην πρόβλεψη παραγωγής, κάτι το οποίο γίνεται με πιθανοτικές μεθόδους θεωρώντας διαφορετικές περιοχές μελέτης και διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης. Για τις παραπάνω περιπτώσεις, τα σφάλματα στην πρόβλεψη της παραγωγής δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους αλλά παρουσιάζουν συσχέτιση λόγω είτε της σταθερότητας των μετεωρολογικών συνθηκών είτε λόγω της μετατόπισης των μετεωρολογικών μετώπων.

Για την μοντελοποίηση της παραγωγής, οι μετρήσεις οργανώνονται σε «ωριαίες ομάδες» και για κάθε ομάδα μετρήσεων, η αβεβαιότητα της παραγωγής μοντελοποιείται ως

κανονική κατανομή με συγκεκριμένη τυπική απόκλιση από μια μέση τιμή. Σε πολλές μελέτες προκειμένου να τεθεί η αβεβαιότητα της παραγωγής σε κάποιο πλαίσιο, χρησιμοποιείται το μοντέλο της χρονικής εξάρτησης (time-dependent model), το οποίο ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις δε συμβάλλει στην απαλειφή της αβεβαιότητας καθώς η παραγωγή μπορεί να λάβει αυθαίρετες τιμές ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Αντιθέτως, το time-dependent μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια για την μοντελοποίηση του φορτίου. Αυτό γίνεται περισσότερο κατανοητό αν λάβουμε υπόψη ότι οι τιμές του φορτίου εξαρτώνται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες οι οποίες χαρακτηρίζονται από περιοδικότητα. Για παράδειγμα, οι τιμές του φορτίου για δύο διαφορετικές καθημερινές μέρες δεν παρουσιάζουν μεγάλη διαφοροποίηση ενώ για την παραγωγή ισχύος για αυτές τις 2 μέρες ενδέχεται να υπάρχει τεράστια διαφοροποίηση.

2.2 Αντιμετώπιση των φορτίων & των παραγωγών ενός Σ.Η.Ε ως τυχαίες μεταβλητές

Λαμβάνοντας υπόψη τη στοχαστική συμπεριφορά του φορτίου και της παραγωγής που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, γίνεται κατανοητή η ανάγκη ένταξης στοιχείων της πιθανοτικής θεωρίας στη μελέτη των νέου τύπου Σ.Η.Ε.

Πλέον, εκτός από τις κλασσικές έννοιες που περιλαμβάνει ένα τυπικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, στην περίπτωση της στοχαστικής αντιμετώπισης-μελέτης γίνεται πια αναγκαία η εισαγωγή εννοιών από την πιθανοτική θεωρία.

Τα μεγέθη ενός Σ.Η.Ε που παρουσιάζουν στοχαστική συμπεριφορά χαρακτηρίζονται ως τυχαίες μεταβλητές με συγκεκριμένες κατανομές ενώ απαραίτητο στοιχείο για την πλήρη μοντελοποίηση της στοχαστικής τους συμπεριφορά αποτελεί ο καθορισμός των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων.

2.2.1 Ορισμός τυχαίας μεταβλητής

Μια τυχαία μεταβλητή είναι μια συνάρτηση ορισμένη επί του δειγματικού χώρου. Μέσω αυτής της συνάρτησης, αντιστοιχίζουμε σε κάθε πιθανή έκβαση ω έναν αριθμό $X(\omega)$ βάσει ενός προκαθορισμένου κανόνα. Για λόγους απλοποίησης, στο συμβολισμό μιας τυχαίας

μεταβλητής παραλείπεται το σύμβολο ω και η τ.μ γράφεται απλώς X . Γενικώς, μια τυχαία μεταβλητή συμβολίζεται με κάποιο κεφαλαίο γράμμα και για την παράσταση των αριθμητικών τιμών της χρησιμοποιούνται μικρά γράμματα.

Κάθε τυχαία μεταβλητή χαρακτηρίζεται από μια συνάρτηση κατανομής, η οποία ορίζεται ως η πιθανότητα η τ.μ X να είναι μικρότερη από μια τιμή x , όπου x ένας πραγματικός αριθμός από $-\infty$ έως $+\infty$. Η συνάρτηση κατανομής δίνεται, συνεπώς, από τον τύπο:

$$F_X(x) = P(X \leq x) \quad (2.2)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η συνάρτηση κατανομής δεν είναι συνάρτηση της τυχαίας μεταβλητής αλλά συνδέεται με την τυχαία μεταβλητή. Το όρισμα της συνάρτησης είναι ο πραγματικός αριθμός x ενώ η τ.μ X είναι δείκτης της συνάρτησης προκειμένου να είναι σαφές σε ποια τυχαία μεταβλητή αναφέρεται η συνάρτηση κατανομής. Σε περίπτωση που δεν εμπλέκονται άλλες μεταβλητές, δεν υπάρχει δηλαδή θέμα παρανόησης, ο δείκτης μπορεί να παραληφθεί.

Οι βασικότερες ιδιότητες της συνάρτησης κατανομής είναι οι ακόλουθες:

1. $F(+\infty) = 1$ και $F(-\infty) = 0$
2. Εάν $x_1 < x_2$ τότε ισχύει: $F(x_1) \leq F(x_2)$
3. Εάν $F(x_0) = 0$ τότε $F(x) = 0$ για κάθε $x \leq x_0$
4. $P(X > x) = 1 - F(x)$
5. Η συνάρτηση $F(x)$ είναι συνεχής από δεξιά, δηλ. $F(x^+) = F(x)$
6. $P(x_1 < X \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1)$
7. $P(X = x) = F(x) - F(x^-)$
8. $P(x_1 \leq X \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1^-)$

Η συνάρτηση κατανομής συχνά αναφέρεται και ως Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής (Cumulative Density Function-CDF) ή ως πιθανότητα μη υπέρβασης.

Η παράγωγος της συνάρτησης κατανομής, δηλαδή η:

$$f_X(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2.3)$$

ονομάζεται συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function-PDF) της τυχαίας μεταβλητής X .

Στην περίπτωση των συνεχών τυχαίων μεταβλητών, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Σ.Π.Π) ορίζεται παντού, κάτι το οποίο δε συμβαίνει με τις διακριτές τυχαίες μεταβλητές.

Οι βασικότερες ιδιότητες της Σ.Π.Π είναι οι εξής:

1. $f_X(x) \geq 0$
2. $\int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx = 1$

Είναι προφανές ότι η Σ.Π.Π μπορεί να λάβει τιμές μεγαλύτερες τις μονάδας λόγω του ότι δεν παριστάνει πιθανότητα. Η σχέση της με την πιθανότητα δίνεται από τη σχέση:

$$f_X(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow \infty} \frac{P(x \leq X \leq x + \Delta x)}{\Delta x} \quad (2.4)$$

Η σχέση μεταξύ Συνάρτησης Πυκνότητας Πιθανότητας και Συνάρτησης Κατανομής είναι η:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(\xi) d\xi \quad (2.5)$$

Στην περίπτωση των συνεχών τυχαίων μεταβλητών υπάρχει η αντίστροφη συνάρτηση $F_X^{-1}(u)$ της $F_X(x)$. Συνεπώς, η εξίσωση $u = F_X(x)$ έχει μια μοναδική λύση ως προς x , την $x_u = F_X^{-1}(u)$.

Η τιμή x_u αντιστοιχεί σε δεδομένη τιμή u της συνάρτησης κατανομής και ονομάζεται u -ποσοστιαίο της μεταβλητής X .

2.2.2 Κεντρικό Οριακό Θεώρημα-Εφαρμογή για ανεξάρτητες μονάδες παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ένα από τα σημαντικότερα θεωρήματα της θεωρίας πιθανοτήτων είναι το κεντρικό οριακό θεώρημα. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο θεώρημα, η οριακή κατανομή αθροίσματος τυχαίων μεταβλητών (ανεξάρτητα από τις κατανομές των μεταβλητών) είναι πάντα η ίδια.

Έστω οι τυχαίες μεταβλητές X_i με $i=1,2,3,\dots,n$ και το άθροισμά τους $Z=X_1+X_2+\dots+X_n$ με $E[Z] = m_z$ και $\text{Var}[Z] = \sigma_z^2$. Σύμφωνα με το κεντρικό οριακό θεώρημα η κατανομή της τυχαίας μεταβλητής Z (κάτω από ορισμένες συνθήκες που θα αναφερθούν παρακάτω) έχει συγκεκριμένο όριο όταν το n τείνει στο άπειρο και είναι το εξής:

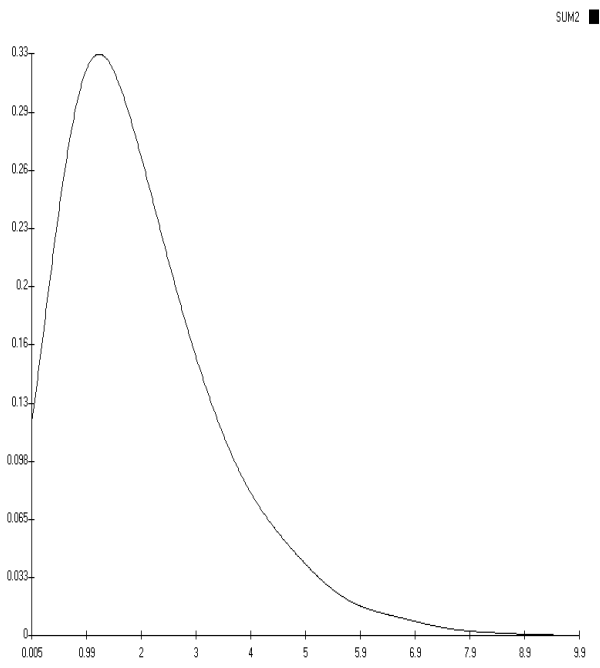
$$F_Z(z) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-m_Z)^2}{2\sigma_Z^2}} dz \quad (2.6)$$

Επίσης, αν οι μεταβλητές X_i είναι συνεχείς, η πυκνότητα πιθανότητας της Z έχει όριο:

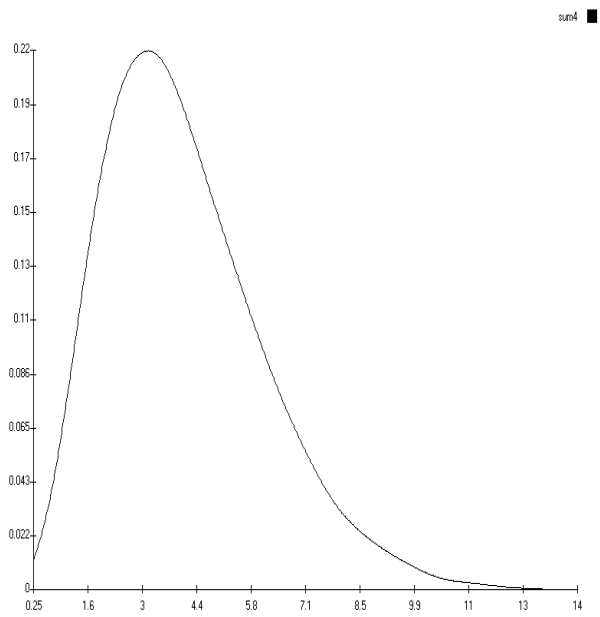
$$f_Z(z) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-m_Z)^2}{2\sigma_Z^2}} \quad (2.7)$$

Πρακτικά, η σύγκλιση για $n \rightarrow \infty$ μπορεί να θεωρηθεί ως προσέγγιση όταν το n είναι αρκετά μεγάλο. Το πόσο μεγάλο πρέπει να είναι το n έτσι ώστε η προσέγγιση να είναι ικανοποιητική εξαρτάται από τις κατανομές των μεταβλητών X_i . Με την προϋπόθεση ότι οι μεταβλητές X_i έχουν την ίδια κατανομή, η τιμή $n=30$ θεωρείται ικανοποιητική για τις περισσότερες εφαρμογές.

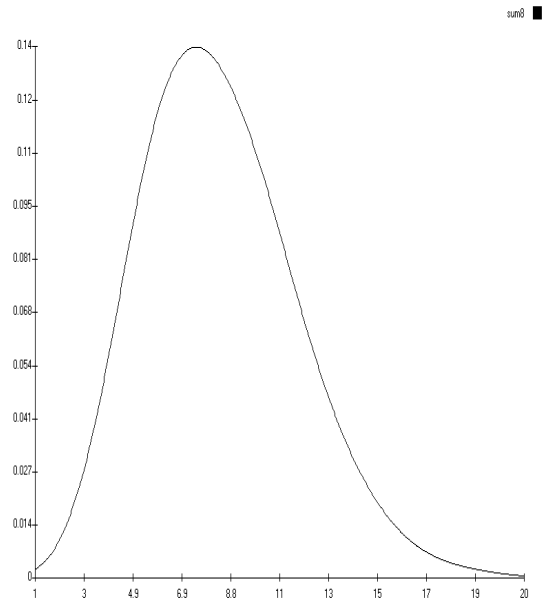
Τα παραπάνω γίνονται περισσότερο εμφανή με το παράδειγμα που ακολουθεί, με το οποίο απεικονίζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για άθροισμα διαφορετικού κάθε φορά αριθμού μεταβλητών. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, οι μεταβλητές επιλέξαμε είναι παραγωγές ισχύος από κάποιες μονάδες, οι οποίες ακολουθούν τυχαίες κατανομές. Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα για τη συνολική παραγωγή 2,4,8,16 και 36 μονάδων. Είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των δειγμάτων, τόσο περισσότερο συγκλίνει και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του αθροίσματος προς αυτή της κανονικής κατανομής.



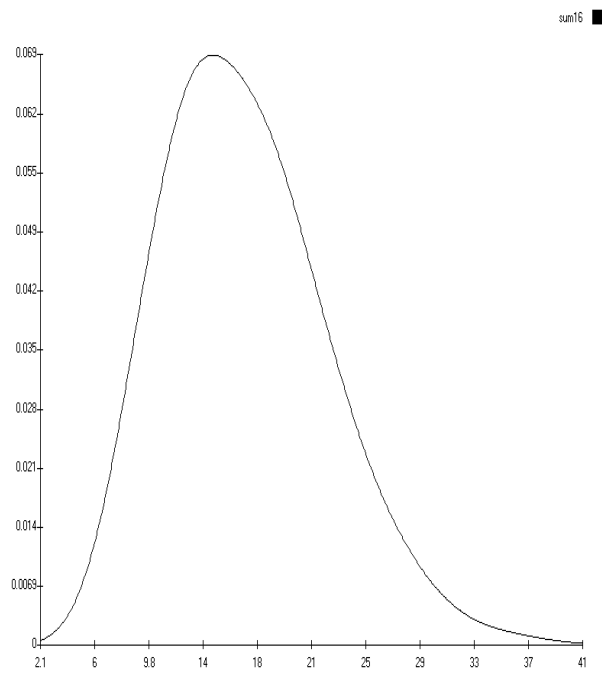
Σχήμα 2.7 Κατανομή συνολικής Αιολικής παραγωγής 2 μονάδων



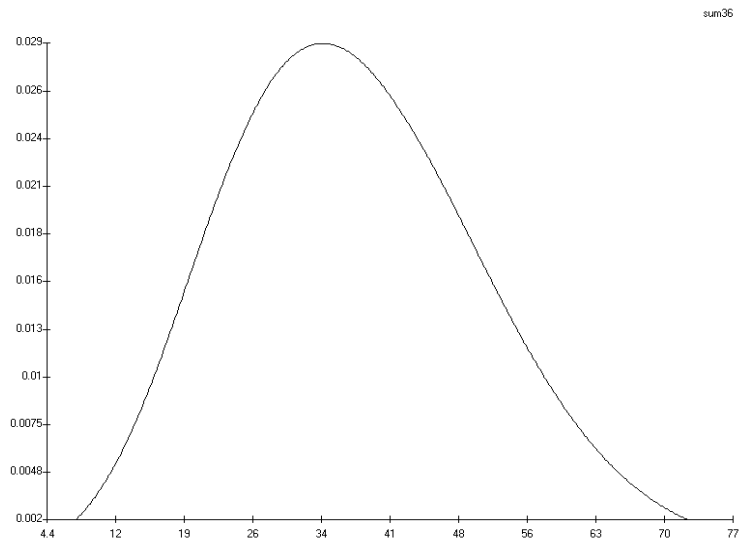
Σχήμα 2.8 Κατανομή συνολικής Αιολικής παραγωγής 4 μονάδων



Σχήμα 2.9 Κατανομή συνολικής Αιολικής παραγωγής 8 μονάδων



Σχήμα 2.10 Κατανομή συνολικής Αιολικής παραγωγής 16 μονάδων



Σχήμα 2.11 Κατανομή συνολικής Αιολικής παραγωγής 32 μονάδων

Οι προϋποθέσεις ώστε να ισχύει το κεντρικό οριακό θεώρημα είναι αρκετά γενικές ώστε να ισχύουν για πάρα πολλές μεταβλητές με φυσικό νόημα. Κάποια από τα σημαντικότερα σύνολα προϋποθέσεων είναι τα ακόλουθα:

- Οι μεταβλητές X_i είναι ανεξάρτητες με κοινή συνάρτηση κατανομής και πεπερασμένη τρίτη ροπή.
- Ανεξάρτητες μεταβλητές, πεπερασμένες και με διασπορά μεγαλύτερη από 0.
- Ανεξάρτητες μεταβλητές, με πεπερασμένη τρίτη ροπή και η διασπορά της Z τείνει στο άπειρο όταν το n τείνει στο άπειρο.
- Οι μεταβλητές δεν είναι ανεξάρτητες αλλά είναι πεπερασμένες και ο συντελεστής συσχέτισης είναι ουσιαστικά μηδέν μεταξύ κάθε μεταβλητής και όλων των άλλων εκτός από έναν περιορισμένο αριθμό.

2.2.3 Ροπές Τυχαίων Μεταβλητών

Αν X μια συνεχής τυχαία μεταβλητή και $g(X)$ συνάρτηση της X τότε ως αναμενόμενη τιμή της $g(X)$ ορίζεται το μέγεθος:

$$E[g(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(X)f_X(x)dx \quad (2.8)$$

Για μια διακριτή μεταβλητή που παίρνει τις τιμές x_1, x_2, \dots η αντίστοιχη σχέση είναι η:

$$E[g(X)] = \sum_{i=1}^{\infty} g(x_i)P(X = x_i) \quad (2.9)$$

Ειδικότερα:

- Για $g(x)=x^r$, όπου $r=0,1,2,\dots$, το μέγεθος

$$m_X^{(r)} = E[X^r] \quad (2.10)$$

ονομάζεται ροπή τάξης r της τ.μ X .

- Για $g(X)=X$, το μέγεθος:

$$m_X = E[X] \quad (2.11)$$

ονομάζεται αναμενόμενη ή μέση τιμή της X . Για τη μέση τιμή είναι συχνή η χρήση του συμβόλου μ_X

- Για $g(X) = (X - m_X)^r$, το μέγεθος

$$m_X^{(r)} = E[(X - m_X)^r] \quad (2.12)$$

ονομάζεται κεντρική ροπή τάξης r της X .

- Για $g(X) = (X - m_X)^2$ το μέγεθος:

$$m_X^{(2)} = E[(X - m_X)^2] \quad (2.13)$$

ονομάζεται διασπορά της τυχαίας μεταβλητής X . Για τη διασπορά χρησιμοποιείται και ο συμβολισμός $\text{Var}[X]$.

Όπως θα φανεί στα επόμενα κεφάλαια, η στοχαστική ανάλυση ενός Σ.Η.Ε περιλαμβάνει την περιγραφή διαφόρων μεγεθών μέσω των ροπών διαφόρων τάξεων τους. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα όπου υπάρχει έντονη αβεβαιότητα σχετικά με μελλοντικές τιμές του φορτίου, είναι απαραίτητη η χρήση μιας σειράς μετρήσεων από κάποια περίοδο του παρελθόντος και βάσει αυτών να προκύψουν τιμές για τις αναμενόμενες τιμές των φορτίων, της διασποράς κ.ο.κ. Αυτές οι τιμές σε συνδυασμό με άλλα μεγέθη και μεθοδολογία επιτρέπουν την ακριβέστερη δυνατή περιγραφή και, κατά συνέπεια, μελέτη του συστήματος.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται μεγέθη που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση των τυχαίων μεταβλητών ενός συστήματος.

2.2.4 Από κοινού και περιθώριες συναρτήσεις κατανομής

Συχνά, εκτός από τη μελέτη μιας μεμονωμένης μεταβλητής, ενδιαφερόμαστε για την ταυτόχρονη μελέτη δύο ή περισσότερων τυχαίων μεταβλητών. Έστω το ζεύγος των τυχαίων μεταβλητών (X, Y) , οι οποίες, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι συναρτήσεις των δειγματικών χώρων (Ω_X, Ω_Y) αντίστοιχα. Έτσι, η ένωση των γεγονότων $\{X \leq x\} \cup \{Y \leq y\} = \{X \leq x, Y \leq y\}$ είναι επίσης είναι γεγονός του δειγματικού χώρου $\Omega_{XY} = \Omega_X \times \Omega_Y$.

Βάσει αυτού, ορίζεται η από κοινού συνάρτηση κατανομής των μεταβλητών (X, Y) :

$$F_{XY}(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y) \quad (2.14)$$

όπου x πραγματικοί αριθμοί, ορίσματα της από κοινού συνάρτησης κατανομής των (X, Y) .

Εάν η F_{XY} είναι παραγωγίσιμη, τότε ορίζεται η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f_{XY}(x, y) = \frac{\partial^2 F_{XY}(x, y)}{\partial x \partial y} \quad (2.15)$$

Προφανώς, η σχέση μεταξύ της από κοινού συνάρτησης πιθανότητας και της από κοινού συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας είναι η:

$$F_{XY}(x, y) = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y f_{XY}(\xi, \omega) d\omega d\xi \quad (2.16)$$

Ως περιθώριες συναρτήσεις κατανομής των μεταβλητών X, Y ορίζονται, αντίστοιχα, οι συναρτήσεις:

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \lim_{y \rightarrow \infty} F_{XY}(x, y) \quad (2.17)$$

$$F_Y(y) = P(Y \leq y) = \lim_{x \rightarrow \infty} F_{XY}(x, y) \quad (2.18)$$

Υπάρχουν, επίσης, οι περιθώριες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των μεταβλητών X, Y που δίνονται από τους τύπους:

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{XY}(x, y) dy \quad (2.19)$$

$$f_Y(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{XY}(x, y) dx \quad (2.20)$$

Εκτός από τις παραπάνω συναρτήσεις, ενδιαφέρον παρουσιάζει η δεσμευμένη συνάρτηση κατανομής και η δεσμευμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της X για δεδομένη τιμή της Y , οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$F_X(x|Y = y) = \frac{\int_{-\infty}^x f_{XY}(\xi, y) d\xi}{f_Y(y)} \quad (2.21)$$

$$f_X(x|Y = y) = \frac{f_{XY}(x, y)}{f_Y(y)} \quad (2.22)$$

Οι δεσμευμένες συναρτήσεις για τη μεταβλητή Y προκύπτουν εναλλάσσοντας τα X, Y στις παραπάνω εξισώσεις.

2.2.5 Ροπές ζεύγους τυχαίων μεταβλητών

Η αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης $g(X,Y)$ ορίζεται από την εξίσωση:

$$E[g(X,Y)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x,y) f_{XY}(x,y) dy dx \quad (2.23)$$

Το μέγεθος $E[X^p Y^q]$ ονομάζεται από κοινού ροπή τάξης $p+q$ των μεταβλητών X,Y .

Αντίστοιχα, το μέγεθος $E[(X - m_X)^p (Y - m_Y)^q]$ ονομάζεται από κοινού κεντρική ροπή τάξης $p+q$ των X και Y . Η κεντρική ροπή που χρησιμοποιείται συχνότερα είναι η :

$$\sigma_{XY} = E[(X - m_X)(Y - m_Y)] = E[XY] - m_X m_Y \quad (2.24)$$

Το παραπάνω μέγεθος ονομάζεται συνδιασπορά των X και Y και συχνά χρησιμοποιείται ο συμβολισμός: $\text{Cov}(X,Y)$ (covariance).

Όταν έχουμε να κάνουμε με περισσότερες από 2 τυχαίες μεταβλητές, τότε οι συνδιασπορές για κάθε ζεύγος μεταβλητών οργανώνονται σε έναν πίνακα, ο οποίος ονομάζεται πίνακας συνδιασποράς.

Η δεσμευμένη αναμενόμενη τιμή δεδομένης συνάρτησης μιας τυχαίας μεταβλητής – π.χ της $g(X)$ – ορίζεται από την εξίσωση :

$$E \langle g(X) | Y = y \rangle \quad (2.25)$$

Σπουδαιότερο μέγεθος αυτού του τύπου είναι η δεσμευμένη μέση τιμή της X :

$$E(X|Y = y) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x|Y = y) dx \quad (2.26)$$

2.2.6 Εισαγωγή στη Συσχέτιση τυχαιών μεταβλητών

Μέχρι στιγμής έχουμε αναφερθεί γενικά στις τυχαίες μεταβλητές και τις βασικές ιδιότητες τους. Ωστόσο, δεν έχει γίνει ακόμα αναφορά σε περιπτώσεις όπου το σύστημα που μελετάμε περιλαμβάνει μεταβλητές που δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.

Ξεκινώντας από την απλή περίπτωση των δύο μόνο μεταβλητών, μπορούμε να πούμε ότι δύο μεταβλητές είναι εξαρτημένες μεταξύ τους όταν κάποια αλλαγή στην τιμή της μιας επιφέρει μεταβολή και στην τιμή της άλλης. Η σχέση, λοιπόν, που παρατηρείται μεταξύ δύο – ή και περισσότερων στη γενικότερη περίπτωση- ονομάζεται **συσχέτιση** (correlation).

Κάνοντας μια γενική κατηγοριοποίηση των ειδών της συσχέτισης, μπορούμε να διακρίνουμε τη θετική και την αρνητική συσχέτιση. Θετική συσχέτιση παρατηρείται όταν αύξηση της τιμής της μιας μεταβλητής επιφέρει αύξηση και της άλλης ενώ μια συσχέτιση χαρακτηρίζεται ως αρνητική όταν η αύξηση μιας μεταβλητής συνοδεύεται από μείωση της άλλης.

2.2.6.1 Μέτρα Συσχέτισης

Ένα μέτρο συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών X και Y πρέπει να ικανοποιεί τις εξής προϋποθέσεις για να είναι αποδεκτό:

- Η τιμή του μέτρου συσχέτισης θα πρέπει να είναι πάντα μεταξύ -1 και $+1$.
- Αν οι μεγαλύτερες τιμές της μεταβλητής X τείνουν να αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες τιμές της μεταβλητής Y και, επομένως, οι μικρότερες τιμές της μεταβλητής X τείνουν να αντιστοιχούν στις μικρότερες τιμές της μεταβλητής Y , τότε το μέτρο συσχέτισης θα πρέπει να είναι θετικό και να πλησιάζει την τιμή $+1$, αν η τάση αυτή είναι ισχυρή. Στην περίπτωση αυτή, θα μιλάμε για *θετική συσχέτιση* μεταξύ των μεταβλητών X και Y .
- Αν οι μεγαλύτερες τιμές της μεταβλητής X τείνουν να αντιστοιχούν στις μικρότερες τιμές της μεταβλητής Y και αντίστροφα, τότε, το μέτρο συσχέτισης θα πρέπει να έχει μία τιμή αρνητική, η οποία να είναι κοντά στην τιμή $+1$, αν η τάση είναι ισχυρή.

Στην περίπτωση αυτή, θα λέμε ότι οι μεταβλητές X και Y είναι *αρνητικά συσχετισμένες*.

- Αν οι τιμές της τυχαίας μεταβλητής X φαίνονται να αντιστοιχούν με τυχαίο τρόπο σε τιμές της τυχαίας μεταβλητής Y, το μέτρο συσχέτισης θα πρέπει να έχει μία τιμή αρκετά κοντά στο 0. Αυτή θα ήταν η περίπτωση όπου οι τυχαίες μεταβλητές X και Y είναι ανεξάρτητες και, ενδεχομένως, κάποιες άλλες περιπτώσεις όπου οι μεταβλητές X και Y δεν είναι ανεξάρτητες. Θα λέμε στις περιπτώσεις αυτές ότι οι τυχαίες μεταβλητές X και Y είναι *ασυσχέτιστες*, ή ότι *δεν σχετίζονται*, ή ότι *έχουν συσχέτιση 0*.

2.2.6.1.1 Ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson

Το μέτρο συσχέτισης που χρησιμοποιείται συχνότερα είναι ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson, ο οποίος συμβολίζεται με r και ορίζεται ως:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2]^{1/2}} \quad (2.27)$$

Μία άλλη μορφή του συντελεστή συσχέτισης r του Pearson, με την οποία είναι ευρύτερα γνωστός και η οποία προσφέρεται πολύ περισσότερο για ταχύτερους υπολογισμούς, είναι η εξής:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{[\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \bar{X}^2]^{1/2} [\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n \bar{Y}^2]^{1/2}} \quad (2.28)$$

η οποία μπορεί να ερμηνευθεί ως ο λόγος της συνδιασποράς του δείγματος προς το γινόμενο των τυπικών αποκλίσεων των δύο περιθωρίων δειγμάτων.

2.2.6.1.2 Ο συντελεστής συσχέτισης του Spearman

Το μέτρο συσχέτισης που προτάθηκε από τον Spearman το 1904 δεν είναι άλλο από τον συντελεστή r του Pearson υπολογιζόμενο, όμως, με βάση τις τάξεις μεγέθους των παρατηρήσεων και όχι αυτές καθαυτές τις παρατηρήσεις. Δηλαδή:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n [R(X_i) - \overline{R(X)}][R(Y_i) - \overline{R(Y)}]}{(\sum_{i=1}^n [R(X_i) - \overline{R(X)}]^2)^{1/2} (\sum_{i=1}^n [R(Y_i) - \overline{R(Y)}]^2)^{1/2}} \quad (2.29)$$

Όπου:

$$\overline{R(X)} = \sum_{i=1}^n R(X_i) / n \quad (2.30)$$

Και

$$\overline{R(Y)} = \sum_{i=1}^n R(Y_i) / n \quad (2.31)$$

Αν όλες οι μετρήσεις είναι διακεκριμένες, ο συντελεστής του Spearman γράφεται:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \left(R(X_i) - \frac{n+1}{2} \right) \left[R(Y_i) - \frac{n+1}{2} \right]}{n(n^2-1)/12} \quad (2.32)$$

Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν παρατηρούνται ίσες τιμές X (αντίστοιχα ίσες τιμές Y), ο συντελεστής παίρνει τη μορφή:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \left[R(X_i) - \frac{n+1}{2} \right] \left[R(Y_i) - \frac{n+1}{2} \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[R(X_i) - \frac{n+1}{2} \right]^2 \sum_{i=1}^n \left[R(Y_i) - \frac{n+1}{2} \right]^2}} \quad (2.33)$$

2.2.6.2 Συσχετισμένες μεταβλητές σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους, τα φορτία και οι παραγωγές ενός Σ.Η.Ε αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές με συγκεκριμένες κατανομές.

Όσον αφορά στην μακροπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίων και παραγωγών, είναι αποδεκτό να θεωρηθεί ότι οι συγκεκριμένες μεταβλητές είναι ανεξάρτητες. Ωστόσο, αυτή η παραδοχή ισχύει λιγότερο ή και καθόλου όταν το ενδιαφέρον στρέφεται στο βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό λειτουργίας ενός συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση είναι αναγκαία η θεώρηση εξάρτησης μεταξύ των συγκεκριμένων μεταβλητών.

Οι λόγοι της συσχέτισης μεταξύ των φορτίων και της παραγωγής μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες όπως:

➤ Συσχέτιση φορτίου-φορτίου

Τα φορτία που βρίσκονται σε γειτονικούς ζυγούς έχουν την τάση να αυξάνονται ή να μειώνονται με τον ίδιο τρόπο. Έχουν δηλαδή οι γειτονικοί ζυγοί κάποιο βαθμό συσχέτισης που οφείλεται σε κοινούς παράγοντες, όπως καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία, βροχή, άνεμος, ηλιοφάνεια κ.λ.π.), κοινωνικές συνθήκες της περιοχής (ώρες εργασίας, αθλητικά γεγονότα, αγροτικές ασχολίες, τηλεοπτικά προγράμματα κ.λ.π.). Όταν τα φορτία σε δύο ή περισσότερους ζυγούς αυξάνονται και μειώνονται μαζί υπάρχει θετική συσχέτιση, ενώ όταν ένα φορτίο αυξάνεται και κάποιο άλλο μειώνεται υπάρχει αρνητική συσχέτιση.

➤ Συσχέτιση παραγωγής-παραγωγής

Συνήθως σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από πολλές ομάδες γεννητριών είναι επιθυμητό η παραγωγή μιας συγκεκριμένης περιοχής ή η συνολική παραγωγή του συστήματος να διατηρείται σταθερή. Έτσι, όταν η παραγωγή μιας γεννήτριας μειωθεί για διάφορους λόγους, θα πρέπει η παραγωγή των άλλων γεννητριών να αυξηθεί μέσα στα επιτρεπόμενα όρια για την παραλαβή του φορτίου. Η συσχέτιση αυτή επομένως είναι αρνητική. Η παραγωγή επίσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ακολουθεί τις μεταβολές του ανέμου ή της ηλιοφάνειας και σε γειτονικούς ζυγούς η συσχέτιση είναι θετική.

➤ **Συσχέτιση παραγωγής-φορτίου**

Η παραγωγή μιας περιοχής σε ένα σύστημα είναι προγραμματισμένη να καλύψει το φορτίο της περιοχής, και συνήθως η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται τη στιγμή που χρειάζεται. Η συσχέτιση που υπάρχει επομένως μεταξύ παραγωγής και φορτίου είναι θετική δηλαδή όταν το φορτίο αυξάνεται ή μειώνεται, αυξάνεται ή μειώνεται αντίστοιχα και η παραγωγή.

3

Στοχαστική διαχείριση της Αβεβαιότητας των

Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

3.1 Ανάλυση Ροής Φορτίου

Ο κύριος προορισμός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να προμηθεύει με ενεργό και άεργο ισχύ τα διάφορα συνδεδεμένα στο σύστημα φορτία.

Η ροή ισχύος ή φορτίου στο δίκτυο για την τροφοδότηση της ζήτησης, αποτελεί την χαρακτηριστικότερη εκδήλωση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας για ένα σύστημα. Ταυτόχρονα, η συχνότητα και η τάση στους διάφορους ζυγούς πρέπει να τηρούνται μέσα σε προδιαγεγραμμένα όρια παρά το γεγονός ότι τα φορτία υπόκεινται σε σημαντικές και ως ένα σημείο απρόβλεπτες μεταβολές. Στα δίκτυα διανομής, τα οποία λειτουργούν κατά κανόνα ακτινικά, η ροή της ισχύος είναι καθορισμένη και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα. Στα διασυνδεδεμένα, όμως, δίκτυα μεταφοράς η κατανομή των ροών ισχύος έχει πολύ πιο μεγάλη τεχνική και οικονομική σημασία.

Το πρόβλημα των ροών φορτίου συνίσταται στον προσδιορισμό των μεταβλητών του συστήματος (ισχύων, ρευμάτων, τάσεων), σε μια δεδομένη *μόνιμη κατάσταση λειτουργίας*.

Η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια ορισμένη εικόνα φορτίων, μια αντίστοιχη εικόνα παραγόμενης ισχύος και αντίστοιχη εικόνα τάσεων και ροών στο δίκτυο. Κάθε άλλη εικόνα φορτίων ή ροών, συνιστά μια άλλη κατάσταση λειτουργίας και περιγράφεται από άλλες τιμές μεταβλητών.

Κατά τη λειτουργία ενός συστήματος δημιουργούνται πολλές φορές ανώμαλες συνθήκες, οφειλόμενες είτε σε βλάβες, είτε σε εξωτερικά αίτια ή σε ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Σε περίπτωση ανωμαλίας στο σύστημα είναι δυνατό να διαταραχθεί η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, ή να μην γίνει καν αντιληπτή η ανωμαλία στην κατανάλωση.

Σε οποιαδήποτε, όμως, ανωμαλία το σύστημα αντιδρά προς αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας, είτε αυτόματα μέσω ειδικών συστημάτων και ελέγχου, ή με επέμβαση του προσωπικού εκμεταλλεύσεως.

Οι ανώμαλες συνθήκες αποτελούν *μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας* του συστήματος – σε αντίθεση με τη μόνιμη κατάσταση- κατά τις οποίες στο σύστημα εκδηλώνονται μεταβατικά φαινόμενα ταχείας ή βραδείας εξέλιξης, ανάλογα την περίπτωση.

Τέτοια φαινόμενα είναι τα βραχυκυκλώματα (συμμετρικά και ασύμμετρα), οι υπερτάσεις χειρισμών (ζεύξη, απόζευξη ή αλλιώς, κλείσιμο, άνοιγμα διακόπτη), και τα κεραύνια πλήγματα.

Κατά τα μεταβατικά αυτά φαινόμενα δημιουργούνται ταλαντώσεις τάσεων και εντάσεων στο σύστημα, κατά τις οποίες τα μεγέθη αυτά είναι δυνατόν να αποκτήσουν τιμές επικίνδυνες για την ασφάλεια του συστήματος.

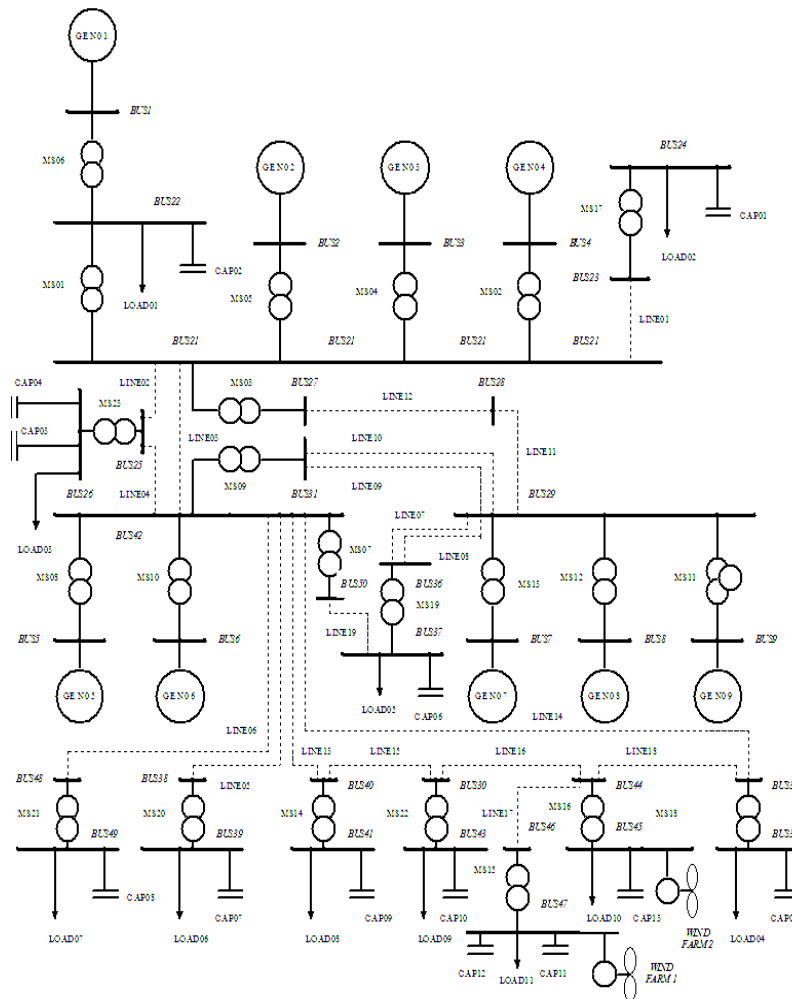
3.1.1 Εξιώσεις Ροής Φορτίου

Η μέθοδος που προσφέρεται για την ανάλυση του δικτύου στην περίπτωση των ροών φορτίου (μόνιμη κατάσταση) βασίζεται στη μέθοδο κόμβων της ανάλυσης κυκλωμάτων, η οποία παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως τα ακόλουθα:

- μικρότερο, γενικά, πλήθος μεταβλητών
- εύκολη εισαγωγή γραμμών μεταφοράς ή μετασχηματιστών παράλληλα
- άμεσος υπολογισμός των μεγεθών που ενδιαφέρουν: τάσεων κόμβων και ρευμάτων κλάδων.

Η ανάλυση ροών φορτίου προϋποθέτει τη συμμετρική κατάσταση του συστήματος και γι' αυτό το σκοπό επαρκεί το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Το Σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει ένα τυπικό μονογραμμικό διάγραμμα ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας:



Σχήμα 3.1 Τυπικό μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Οι διαδρομές των γραμμών μεταφοράς, με τις οποίες γίνεται η διακίνηση της ισχύος, διαμορφώνονται ανάλογα με τις θέσεις και τα μεγέθη των φορτίων, με δεδομένες τις θέσεις και τα μεγέθη των σταθμών παραγωγής. Άλλοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη είναι η σχετική σημασία των φορτίων και οι καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας υπάρχει ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης ισχύος, απωλειών και φορτίων και η ισορροπία αυτή διέπεται από σταθερή συχνότητα λειτουργίας και σταθερές τάσεις ζυγών.

Η μελέτη των ροών φορτίου συνίσταται στον υπολογισμό των ισχύων και τάσεων σε κάθε κόμβο του δικτύου, για δεδομένες συνθήκες.

Θεωρώντας τη γενική περίπτωση ενός ζυγού του συστήματος, με παραγωγή και φορτίο που εκφράζονται ως ισχύεις, διακρίνουμε τα ακόλουθα 6 μεγέθη:

- P_G : παραγόμενη ενεργός ισχύς
- Q_G : παραγόμενη άεργος ισχύς
- P_D : ενεργός ισχύς φορτίου
- Q_D : άεργος ισχύς φορτίου
- V : μέτρο τάσης του ζυγού
- δ : φασική γωνία τάσης του ζυγού

Τα ηλεκτρικά αυτά μεγέθη αποτελούν τις μεταβλητές του προβλήματος και είναι 6 ανά ζυγό. Σε ένα σύστημα με n ζυγούς υπάρχουν συνολικά $6n$ μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες.

- Τα φορτία, ή μεταβλητές ζήτησης (P_D , Q_D) χαρακτηρίζονται και σαν μεταβλητές διαταραχής και μπορούν να αποτελέσουν τα στοιχεία ενός διανύσματος διάστασης $2n$. Είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος.
- Οι ισχύεις παραγωγής (P_G , Q_G) χαρακτηρίζονται σαν μεταβλητές ελέγχου και μπορούν επίσης να θεωρηθούν σαν στοιχεία ενός άλλου διανύσματος $2n$. Ονομάζονται έτσι γιατί οι μονάδες παραγωγής αποτελούν τα κύρια μέσα ελέγχου της λειτουργίας του συστήματος.
- Οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών ανήκουν στις μεταβλητές κατάστασης και είναι εξαρτημένες. Οπότε μπορούν να αποτελέσουν τα στοιχεία ενός διανύσματος κατάστασης, διάστασης $2n$.

Η εγχυόμενη ενεργός και άεργος ισχύς σε ένα ζυγό i ορίζεται ως εξής:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (3.1)$$

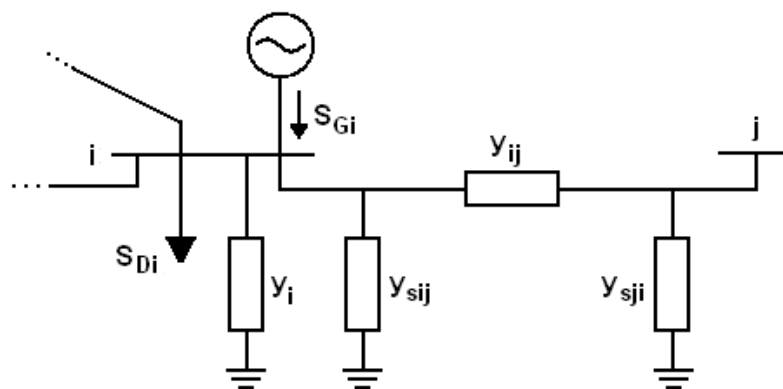
$$Q_i = Q - Q_{Di} \quad (3.2)$$

και έχει χαρακτήρα παραγωγής όταν εισέρχεται στο δίκτυο ή χαρακτήρα φορτίου όταν εξέρχεται από αυτό.

Οι ζυγοί ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- **Ζυγός Φορτίου (PQ)**, στον οποίο θεωρούνται γνωστές η ενεργός και άεργος ισχύς φορτίου και κατά συνέπεια οι εγχύσεις ενεργού και άεργου ισχύος ($P_i = -P_{Di}$, $Q_i = -Q_{Di}$). Ενώ, άγνωστα θεωρούνται το μέτρο και η γωνία τάσης του ζυγού.
- **Ζυγός παραγωγής (PV)**, στον οποίο είναι γνωστά η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης και άγνωστα η παραγόμενη άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης.
- **Ζυγός Ταλάντωσης ή Ζυγός Αναφοράς (slack)**, ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής που χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει τις άγνωστες εξ αρχής απώλειες του δικτύου και γενικά για άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Στον ζυγό αυτό επιβάλλεται σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία, ενώ προσδιορίζονται η ενεργός και άεργος παραγόμενη ισχύς. Συνήθως, ορίζουμε για το ζυγό ταλάντωσης γωνία τάσης $\delta=0$.

Για την κατάστρωση των εξισώσεων της Ροής φορτίου θεωρούμε τον παρακάτω ζυγό:



Σχήμα 3.2 Γενικευμένος ζυγός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η γραμμή μεταξύ των ζυγών i και j παριστάνεται με το ονομαστικό κύκλωμα Π .

Γενικά μπορεί να είναι συνδεδεμένες στο ζυγό i μία ή περισσότερες γραμμές ή και μετασχηματιστές. Στο ζυγό i είναι επίσης συνδεδεμένη μια εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα

y_i , που παριστάνει οποιοδήποτε συνδυασμό πυκνωτών, αυτεπαγωγών ή φορτίων με σταθερή αγωγιμότητα. Η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό i εγχύει ρεύμα I_{Gi} , ενώ το αντίστοιχο φορτίο S_{Di} απορροφά ρεύμα I_{Di} . Η τάση στο ζυγό i συμβολίζεται με V_i , ενώ η τάση στο ζυγό j με V_j .

Το ισοζύγιο ισχύος σε έναν ζυγό i εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} = Y_{ii}^* \cdot V_i^2 + V_i \cdot \sum_{j \in A(i)} Y_{ij}^* \cdot V_j^* \quad (3.3)$$

Για ένα σύστημα n ζυγών, μπορούν να γραφούν n εξισώσεις του τύπου (5.14). Οι n αυτές εξισώσεις αποτελούν τις μιγαδικές εξισώσεις ροής φορτίου.

Χρησιμοποιώντας το συμβολισμό:

$$\begin{aligned} \bar{V}_i &= V_i \cdot e^{j\delta_i} \\ Y_{ij} &= G_{ij} + jB_{ij} \end{aligned} \quad (3.4)$$

και ξεχωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη στην εξίσωση (5.14), παίρνουμε τις εξισώσεις ροής φορτίου σε πραγματική μορφή:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = V_i^2 \cdot G_{ii} + V_i \cdot \sum_{j \in A(i)} V_j \cdot [G_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.5)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = -V_i^2 \cdot B_{ii} + V_i \cdot \sum_{j \in A(i)} V_j \cdot [B_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) - G_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.6)$$

Για ένα σύστημα n ζυγών υπάρχουν n εξισώσεις ενεργού και άεργου ισχύος της μορφής (3.5) και (3.6) αντίστοιχα. Οι $2n$ αυτές εξισώσεις αποτελούν τις εξισώσεις ροής φορτίου με πραγματικές μεταβλητές.

Γενικά, το πρόβλημα προσδιορισμού των ροών φορτίου για ένα σύστημα με n ζυγούς ανάγεται στην επίλυση n μιγαδικών εξισώσεων (3.3) με n αγνώστους. Οι εξισώσεις αυτές συνδέουν ισχείς, τάσεις και γωνίες, δηλαδή τις τρεις χαρακτηριστικές μεταβλητές του προβλήματος. Τα ρεύματα δεν μας ενδιαφέρουν ποτέ απευθείας και υπολογίζονται εύκολα

μετά την εύρεση των τάσεων και των γωνιών. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό παρουσιάζει τις εξής ιδιαιτερότητες:

- Οι εξισώσεις είναι μιγαδικές: Δεδομένου ότι οι περισσότεροι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας μιγαδικών αριθμών, η μιγαδική φύση των εξισώσεων ροής φορτίου δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία. Αν δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα, θα πρέπει οι μιγαδικές εξισώσεις (3.3) να μετατραπούν σε πραγματικές εξισώσεις (3.5-3.6). Η διαδικασία αυτή ωστόσο διπλασιάζει τον αριθμό των προς επίλυση εξισώσεων σε $2n$.
- Οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές: Ο μη γραμμικός χαρακτήρας των εξισώσεων ροής φορτίου δυσχεραίνει κάπως την αναλυτική επίλυση του προβλήματος. Ωστόσο, με τη βοήθεια ισχυρών ψηφιακών υπολογιστών μπορούμε να επιλύσουμε το πρόβλημα αριθμητικά με επαναληπτικούς αλγορίθμους.

3.1.2 Περιορισμοί

Είναι ήδη εμφανές ότι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με ορισμένα φορτία στους ζυγούς του μπορεί να λειτουργήσει με πολλούς τρόπους, ή “καταστάσεις” και να ικανοποιεί τις ζητήσεις. Κύρια επιδίωξη της μελέτης ροών φορτίου αποτελεί η εύρεση της καταλληλότερης - βέλτιστης λύσης, βάσει ορισμένων κριτηρίων και υπό ορισμένους περιορισμούς, που πρέπει να τηρηθούν σε κάθε περίπτωση.

Κατά κανόνα, είναι γνωστή η ζήτηση φορτίου των ζυγών, δηλαδή οι $2n$ μεταβλητές διαταραχής, που αποτελούν τα βασικά δεδομένα του προβλήματος. Στη συνέχεια, ορίζονται $2n$ μεταβλητές από τις ισχείς και τις τάσεις των ζυγών παραγωγής, οπότε και προσδιορίζονται από την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου (3.5-3.6) οι υπόλοιπες $2n$ άγνωστες μεταβλητές. Η προδιαγραφή των $2n$ μεταβλητών από τις ισχείς και τις τάσεις των ζυγών παραγωγής διευκολύνεται από τις ακόλουθες συνθήκες και περιορισμούς λειτουργίας του συστήματος.

- Η οικονομική λειτουργία των μονάδων παραγωγής επιβάλλει ορισμένες τιμές της παραγόμενης ενεργού ισχύος κάθε μονάδας σε κάθε περίπτωση.
- Για τους ζυγούς φορτίου δεν υπάρχει παραγωγή, δηλαδή $P_G = 0$. Η Q_G είναι είτε μηδενική, είτε έχει ορισμένη τιμή αν προέρχεται από χωρητική αντιστάθμιση.

- Τα επίπεδα τάσης ορισμένων ζυγών έχουν στενά όρια τιμών.

Γενικά, οι περισσότερες από τις 2n άγνωστες μεταβλητές είναι οι γωνίες δ , οι οποίες προσδιορίζονται από την επίλυση των εξισώσεων. Τελικά, οι λύσεις που θα προκύψουν πρέπει να ικανοποιούν όρια και περιορισμούς, όπως οι εξής:

- οι τάσεις των ζυγών: $V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max}$
- οι γωνιακές διαφορές ορισμένων ζυγών: $|\delta_i - \delta_j| \leq |\delta_i - \delta_j|_{\max}$
- οι ισχείς παραγωγής: $P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max}$ και $Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max}$
- οι γραμμές μεταφοράς έχουν όρια ευστάθειας και όρια απωλειών ισχύος.

Επιπλέον των ανωτέρω, πρέπει να ληφθούν υπόψη ενδεχόμενες ειδικές συνθήκες σε κάθε περίπτωση. Εάν, η λύση οδηγήσει τελικά σε τιμές μεταβλητών εκτός ορίων, η επίλυση επαναλαμβάνεται προς την κατεύθυνση βελτίωσης των τιμών των αγνώστων μεταβλητών.

3.1.3 Συμβατικές μέθοδοι επίλυσης Ροής φορτίου

Το γεγονός ότι οι εξισώσεις ροής φορτίου είναι μη γραμμικές, δυσχεραίνει την αναλυτική επίλυση του συστήματος. Παλαιότερα για τη μελέτη των ρών φορτίου χρησιμοποιούνταν ομοιώματα δικτύου EP, δηλαδή ειδικοί αναλογικοί υπολογιστές, στους οποίους τα διάφορα τμήματα του συστήματος εξομοιώνονταν αναλογικά με αντίστοιχα ηλεκτρικά στοιχεία σε μικρογραφία. Ωστόσο, από το 1984 οι μελέτες των δικτύων αυτού του είδους γίνονται κυρίως με ψηφιακούς υπολογιστές.

Έτσι, πλέον, για την επίλυση των ρών φορτίου χρησιμοποιούνται ψηφιακές μέθοδοι αριθμητικής επίλυσης, με ικανοποιητική ακρίβεια, ακόμα κι αν πρόκειται για πολύ μεγάλα συστήματα, με χιλιάδες ζυγούς.

Η γενική μορφή των εξισώσεων είναι:

$$g(\bar{x}) = 0 \quad (3.7)$$

όπου \bar{x} : διάνυσμα κατάστασης διάστασης n

g : m εξισώσεις ροής φορτίου

Οι ψηφιακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς των ροών φορτίου μπορούν να επιλύσουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις των ροών φορτίου για μεγάλα συστήματα με εκατοντάδες ζυγούς και απώλειες. Οι τρεις βασικές επαναληπτικές μέθοδοι που εφαρμόζονται στις μελέτες ροών φορτίου είναι η μέθοδος Gauss-Seidel, η μέθοδος Newton-Raphson και η ταχεία αποζευγμένη μέθοδος.

Και οι τρεις αυτές μέθοδοι ξεκινούν από μια αρχική λύση και με διαδοχικές ανακυκλώσεις προσεγγίζουν την τελική με τον ακόλουθο τρόπο: Η αρχική λύση χρησιμοποιείται στις εξισώσεις του προβλήματος για να βρεθεί μια καινούρια καλύτερη λύση. Εν συνεχεία, η δεύτερη λύση χρησιμοποιείται για να βρεθεί μια τρίτη ακόμα καλύτερη κ.ο.κ. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς έως ότου η λύση συγκλίνει. Μια τέτοια συγκλίνουσα διαδικασία ονομάζεται μέθοδος ανακυκλώσεως και η ποιότητά της κρίνεται από την ταχύτητα σύγκλισής της.

3.2 Στοχαστική προσέγγιση μελέτης Ροών φορτίου

Αναφέρθηκε και προηγουμένως ότι ο στόχος της μελέτης ενός συστήματος είναι για κάθε διαφορετική κατάσταση στην οποία βρίσκεται (λόγω διαφορετικών εισόδων) να καταλήξουμε σε σωστά αποτελέσματα για την έξοδο του συστήματος.

Για την εκτέλεση της ντετερμινιστικής μεθόδου απαιτείται πλήρης γνώση των ακριβών τιμών του φορτίου, της παραγωγής και των συνθηκών του δικτύου. Συνεπώς, αν προσπαθούσαμε να επιλύσουμε το πρόβλημα της ροής φορτίου αποκλειστικά με τη ντετερμινιστική μέθοδο, για κάθε μεταβολή που πραγματοποιείται (μεταβολή του φορτίου, της παραγόμενης ισχύος ή διακοπή κάποιας μονάδας παραγωγής) θα έπρεπε να επιλυθούν εκ νέου οι εξισώσεις ροής φορτίου.

Για ένα δίκτυο με n ζυγούς και μονάδες παραγωγής που παίρνουν k διαφορετικές τιμές, η επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου θα απαιτούσε την επίλυση k^n εξισώσεων. Είναι προφανές, επομένως, ότι το ντετερμινιστικό μοντέλο δεν αποτελεί αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα της αβεβαιότητας λόγω του μεγάλου αριθμού των απαιτούμενων υπολογισμών. Γι αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η στοχαστική αντιμετώπιση του προβλήματος.

Η πιθανοτική ή στοχαστική θεώρηση μόνιμων και μεταβατικών καταστάσεων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έχει εφαρμοστεί σχετικά πρόσφατα σε προβλήματα ροής φορτίου και

βρίσκεται σε εξέλιξη στην αντιμετώπιση προβλημάτων εκτίμησης καταστάσεως , βραχυκυκλωμάτων, ιεράρχησης διαταραχών, υπολογισμού κόστους παραγωγής κλπ.

3.2.1 Εξέλιξη των πιθανοτικών – στοχαστικών μεθόδων Ροής φορτίου

Κατά τη διάρκεια των 30 τελευταίων χρόνων έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις του προβλήματος της πιθανοτικής ροής φορτίου.

Ακολουθεί μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης των πιθανοτικών μεθόδων στην οποία παρουσιάζονται οι τεχνικές που ακολουθήθηκαν σε κάθε μέθοδο και οι παραδοχές στις οποίες στηρίχθηκε η υλοποίησή τους.

➤ 1974 – Barbara Borkowska

Η μέθοδος βασίζεται στη D.C. ανάλυση ροής φορτίου και τα δεδομένα δίνονται με τη μορφή συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας για τα φορτία και την παραγωγή κάθε ζυγού. Οι συναρτήσεις αυτές είναι η κανονική, η διωνυμική και η διακριτή κατανομή. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε υπολογίζει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της πραγματικής ροής οποιασδήποτε γραμμής, και του ισοζυγίου ισχύος στο ζυγό αναφοράς του συστήματος. Η βασική υπόθεση που διατυπώνεται για την εφαρμογή συνελικτικών τεχνικών είναι η ανεξαρτησία των τυχαίων μεταβλητών του προβλήματος.

➤ 1974 – Allan, Borkowska και Grigg

Το 1974 διατυπώνεται από τους Allan, Borkowska και Grigg η ίδια διατύπωση της πιθανοτικής μεθόδου αλλά με περισσότερη έμφαση στις πρακτικές εφαρμογές της. Πραγματοποιείται εκτεταμένη ανάλυση των αποτελεσμάτων ενός συστήματος 15 ζυγών για να φανεί η τεράστια διαφορά πληροφοριών που αποκτώνται με την πιθανοτική ροή φορτίου σε σχέση με την ντετερμινιστική ανάλυση.

➤ 1975 – Dorazo, Klitin και Sasson

Το 1975 οι Dorazo, Klitin και Sasson αναπτύσσουν με διαφορετικό τρόπο τη στοχαστική ροή φορτίου, όπως την ονόμασαν, χρησιμοποιώντας για τους υπολογισμούς τον πίνακα συμμεταβλητότητας που είχε εφαρμοστεί με αποδοτικό τρόπο στο πρόβλημα εκτίμησης κατάστασης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο Κεντρικό Οριακό Θεώρημα και θεωρεί ότι οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται

στην ανάλυση ροής φορτίου ακολουθούν κανονική κατανομή. Έτσι τα δεδομένα και τα αποτελέσματα αντιπροσωπεύονται μόνο από την αναμενόμενη τιμή και την τυπική απόκλισή τους. Επίσης, στη ίδια διατύπωση παρουσιάζεται μία μέθοδος "περιοριστικών περιοχών", για την αντιμετώπιση του γεγονότος ότι το συνολικό φορτίο ή η παραγωγή σε ένα σύστημα είναι γνωστά με περισσότερη ακρίβεια από εκείνη που αντιστοιχεί στην απλή υπόθεση της ανεξαρτησίας των τυχαίων μεταβλητών.

➤ **1975 – Heydt και Katz**

Οι Heydt και Katz το 1975 αναπτύσσουν με στατιστικό τρόπο τη θεωρία των συνδεδεμένων συστημάτων. Η αβεβαιότητα των φορτίων σε συνδυασμό με την πιθανή μη διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής προκαλούν αβεβαιότητα ως προς το μέγεθος της αλληλεπίδρασης με τα γειτονικά συστήματα. Στη διατύπωση αυτή γίνεται η υπόθεση ότι οι γραμμικοί περιορισμοί της παραγωγής που θεωρούνται, ακολουθούν κανονική κατανομή και χρησιμοποιείται επίλυση με γραμμικό προγραμματισμό.

➤ **1976-1977 – Allan και Shakarchi**

Το 1976 διατυπώνεται από τους Allan και Shakarchi μία επέκταση της πιθανοτικής D.C. ροής φορτίου σύμφωνα με τη βασική θεμελίωση της Borkowska. Η μέθοδος χρησιμοποιεί δύο ισοδύναμες μεταξύ τους μορφές γραμμικοποίησης των εξισώσεων ροής φορτίου και τα δεδομένα είναι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας πραγματικών και αέργων φορτίων και παραγωγής στους ζυγούς. Ο αλγόριθμος είναι σε θέση να υπολογίζει τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των πραγματικών και αέργων ροών ισχύος, των τάσεων και των αέργων εγχύσεων. Για την πραγματοποίηση των συνελίξεων εφαρμόζονται οι αριθμητικές τεχνικές που δημοσιεύονται τον ίδιο χρόνο.

Τον επόμενο χρόνο, 1977, διατυπώνονται δύο ακόμη μορφές γραμμικοποίησης των εξισώσεων ροής φορτίου από τους Allan και Shakarchi. Οι εξισώσεις γραμμικοποιούνται γύρω από την περιοχή της αναμενόμενης τιμής των δεδομένων και είναι περισσότερο ακριβείς από τις σχέσεις των προηγούμενων γραμμικοποιήσεων γιατί βασίζονται σε λιγότερες υποθέσεις. Η τέταρτη γραμμικοποίηση μάλιστα δεν θεωρεί απόζευξη μεταξύ πραγματικής και άεργου ισχύος.

Το 1977 επίσης, οι ίδιοι συγγραφείς δημοσιεύουν τις εργασίες τους σχετικά με τον τρόπο που μπορεί να υπολογιστεί και να συμπεριληφθεί στην ανάλυση της πιθανοτικής A.C. ροής φορτίου η υπόθεση της γραμμικής θετικής ή αρνητικής εξάρτησης των εγχύσεων ισχύος ενός συστήματος. Στην ανάλυση που ακολουθεί υπογραμμίζεται η επίδραση της εξάρτησης

μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών στην τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων και στο σχήμα των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας. Η δημοσίευση αυτή αποτελεί επέκταση της εργασίας που προηγήθηκε από τους Allan, Grigg, Newey και Simmons, για την εφαρμογή ολικής ή μερικής συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων τυχαίων μεταβλητών στην πιθανοτική D.C. ανάλυση. Το μοντέλο πιθανοτικής ροής φορτίου με χρήση εξαρτημένων τυχαίων μεταβλητών μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη λειτουργική ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και στη βραχυπρόθεσμη λήψη αποφάσεων, όπου η υπόθεση της ανεξαρτησίας μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών δεν ισχύει.

➤ **1977-1978 – Aboytes, Allan, Grigg και Prato-Garciato**

Για την πιθανότητα απώλειας γραμμής και γενικότερα μεταβολής στην τοπολογία του συστήματος προτείνονται δύο διατυπώσεις, μία από τον Aboytes το 1977 και η άλλη από τους Allan, Grigg και Prato-Garciato 1978. Η τελική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ροής σε κάποιο στοιχείο του δικτύου, δίνεται ως άθροισμα με διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας όλων των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των ροών που αντιστοιχούν σε κάθε μία τοπολογία του συστήματος που αναλύεται. Η πρώτη διατύπωση παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία επισημαίνονται από τους Leite da Silva, Allan, Soares και Arienti. Αυτά είναι :

- i. η υπόθεση ότι το άθροισμα όλων των θεωρούμενων τοπολογιών είναι μονάδα, πράγμα που οδηγεί σε εξωπραγματικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπου το γινόμενο του αριθμού των στοιχείων επί την αβεβαιότητα του κάθε στοιχείου πλησιάζει τη μονάδα, και
- ii. το γεγονός ότι χρησιμοποιείται η υπόθεση της κανονικής κατανομής των αποτελεσμάτων. Στη δεύτερη διατύπωση έχει θεωρηθεί και ορισμένος αριθμός πιθανών διαταραχών δευτέρας τάξεως.

➤ **1980-1981 – Armando Martins Leite da Silva**

Το 1980 μελετάται από τον Armando Martins Leite da Silva, η αποδοτικότητα υπολογισμού σε χρόνο, μνήμη, ακρίβεια και απλότητα των πιθανοτικών μεθόδων. Διερευνούνται αναλυτικά με χρήση της μη γραμμικής και της γραμμικοποιημένης μεθόδου Monte Carlo, που βασίζεται στην ανάλυση και αξιολόγηση μεγάλου πλήθους ροών φορτίου, όλες οι προτεινόμενες πιθανοτικές μέθοδοι και διαπιστώνεται η επίδραση της μη γραμμικότητας των εξισώσεων ροής φορτίου στα αποτελέσματα. Αποδεικνύεται έτσι η ανακρίβεια της

υπόθεσης ότι οι άγνωστες τυχαίες μεταβλητές ακολουθούν κανονική κατανομή. Παράλληλα, προτείνεται μία νέα μέθοδος ροής φορτίου που παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιεί γραμμικοποιημένα πρότυπα λαμβάνει υπόψη την επίδραση της μη γραμμικότητας των εξισώσεων και δημοσιεύεται το 1981. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη δυνατότητα μεταβολής του σημείου γραμμικοποίησης των εξισώσεων έτσι ώστε να υπολογίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια τα άκρα των υπολογιζόμενων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας. Χρησιμοποιείται επίσης ένας καινούριος αλγόριθμος για την πραγματοποίηση των συνελίξεων, ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (F.F.T) που εκμεταλλεύεται ορισμένες ιδιότητες των εκθετικών συναρτήσεων και ανάγει τη συνέλιξη σε περιορισμένο πολλαπλασιασμό διακριτών τομών στο πεδίο της συχνότητας. Η τεχνική αυτή αποδεικνύεται ότι είναι πολύ πιο γρήγορη και πιο ακριβής από την τεχνική της συμβατικής συνελίξης που βασίζεται στις ιδιότητες του μετασχηματισμού Laplace.

➤ **1984-1985 - A.M. Leite da Silva, Arienti και Allan**

Το 1984 οι A.M. Leite da Silva, Arienti και Allan τελειοποιούν τη πιθανοτική μέθοδο ροής φορτίου που θεωρεί εξάρτηση μεταξύ των δεδομένων εγχύσεων των ζυγών για την εφαρμογή της σε προβλήματα ισοζυγίου ισχύος στο σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικούς και λειτουργικούς περιορισμούς.

Τέλος το 1985 οι A.M. Leite da Silva, Allan, Soares και Arienti, επεκτείνουν τη διατύπωση των Allan, Grigg και Garcia για τη μεταβλητή τοπολογία του δικτύου έτσι ώστε να εφαρμόζεται στην πιθανοτική A.C. ανάλυση.

3.2.2 Αναλυτική μέθοδος Πιθανοτικής Ροής Φορτίου

Η αναλυτική προσέγγιση της πιθανοτικής ροής φορτίου βασίζεται στη χρησιμοποίηση των Συναρτήσεων Πυκνότητας Πιθανότητας (Σ.Π.Π) των αβέβαιων εισόδων του συστήματος (φορτίο και παραγωγή) έτσι ώστε να καταλήξουμε στις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των μεγεθών προς υπολογισμό. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω της συνελίξης των Σ.Π.Π των εισόδων.

Προκειμένου να καταλήξουμε στις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των μεγεθών του συστήματος για τα οποία ενδιαφερόμαστε, θα γίνει χρήση της πράξης της συνελίξης και της θεωρίας ανάλυσης των τυχαίων μεταβλητών.

Έστω 2 ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές X και Y με συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας $f_1(x)$ και $f_2(x)$ αντίστοιχα. Οι συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας αυτών των 2 μεταβλητών είναι αντίστοιχα:

$$P_1(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_1(x) dx \quad (3.8)$$

$$P_2(y) = P(Y \leq y) = \int_{-\infty}^y f_2(y) dy \quad (3.9)$$

Έστω τώρα W μια άλλη τυχαία μεταβλητή, τέτοια ώστε:

$$W = X + Y \quad (3.10)$$

Τότε:

$$P_3(\omega) = P(W \leq \omega) = P(X + Y \leq \omega) = \iint_{x+y < \omega} f_1(x) f_2(y) dx dy \quad (3.11)$$

Έχουμε δεχθεί, όμως, ότι οι μεταβλητές X και Y είναι ανεξάρτητες. Επομένως, η παραπάνω εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$P_3(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(y) \int_{-\infty}^{\omega-y} f_1(x) dx dy = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(y) P_1(\omega - y) dy \quad (3.12)$$

Συνεπώς, εφόσον: $f_3(\omega) = \frac{dP_3}{d\omega}$, προκύπτει ότι:

$$f_3(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(y) f_1(\omega - y) dy \quad (3.13)$$

ή

$$f_3(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x) f_2(\omega - x) dx \quad (3.14)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, λοιπόν, είναι δυνατός ο υπολογισμός της Συνάρτησης Πυκνότητας Πιθανότητας του αθροίσματος 2 τυχαίων μεταβλητών. Η συγκεκριμένη πράξη ονομάζεται συνέλιξη και η μορφή της είναι:

$$f_3(\omega) = f_1(x) * f_2(y) \quad (3.15)$$

Στην περίπτωση που έχουμε R ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές, τότε:

$$W_R = \sum_{r=1}^R X_r \quad (3.16)$$

και

$$f_3(\omega) = f_1(x_1) * f_2(x_2) * \dots f_r(x_r) \dots f_R(x_R) \quad (3.17)$$

Ωστόσο, η συνέλιξη των Σ.Π.Π των μεταβλητών εισόδου παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες κυρίως λόγω:

- Της μη γραμμικότητας των εξισώσεων ροής φορτίου
- Συνήθως οι μεταβλητές εισόδου σε διαφορετικούς ζυγούς του συστήματος δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους ούτε συνδέονται με γραμμική εξάρτηση.

Για τους παραπάνω λόγους, η εφαρμογή της αναλυτικής μεθόδου για την πιθανοτική ροή φορτίου απαιτεί να γίνουν κάποιες παραδοχές-υποθέσεις. Συγκεκριμένα, υποθέτουμε:

- Γραμμικότητα των εξισώσεων ροής φορτίου
- Απόλυτη ανεξαρτησία των μεταβλητών ή γραμμική συσχέτιση τους
- Κανονική κατανομή για το φορτίο
- Σταθερή διαμόρφωση του συστήματος και των παραμέτρων που εμπλέκονται στην ανάλυση.

Η γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής φορτίου πραγματοποιείται με τη χρήση του αναπτύγματος Taylor. Οι εξισώσεις ροής φορτίου έχουν τη γενική μορφή:

$$H = f(G) \quad (3.18)$$

όπου G το διάνυσμα των καταστάσεων του συστήματος και H το διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τις υποθέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι εξισώσεις ροής φορτίου γραμμικοποιούνται γύρω από τη μέση ή αναμενόμενη τιμή του διανύσματος G με το ανάπτυγμα Taylor πρώτης τάξης. Έτσι, η εξίσωση $H = f(G)$ παίρνει τη γραμμικοποιημένη μορφή:

$$G \approx \hat{G} + A (H - \bar{H}) \quad (3.19)$$

όπου :

$$A = \left(\frac{\partial f}{\partial G} \Big|_{G=\hat{G}} \right)^{-1} \quad (3.20)$$

Συχνά, στη μοντελοποίηση της πιθανοτικής ροής, το διάνυσμα A αναφέρεται και ως πίνακας συντελεστών ευαισθησίας.

Στη ντετερμινιστική μέθοδο ροής φορτίου, κατά την επίλυση της μεθόδου Newton-Raphson, η Ιακωβιανή μήτρα A υπολογίζεται για κάθε επανάληψη έως ότου τα σφάλματα των αποτελεσμάτων είναι μικρότερα από συγκεκριμένες τιμές. Αντιθέτως, στην πιθανοτική ροή φορτίου η μήτρα A υπολογίζεται μόνο μια φορά για κάθε κατάσταση ροής φορτίου. Επομένως, τα σφάλματα που προκύπτουν από τη γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής φορτίου θα πρέπει να προσεχθούν ιδιαίτερα και να ληφθούν υπόψη.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι μετά τη γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής φορτίου, οι καταστάσεις του συστήματος εκφράζονται ως γραμμικός συνδυασμός των εισόδων.

Τέλος, έχοντας υποθέσει πλήρη ανεξαρτησία μεταξύ των μεταβλητών, οι ζητούμενες Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας των καταστάσεων του συστήματος είναι:

$$f(G_i) = f(H_1 - \bar{H}_1) * f(Y_2 - \bar{Y}_2) * \dots * f(Y_n - \bar{Y}_n) \quad (3.21)$$

Συνοψίζοντας τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω, μπορούμε να πούμε ότι με δοσμένη την πιθανοτική περιγραφή του H εξάγεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για το G . Το τίμημα από την ικανότητα να εξάγουμε την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της G είναι η απλοποίηση των εξισώσεων ροής φορτίου (και επομένως πιθανώς λιγότερο ακριβή διανύσματα λύσης). Επίσης, ήταν απαραίτητο να θεωρήσουμε ότι οι εγχύσεις των ισχύων είναι ανεξάρτητες έτσι ώστε να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε την τεχνική της συνέλιξης.

3.2.3 Στοχαστική Ροή Φορτίου

Η στοχαστική και η πιθανοτική ροή φορτίου αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της ροής φορτίου με το ίδιο σκεπτικό. Άλλωστε, η στοχαστική μέθοδος προέκυψε σε μια προσπάθεια εξέλιξης της πιθανοτικής.

Το 1975 οι Dorazo, Klittin και Sasson αναπτύσσουν μια μέθοδο, την οποία ονόμασαν «Στοχαστική Ροή Φορτίου», κύριο σημείο της οποίας είναι η χρήση του πίνακα συμμεταβλητότητας, ο οποίος είχε ήδη εφαρμοστεί με επιτυχία στο πρόβλημα εκτίμησης κατάστασης.

Η παραδοχή που γίνεται στην περίπτωση της στοχαστικής ανάλυσης είναι ότι οι συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται ακολουθούν κανονική κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα και τα αποτελέσματα αντιπροσωπεύονται μόνο από τις αναμενόμενες τιμές και τις τυπικές αποκλίσεις τους.

Εν ολίγοις, σκοπός της Στοχαστικής Ροής Φορτίου είναι η εύρεση του πίνακα συσχέτισης και η καλύτερη δυνατή εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης x και των ροών της γραμμής.

3.2.3.1 Εξισώσεις Στοχαστικής μεθόδου

Θεωρούμε, πάλι, το σύνολο των μη γραμμικών εξισώσεων της ροής φορτίου:

$$y_i = f_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n), \quad i = 1, \dots, n \quad (3.22)$$

ή στη γενική μορφή:

$$y = f(x) \quad (3.23)$$

Το διάνυσμα y περιλαμβάνει τις μεταβλητές των οποίων είναι γνωστές οι τιμές ενώ το διάνυσμα x αναφέρεται στα άγνωστα μεγέθη.

Συγκεκριμένα, οι μεταβλητές που αποτελούν το διάνυσμα x είναι τα μέτρα των τάσεων στους ζυγούς φορτίου και τα ορίσματα (γωνίες) των τάσεων στους ζυγούς φορτίου και τους ζυγούς παραγωγής. Όσον αφορά το διάνυσμα y , περιλαμβάνει τις ενεργές ισχύεις παραγωγής των ζυγών PV και τις ενεργές και άεργες ισχύεις φορτίου στους ζυγούς PQ.

Οι μεταβλητές του διανύσματος y χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές εισόδου ενώ οι μεταβλητές του x ως μεταβλητές κατάστασης.

Για την υλοποίηση της στοχαστικής ροής φορτίου, αρχικά είναι απαραίτητος ένας αριθμός μετρήσεων για τις τιμές των μεταβλητών y .

Οι τυχαίες μεταβλητές y θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές με κανονικές κατανομές πιθανότητας, γνωστές αναμενόμενες τιμές:

$$E(y) = \bar{y} \quad (3.24)$$

και γνωστές συνδιακυμάνσεις:

$$E(y - \bar{y})(y - \bar{y})^T = V \quad (3.25)$$

Τα παραπάνω μεγέθη, δηλαδή οι αναμενόμενες τιμές των τυχαίων μεταβλητών y και οι συνδιακυμάνσεις τους προκύπτουν από τις διαθέσιμες παρατηρήσεις-μετρήσεις για κάθε μεταβλητή.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, σε ένα σύστημα με έντονη αβεβαιότητα, οι τιμές των διαφόρων μεγεθών του μεταβάλλονται έντονα, κάτι που καθιστά δυσκολότερη τη μελέτη του συστήματος.

Έχοντας, λοιπόν, διαθέσιμες μια σειρά από παρατηρήσεις, εξάγονται οι αναμενόμενες τιμές και οι συνδιακυμάνσεις των γνωστών μεταβλητών, μεγέθη τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως βάση για τον υπολογισμό μεγεθών που σχετίζονται με τις άγνωστες τυχαίες μεταβλητές του συστήματος.

Πρώτος στόχος της στοχαστικής μεθόδου είναι ο υπολογισμός των αναμενόμενων τιμών:

$$E(x) = \bar{x} \quad (3.26)$$

και των ορίων εμπιστοσύνης των τιμών του x .

Από τις σχέσεις που παρατέθηκαν παραπάνω προκύπτουν τα εξής:

$$y = E[f(x)] \quad (3.27)$$

$$V = E\{f(x) - E[f(x)]\} \{f(x) - E[f(x)]\}^T \quad (3.28)$$

Οι παραπάνω σχέσεις αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό των ζητούμενων μεγεθών.

Για τις μεταβλητές y (δηλαδή για την ενεργό και άεργο ισχύ στους ζυγούς) υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις για κάποιο χρονικό διάστημα. Από αυτές τις μετρήσεις προκύπτουν οι αναμενόμενες τιμές τους και οι διακυμάνσεις τους.

Για την εύρεση των αναμενόμενων τιμών του διανύσματος x , θα χρησιμοποιηθούν οι αναμενόμενες τιμές του y , και ο υπολογισμός θα γίνει μέσω της σχέσης:

$$\hat{x} = J^{-1}\Delta y + x_0 \quad (3.29)$$

όπου x_0 το διάνυσμα των αναμενόμενων σφαλμάτων και J ο Ιακωβιανός πίνακας των εξισώσεων ροής φορτίου:

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

όπου:

$$\triangleright [J1^{(n)}] = \left[\left(\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j} \right)^{(n)} \right], i, j \in \{\text{Ζυγοί PV και PQ}\} \quad (3.31)$$

$$\triangleright [J2^{(n)}] = \left[\left(\frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_j} \right)^{(n)} \right], i \in \{\text{Ζυγοί PV και PQ}\}, j \in \{\text{Ζυγοί PQ}\} \quad (3.32)$$

$$\triangleright [J3^{(n)}] = \left[\left(\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j} \right)^{(n)} \right], i \in \{\text{Ζυγοί PQ}\}, j \in \{\text{Ζυγοί PV και PQ}\} \quad (3.33)$$

$$\triangleright [J4^{(n)}] = \left[\left(\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_j} \right)^{(n)} \right], i, j \in \{ \text{Ζυγοί PQ} \} \quad (3.34)$$

Ο υπολογισμός των αναμενόμενων τιμών των τάσεων (δηλαδή του πίνακα χ) γίνεται με τη χρήση κάποιων από τις ντετερμινιστικές μεθόδους θέτοντας ως τιμές εισόδου τις αναμενόμενες τιμές των μεταβλητών y .

Η σημαντικότερη, ωστόσο, πληροφορία που λαμβάνουμε εφαρμόζοντας τη στοχαστική ροή φορτίου είναι οι τιμές των ορίων εμπιστοσύνης για κάθε μεταβλητή του διανύσματος χ .

Για τον υπολογισμό των ορίων εμπιστοσύνης, αρχικά υπολογίζονται οι διασπορές των μεταβλητών χ μέσω της σχέσης:

$$\sigma_x^2 = \text{diag}\{ (J^T V^{-1} J)^{-1} \} \quad (3.35)$$

όπου J ο Ιακωβιανός πίνακας και V ο πίνακας διακυμάνσεων των μεταβλητών y .

Τα όρια εμπιστοσύνης είναι:

$$x_t = \hat{x} \pm \sigma_x \quad (3.36)$$

και υπάρχουν 99% πιθανότητες οι πραγματικές τιμές να ανήκουν στο παραπάνω διάστημα.

Με την παραπάνω διαδικασία έχουν υπολογιστεί οι αναμενόμενες τιμές και τα όρια εμπιστοσύνης για τα μέτρα των τάσεων στους ζυγούς φορτίου και για τα ορίσματα των τάσεων σε όλους τους ζυγούς εκτός του ζυγού αναφοράς.

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη γίνεται ο υπολογισμός των αναμενόμενων τιμών και των ορίων εμπιστοσύνης για τις ροές ισχύος στις γραμμές του συστήματος.

Θεωρώντας το διάνυσμα z περιλαμβάνει τις ροές ισχύος των γραμμών, οι αναμενόμενες τιμές προκύπτουν από τον ακόλουθο τύπο:

$$\hat{z} = K \Delta \hat{x} + z_0 \quad (3.37)$$

όπου K ο Ιακωβιανός πίνακας των ροών των γραμμών ως προς τα μεγέθη του διανύσματος χ πάνω στις αναμενόμενες τιμές του χ :

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\Delta Z_1}{\Delta X_1} & \dots & \frac{\Delta Z_1}{\Delta X_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Delta Z_n}{\Delta X_1} & \dots & \frac{\Delta Z_n}{\Delta X_n} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Συγκεκριμένα η μεταβλητή Z αντιπροσωπεύει την ροή ισχύος πάνω στις γραμμές και το διάνυσμα X το διάνυσμα των άγνωστων μεγεθών γωνιών και τάσεων. Άρα ο πίνακας που προκύπτει είναι:

$$K = \left[\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_2} \quad \dots \quad \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_n} \mid \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_2} \quad \dots \quad \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_n} \right] \quad (3.39)$$

Το z_0 , κατ'αναλογία με την προηγούμενη περίπτωση, είναι το διάνυσμα των σφαλμάτων των ροών μεταξύ των ζυγών.

Όσον αφορά τα όρια εμπιστοσύνης, προκύπτουν ως εξής:

$$z_t = \hat{z} \pm 3\sigma_z \quad (3.40)$$

όπου:

$$\sigma_z^2 = \text{diag}\{K(J^T V^{-1} J)^{-1} K^T\} \quad (3.41)$$

3.2.3.2 Στοχαστική μέθοδος με χρήση αναπτύγματος Taylor δευτέρας τάξης

Για τον υπολογισμό της αναμενόμενης τιμής της συνάρτησης $f(x)$ δηλ της $E[f(x)]$

χρησιμοποιούμε το ανάπτυγμα Taylor της $f(x)$ γύρω από τη μέση τιμή \bar{x} :

$$y_i = f_i(\bar{x}) + A_i \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T H_i \Delta x \quad (3.42)$$

όπου :

A_i = πίνακας που περιέχει τις πρώτες παραγώγους της συνάρτησης $f_i(x)$

H_i = ο Εσσιανός πίνακας, ο οποίος περιέχει τις δεύτερες μερικές παραγώγους της $f_i(x)$ και

$$\Delta x = [x_i - \bar{x}_i] \quad (3.43)$$

Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας υπολογισμού, εισάγουμε την εξίσωση:

$$\Delta x^T H_i \Delta x = B_i \Delta \xi \quad (3.44)$$

Όπου

$$B_i = [h_{i11} \dots h_{inm}] \quad (3.45)$$

ένας πίνακας-γραμμή που αποτελείται από τα στοιχεία της αντίστοιχης γραμμής του Εσσιανού πίνακα και

$$\Delta \xi = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

ένας πίνακας στήλη που αποτελείται από τις γραμμές του πίνακα

$$\Delta x \Delta x^T$$

Έτσι, το ανάπτυγμα Taylor που αναφέρθηκε παραπάνω γράφεται:

$$y_i = f_i(\bar{x}) + A_i \Delta x + \frac{1}{2} B_i \Delta \xi \quad (3.47)$$

Ή στη γενική του μορφή:

$$y = f(\bar{x}) + A \Delta x + \frac{1}{2} B \Delta \xi \quad (3.48)$$

Όπου

$$A = \begin{bmatrix} A_i \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

και

$$B = \begin{bmatrix} B_i \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Ο πίνακας A έχει διαστάσεις $n \times n$ και ο πίνακας B διαστάσεις $n \times n^2$

Επειδή για την αναμενόμενη τιμή του Δx ισχύει:

$$E(\Delta x) = 0 \quad (3.51)$$

από το ανάπτυγμα Taylor της $y=f(x)$ προκύπτει ότι:

$$\bar{y} = f(\bar{x}) + \frac{1}{2} B \lambda \quad (3.52)$$

όπου το λ είναι ένα διάνυσμα των συνδιακυμάνσεων των μεταβλητών x , οι τιμές του οποίου έχουν προκύψει από τις γραμμές του πίνακα συνδιακυμάνσεων M_y τοποθετημένες η μία μετά την άλλη.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, λοιπόν, έχουμε:

$$M_y = E \left\{ A \Delta x + \frac{1}{2} B (\Delta \xi - \lambda) \right\} \left\{ A \Delta x + \frac{1}{2} B (\Delta \xi - \lambda) \right\}^T = E \{ A \Delta x \Delta x^T A^T + A \Delta x (\Delta \xi - \lambda)^T B^T + \frac{1}{4} B (\Delta \xi - \lambda) (\Delta \xi - \lambda)^T B^T \} \quad (3.53)$$

Αναφέρθηκε και αρχικά ότι για την υλοποίηση της στοχαστικής ροής φορτίου γίνεται η υπόθεση ότι έχουμε κανονική κατανομή πιθανότητας, κάτι το οποίο σημαίνει ότι οι ροπές τρίτης τάξης των μεταβλητών που ακολουθούν την κανονική κατανομή είναι μηδενικές. Επομένως ισχύουν:

$$E(\Delta x \Delta \xi^T) = 0 \quad (3.54)$$

Και

$$E(\Delta x \lambda^T) = 0 \quad (3.55)$$

Καταλήγουμε, λοιπόν, στην εξής εξίσωση:

$$M_y = AM_x A^T + \frac{1}{4} B(N_x - \lambda \lambda^T) B^T \quad (3.56)$$

όπου :

$$M_x = E(\Delta x \Delta x^T) \quad (3.57)$$

ο πίνακας συνδιακύμανσης των μεταβλητών x , διαστάσεων $n \times n$ και

$$N_x = E(\Delta \xi \Delta \xi^T) \quad (3.58)$$

ο πίνακας ροπών τέταρτης τάξης των μεταβλητών x , διαστάσεων $n^2 \times n^2$

Για μια κανονική κατανομή, όπως έχουμε υποθέσει στην περίπτωση μας, οι ροπές τέταρτης τάξης μπορούν να προκύψουν από τις ροπές δευτέρας τάξης ως εξής:

$$n_{ijkl} = m_{ij} m_{kl} + m_{ik} m_{jl} + m_{il} m_{jk} \quad (3.59)$$

όπου n_{ijkl} μια ροπή τέταρτης τάξης των μεταβλητών $x_i x_j x_k x_l$ και

$m_{ij} m_{kl} m_{ik} m_{jl} m_{il} m_{jk}$ οι συνδιακυμάνσεις των αντίστοιχων ζευγών των μεταβλητών $x_i x_j x_k x_l$ (ροπές δευτέρας τάξης).

Συνοψίζοντας τα προηγούμενα, οι σχέσεις που έχουν προκύψει για το πώς συνδέονται οι αναμενόμενες τιμές και οι συνδιακυμάνσεις των μεταβλητών y με τα αντίστοιχα μεγέθη των μεταβλητών x είναι οι:

$$\bar{y} = f(\bar{x}) + \frac{1}{2} B \lambda \quad (3.60)$$

$$M_y = AM_x A^T + \frac{1}{4} B(N_x - \lambda \lambda^T) B^T \quad (3.61)$$

Επειδή οι παραπάνω εξισώσεις είναι μη γραμμικές, για τη λύση του προβλήματος θα χρησιμοποιηθούν επαναληπτικοί μέθοδοι. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Θωρούμε προσεγγιστικές τιμές για τις αναμενόμενες τιμές των μεταβλητών x : \bar{x}_k όπου k ο αριθμός της επανάληψης στην οποία βρισκόμαστε.
- Υπολογίζονται οι πίνακες πρώτων και δευτέρων παραγώγων: A_k και B_k
- Υπολογίζονται οι συνδιακυμάνσεις των μεταβλητών x :

$$M_{x_{k+1}} = A_k^{-1} \left\{ M_y - \frac{1}{4} B_k [N_{xk} - \lambda_k \lambda_k^T] B_k^T \right\} A_k^{T-1} \quad (3.62)$$

Στην πρώτη επανάληψη, δηλ για $k=1$, θεωρείται ότι:

$$B_k [N_{xk} - \lambda_k \lambda_k^T] B_k^T = 0 \quad (3.63)$$

- Υπολογίζονται νέες προσεγγιστικές τιμές για τις αναμενόμενες τιμές των μεταβλητών x :

$$\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + A_k^{-1} [f(\bar{x})_k + \frac{1}{2} B_k \lambda_{k+1} - \bar{y}] \quad (3.64)$$

- Οι υπολογισμοί συνεχίζονται μέχρι να φτάσουμε σε 2 επιτυχείς επαναλήψεις, όπου οι προσεγγίσεις για τις μεταβλητές x θα έχουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά ακρίβειας.

Τα παραπάνω σχετίζονται με τις αναμενόμενες τιμές των μεταβλητών του διανύσματος x . Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο καταλήγουμε και στις αναμενόμενες τιμές του διανύσματος z , δηλαδή των ρών ισχύος στις γραμμές του συστήματος.

Μεταξύ των τάσεων στους ζυγούς και των ισχύων στους κλάδους (εγχύσεις ισχύος μεταξύ των ζυγών) υπάρχει μια τετραγωνική εξάρτηση:

$$z = g(x) \quad (3.65)$$

Ωστόσο, οι αναμενόμενες τιμές των ισχύων στους κλάδους υπολογίζονται κατ' ευθείαν από την εξίσωση:

$$\bar{z} = g(\bar{x}) + \frac{1}{2} D \lambda \quad (3.66)$$

Όπου D ο πίνακας των δεύτερων παραγώγων της εξίσωσης $z = g(x)$.

Οι συνδιακυμάνσεις των ροών ισχύος των κλάδων υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$M_y = C M_x C^T + \frac{1}{4} D (N_x - \lambda \lambda^T) D^T \quad (3.67)$$

όπου C η Ιακωβιανή της εξίσωσης $z = g(x)$.

3.2.4 Προσομοίωση Monte Carlo

Πριν την έλευση των υπολογιστών, μοναδικός τρόπος μελέτης ενός συστήματος ήταν ο πειραματικός. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη λειτουργία ενός συστήματος, παραμέτρους που το αφορούν και άλλα θέματα ο επιστήμονας ήταν αναγκασμένος να καταφύγει σε πειραματικές μεθόδους, κάτι το οποίο εκτός από επίπονο και χρονοβόρο παρουσίαζε και σημαντικές ελλείψεις όπως αδυναμία για ακριβή πρόβλεψη μελλοντικών καταστάσεων του συστήματος.

Πέραν τούτου, για κάποια συστήματα ήταν αδύνατη η πειραματική αναπαράστασή τους για διάφορους λόγους μεταξύ των οποίων ακόμα και πιθανή απαγόρευση τη διεθνή νομοθεσία. Για παράδειγμα, η πειραματική έρευνα μιας πυρηνικής έρευνας θα ήταν αδύνατη λόγω των απαγορεύσεων που επιβάλλει ο νόμος. Ωστόσο, τα αποτελέσματα μιας τέτοιας έρευνας είναι προφανές ότι θα ήταν χρήσιμα.

Η αδυναμία λοιπόν για πειραματική προσέγγιση πολλών συστημάτων σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των υπολογιστών, έδωσε ώθηση για μια εναλλακτική προσέγγιση και συγκεκριμένα για την ανάπτυξη των προσομοιώσεων.

Οι προσομοιώσεις επιχειρούν να μιμηθούν ή να αντιγράψουν τη συμπεριφορά ενός συστήματος με στόχο να λάβουν ένα στατιστικό δείγμα πιθανών αποτελεσμάτων. Αυτές οι μέθοδοι είναι χρήσιμες όταν καλούμαστε να μελετήσουμε:

- Μη ντετερμινιστικές (στοχαστικές) διαδικασίες
- Ντετερμινιστικά συστήματα που είναι πολύ πολύπλοκα δηλαδή συστήματα για τα οποία οι αναλυτικές λύσεις είναι ανέφικτες.
- Συστήματα τα οποία δεν υπάρχουν ακόμα κι επιθυμούμε να κάνουμε σύγκριση εναλλακτικών σχεδίων.

Επιπλέον, μια στοχαστική προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση λύσεων που έχουν προκύψει από αναλυτικές μεθόδους. Για να είναι η δυνατή η πραγματοποίηση μιας στοχαστικής προσομοίωσης, υπάρχουν δύο βασικές απαιτήσεις:

1. Γνώση των σχετικών πιθανοτήτων κατανομής

2. Απόθεμα από τυχαίους αριθμούς έτσι ώστε να γίνουν τυχαίες επιλογές.

Η προσομοίωση είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και συνεχώς πιο δημοφιλής μέθοδος για τη μελέτη συστημάτων όπως αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Μια από τις δημοφιλέστερες τεχνικές προσομοίωσης είναι η προσομοίωση Monte Carlo. Η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί μια κατηγορία υπολογιστικών αλγορίθμων που χρησιμοποιείται ευρέως στην προσομοίωση της συμπεριφοράς ποικίλων συστημάτων, καθώς και σε άλλους υπολογισμούς. Διακρίνεται από τις υπόλοιπες τεχνικές προσομοίωσης λόγω του ότι είναι στοχαστική δηλαδή μη αιτιοκρατική. Βασίζεται στη χρήση τυχαίων αριθμών (ή πιο συχνά ψευδοτυχαίων αριθμών) που ακολουθούν μια προκαθορισμένη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας.

Στον «τυχαίο» χαρακτήρα αυτής της μεθόδου οφείλεται το όνομά της, κατ' αναλογία με τα παιχνίδια τύχης των οποίων η πρωτεύουσα του πριγκιπάτου του Μονακό ήταν το κέντρο την εποχή του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος Monte Carlo έχει ανάλογη λειτουργία με τη ρουλέτα, η οποία στην ουσία είναι μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.

Ο στόχος μιας προσομοίωσης Monte Carlo είναι να αναπαράγει αξιόπιστα τη συμπεριφορά ενός πραγματικού συστήματος. Σε κάθε μέθοδο τυχαίων αριθμών που στοχεύει την προσέγγιση της πραγματικότητας, οι αριθμοί που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να είναι τυχαίοι αριθμοί έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν τα τυχαία γεγονότα που διαδραματίζονται στο σύστημα που μελετούμε.

Με τη συγκεκριμένη μέθοδο μπορούμε να κάνουμε δειγματοληψία σε ένα μεγάλο σύστημα λαμβάνοντας έναν αριθμό τυχαίων αριθμών και αυτά τα δεδομένα μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε μετέπειτα για να περιγράψουμε το σύστημα ως ενιαίο.

3.2.4.1 Παραγωγή Τυχαίων αριθμών μέσω της συνάρτησης κατανομής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε προσομοίωση προϋποθέτει την παραγωγή μιας σειράς τυχαίων οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Χρειάζεται δηλαδή μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.

Μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών είναι αλγόριθμος (δηλ. προσδιοριστική διαδικασία) που μπορεί να παράγει σειρά αριθμών που φαίνεται να έχουν τις ιδιότητες σειράς τυχαίων αριθμών. Ο πρώτος «τυχαίος» αριθμός αυτής της σειράς παράγεται με βάση μία αρχική τιμή (παράμετρο του αλγορίθμου) που ονομάζεται **σπόρος**.

Οι αριθμοί που παράγονται στην πραγματικότητα δεν είναι τυχαίοι: για τον ίδιο σπόρο θα πάρουμε τον ίδιο «τυχαίο» αριθμό, γι αυτό και οι αριθμοί που παράγονται ονομάζονται ψευδοτυχαίοι.

Η συνάρτηση κατανομής F_X μιας τυχαίας μεταβλητής είναι μια αντιστρέψιμη συνάρτηση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0,1]$.

Πάνω σε αυτή την ιδιότητα βασίζεται η δειγματοληψία από κάθε τυχαία μεταβλητή στη μέθοδο Monte Carlo.

Για κάθε r στο διάστημα $[0,1]$ ισχύει:

$$P(F_X(x) \leq r) = P(X \leq F_X^{-1}(r)) = F_X[F_X^{-1}(r)] = r \quad (3.68)$$

Επομένως, αν U είναι η ομοιόμορφη κατανομή, ισχύει:

$$F_X(X) = U \Leftrightarrow X = F_X^{-1}(U) \quad (3.69)$$

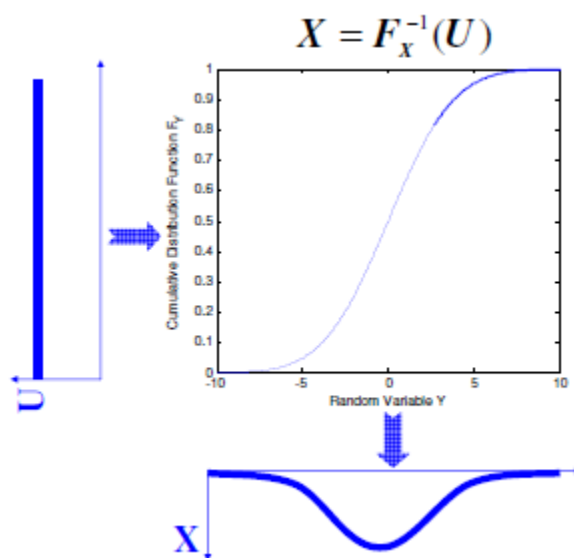
Για να καταλήξουμε στην παραγωγή μιας σειράς τυχαίων αριθμών από μια τυχαία μεταβλητή X της οποίας γνωρίζουμε την συνάρτηση κατανομής, αρχικά γίνεται δειγματοληψία από την τυχαία μεταβλητή U . Μεταξύ των τυχαίων αριθμών που

παρήχθησαν από την U και των τυχαίων αριθμών που επιθυμούμε να λάβουμε από την Τ.Μ X υπάρχει μια αντιστοίχιση.

Συγκεκριμένα, έστω u ένας τυχαίος αριθμός στο διάστημα $[0,1]$ που παρήχθη από δειγματοληψία της τυχαίας μεταβλητής U . Ο αντίστοιχος τυχαίος αριθμός για τη μεταβλητή X είναι ο :

$$x = F_x^{-1}(u) \quad (3.70)$$

Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.3 Δειγματοληψία μέσω της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής

3.2.4.2 Ακρίβεια της μεθόδου Monte Carlo

Η προσομοίωση Monte Carlo είναι μια συνθετική διαδικασία δειγματοληψίας που πραγματοποιείται από ψηφιακό υπολογιστή. Σε οποιοδήποτε δειγματοληπτικό πείραμα, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αυξάνεται με τον αριθμό των δειγμάτων, επομένως η ακρίβεια της μεθόδου Monte Carlo θα εξαρτάται από τον αριθμό των προσομοιώσεων. Θεωρούμε λοιπόν, το συγκεκριμένο πρόβλημα υπολογισμού της μέσης τιμής της εξαρτημένης μεταβλητής Y .

Υποθέτουμε ότι παρήγαμε n τιμές y_1, \dots, y_n της Y και υπολογίσαμε την μέση τιμή του δείγματος:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.71)$$

Η μέση τιμή του δείγματος είναι μια τυχαία μεταβλητή και πρέπει η διακύμανσή της να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Η διασπορά της \bar{y} δίνεται ως εξής:

$$E\left[(\bar{y} - \mu_Y)^2\right] = \frac{\sigma_Y^2}{n} \quad (3.72)$$

όπου μ_Y και σ_Y είναι η μέση τιμή του πληθυσμού και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα.

Παρατηρούμε, ότι το σφάλμα στον υπολογισμό της μέσης τιμής είναι αντιστρόφως ανάλογο του \sqrt{n} , και για να βελτιώσουμε την εκτίμηση κατά ένα παράγοντα της τάξης του 2, θα πρέπει να αυξήσουμε το μέγεθος του δείγματος κατά 4.

Ο Shooman (1968) απέδειξε ότι στις μελέτες αξιοπιστίας των συστημάτων, ο απαιτούμενος αριθμός των προσομοιώσεων ώστε να επιτευχθεί ένας δεδομένος βαθμός ακρίβειας, είναι ανεξάρτητος του μεγέθους του συστήματος, αλλά εξαρτάται από το βαθμό αξιοπιστίας του συστήματος που μελετάται. Προσεγγίζοντας την διωνυμική κατανομή με την κανονική, ανέπτυξε την ακόλουθη έκφραση για το εκατοστιαίο σφάλμα:

$$\pm \%error = 200 \sqrt{\frac{1 - p_F}{np_F}} \quad (3.73)$$

όπου p_F είναι η υπολογισθείσα πιθανότητα σφάλματος και n το μέγεθος του δείγματος. Η εξίσωση (3.73) παρέχει μια κλίμακα όπου το ποσοστό του σφάλματος της πιθανότητας αποτυχίας, μπορεί να αναμένεται να βρεθεί στο 95% του χρόνου.

Ο Wang (1989) ερεύνησε την ακρίβεια της προσομοίωσης Monte Carlo για την εκτίμηση του μέσου χρόνου λειτουργίας των μονάδων παραγωγής. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι ανωτέρω εκτιμήσεις μπορούν να προσεγγιστούν από κανονικές κατανομές, με τον συντελεστή διακύμανσης να προσεγγίζεται από τον ακόλουθο εμπειρικό τύπο:

$$\delta = 0.007 p \sqrt{r} + 0.045 \quad (3.74)$$

όπου p η πιθανότητα σφάλματος σε μια μονάδα και r ο μέσος χρόνος επιδιόρθωσης (σε ώρες). Επίσης, απέδειξε, ότι τα προσεγγιστικά επιθυμητά όρια μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

Έστω : \bar{X} = η μέση τιμή των n μηνιαίως προσομοιωμένων χρόνων λειτουργίας

S = η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής

Τότε από την εξίσωση (3.74) έχουμε:

$$S = (\bar{X}/\sqrt{n})(0.07\sqrt{r} + 0.045) \quad (3.75)$$

Για ένα σταθμό παραγωγής με m ανεξάρτητες μονάδες, η μέση τιμή της παραγωγής του σταθμού είναι ίση με το άθροισμα όλων των μέσων τιμών όλων των μονάδων του σταθμού, η τυπική απόκλιση είναι ίση με την ρίζα του αθροίσματος των διασπορών, και το 90% των διαστημάτων εμπιστοσύνης του σταθμού παραγωγής μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (3.75).

3.2.4.3 Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo στη Ροή φορτίου

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η προσομοίωση Monte Carlo χρησιμοποιείται για την παραγωγή ψευδοτυχαίων τιμών για την παραγωγή και το φορτίο σε κάθε ζυγό.

Εν τέλει, καταλήγουμε πάλι στην ντετερμινιστική μέθοδο κι επιλύονται ντετερμινιστικά οι εξισώσεις ροής φορτίου, με τη διαφορά ότι δεν απαιτείται η εισαγωγή των ακριβών τιμών για τα φορτία και την παραγωγή – κάτι που θα καθιστούσε τη διαδικασία ιδιαίτερος χρονοβόρα- αλλά με βάση τη συνάρτηση κατανομής των 2 αυτών τυχαίων μεταβλητών, έχει γίνει αυτόματα η παραγωγή ενός συνόλου τιμών. Φυσικά, όσο μεγαλύτερο είναι το δείγμα που έχουμε λάβει, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια θα έχουν και τα τελικά αποτελέσματα.

Η μέθοδος Monte Carlo είναι, λοιπόν, μια μέθοδος προσομοίωσης η οποία βασίζεται στην παραγωγή ψευδο-τυχαίων αριθμών για τα αβέβαια μεγέθη του συστήματος (δηλαδή για τα φορτία και την παραγωγή) με βάση τις συναρτήσεις κατανομής των μεγεθών αυτών. Για κάθε συνδυασμό τυχαίων τιμών φορτίου-παραγωγής (κάθε συνδυασμός αντιστοιχεί σε διαφορετική κατάσταση του συστήματος) πραγματοποιείται προσομοίωση, από την οποία

προκύπτουν οι τιμές των αγνώστων μεγεθών για τη συγκεκριμένη κατάσταση του συστήματος.

Οι εξισώσεις , δηλαδή, που χρησιμοποιούνται σε κάθε προσομοίωση είναι οι μη-γραμμικές εξισώσεις της ντετερμινιστικής ροής φορτίου.

Λόγω ,λοιπόν, του ότι κατά την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo γίνεται χρήση των ακριβών μη-γραμμικών εξισώσεων, τα αποτελέσματά της θεωρούνται ακριβή. Γι αυτό,άλλωστε, συχνά, άλλες μέθοδοι πιθανοτικής ροής, που χρησιμοποιούν απλοποιημένες εξισώσεις, κάνουν χρήση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων Monte Carlo προκειμένου να τα συγκρίνουν με τα δικά τους αποτελέσματα.

Για την παραγωγή των δειγμάτων είναι απαραίτητη η γνώση:

- Των περιθώριων κατανομών των φορτίων και των παραγωγών
- Των συσχετίσεων μεταξύ φορτίων-φορτίων, παραγωγών-παραγωγών και φορτίων-παραγωγών.

Αναλυτικά οι δομές συσχέτισης θα αναπτυχθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

4

Χρήση μοντέλων Στοχαστικής συσχέτισης για τη μοντελοποίηση της Αβεβαιότητας των Σ.Η.Ε

4.1 Μελέτη συσχετισμένων μεταβλητών με μη κανονικές κατανομές

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφηκαν οι βασικές έννοιες της συσχέτισης τυχαίων μεταβλητών. Σε αυτή την παράγραφο μελετάται η καταλληλότητα των 2 μέτρων συσχέτισης που παρουσιάστηκαν (Συντελεστής συσχέτισης του Pearson & Συντελεστής του Spearman) όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως μέτρα συσχέτισης:

- Μεταβλητών που ακολουθούν κανονικές κατανομές
- Μεταβλητών με μη κανονικές κατανομές

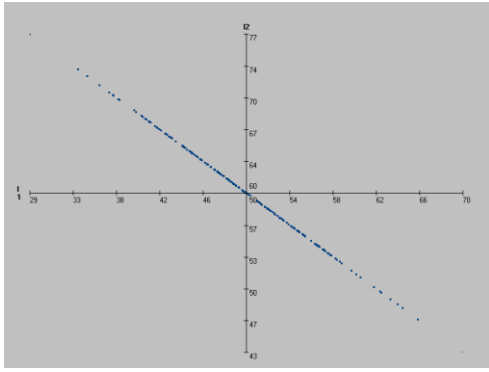
Για την παραπάνω μελέτη εξετάζεται η απλή περίπτωση της συσχέτισης 2 μεταβλητών.

4.1.1 Μελέτη της συσχέτισης δύο φορτίων με κανονικές κατανομές

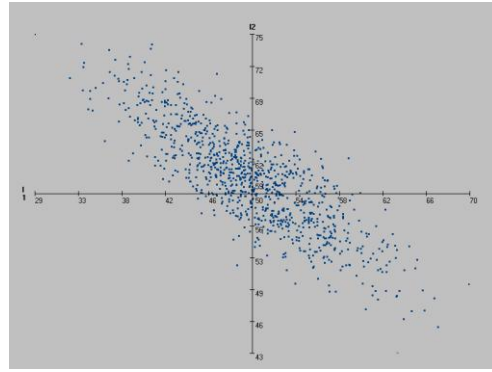
Θεωρούμε 2 τυχαίες μεταβλητές L_1 και L_2 οι οποίες αναπαριστούν 2 φορτία και ακολουθούν κανονικές κατανομές με τις εξής παραμέτρους:

- $\mu_1=50$ MW $\sigma_1=6$ MW
- $\mu_2=60$ MW $\sigma_2=5$ MW

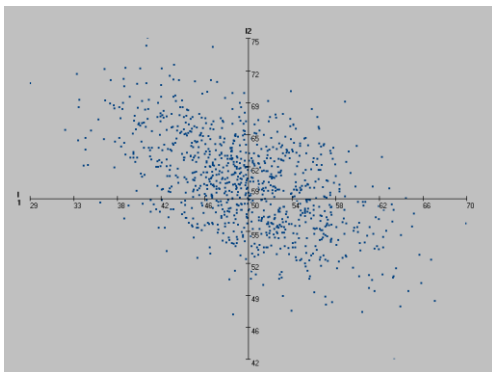
Διατηρώντας σταθερές τις παραπάνω κατανομές και μεταβάλλοντας τη μεταξύ τους συσχέτιση από $\rho=-1$ έως $\rho=1$ πραγματοποιήθηκε παραγωγή 1000 δειγμάτων για κάθε φορτίο και κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα διασποράς τα οποία παρουσιάζουν τις εξής μορφές:



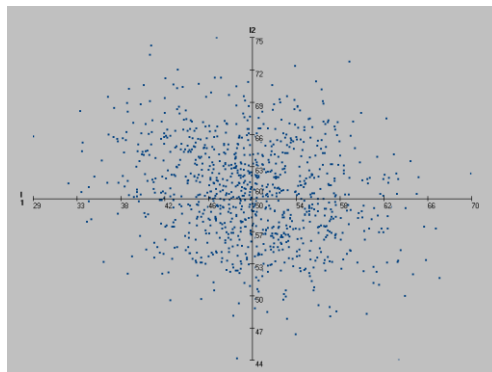
Σχήμα 4.1 Διασπορά φορτίων για $\rho = -1$



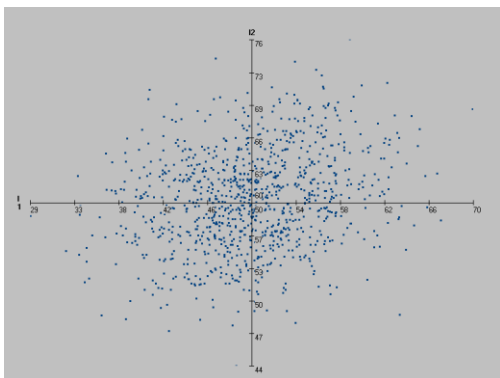
Σχήμα 4.2 Διασπορά φορτίων για $\rho = -0.8$



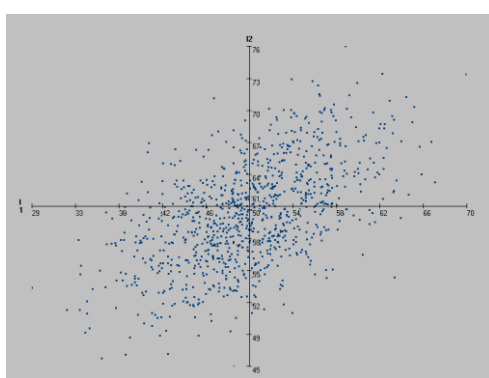
Σχήμα 4.3 Διασπορά φορτίων για $\rho = -0.5$



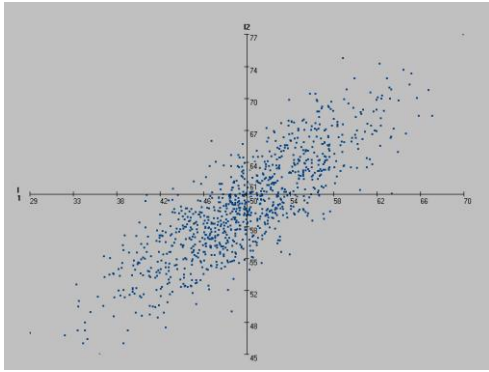
Σχήμα 4.4 Διασπορά φορτίων για $\rho = -0.2$



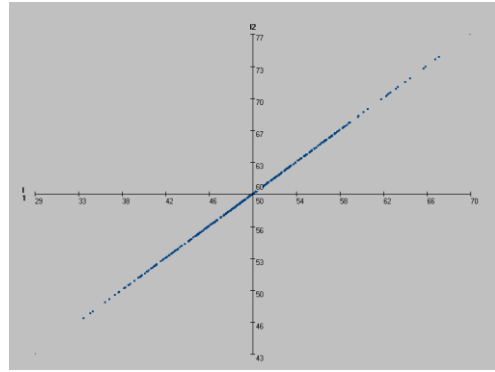
Σχήμα 4.5 Διασπορά φορτίων για $\rho = 0.2$



Σχήμα 4.6 Διασπορά φορτίων για $\rho = 0.5$



Σχήμα 4.7 Διασπορά φορτίων για $\rho=0.8$



Σχήμα 4.8 Διασπορά φορτίων για $\rho=1$

Παρατηρούμε ότι όσο η συσχέτιση πλησιάζει τις ακραίες τιμές ($\rho=-1$ και $\rho=1$) τόσο η σχέση μεταξύ των 2 μεταβλητών τείνει να γίνει γραμμική.

Στις περιπτώσεις της απόλυτης θετικής και της απόλυτης αρνητικής συσχέτισης η σχέση μεταξύ των 2 φορτίων είναι απολύτως γραμμική, κάτι το οποίο σημαίνει ότι εάν 2 φορτία με κανονικές κατανομές συσχετίζονται πλήρως, συνδέονται μέσω σχέσης της μορφής:

$$L_1 = a L_2 + \beta$$

Ωστόσο, προσεγγίζοντας ρεαλιστικά ένα Σύστημα Ηλεκτρικής ενέργειας, το μοντέλο των κανονικών κατανομών δεν ισχύει πάντα.

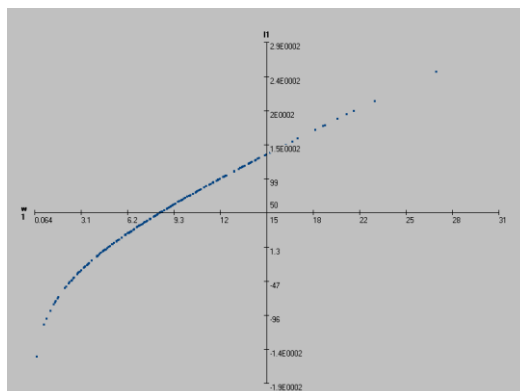
4.1.2 Μελέτη της συσχέτισης ενός φορτίου με κανονική κατανομή και μιας ταχύτητας ανέμου που ακολουθεί Weibull κατανομή

Στην προηγούμενη παράγραφο μελετήθηκε η συσχέτιση μεταξύ κανονικών μεταβλητών και ο τρόπος που αναπαρίσταται η πλήρης συσχέτιση (θετική και αρνητική) στα διαγράμματα διασποράς.

Ξεφεύγοντας από τις κανονικές κατανομές, επιχειρείται αντίστοιχη μελέτη για 2 μεταβλητές εκ των οποίων μόνο η μια ακολουθεί την κανονική κατανομή (φορτίο L_1 του προηγούμενου παραδείγματος) ενώ η άλλη αναπαριστά μια ταχύτητα ανέμου και ακολουθεί κατανομή Weibull με τις εξής παραμέτρους:

$$\beta_1 = 2.1 \text{ και } n_1 = 10$$

Το διάγραμμα διασποράς των 2 μεταβλητών που προέκυψε έχοντας θεωρήσει πλήρη θετική συσχέτιση είναι το εξής:



Σχήμα 4.9 Διασπορά φορτίου-ταχύτητας ανέμου για $\rho=1$

Παρατηρούμε ότι ενώ οι 2 μεταβλητές συσχετίζονται απόλυτα, δηλαδή οι μεταβολές της W_1 ακολουθούν τις μεταβολές της L_1 , στο διάγραμμα διασποράς δεν εμφανίζεται αυτή η συσχέτιση με τη μορφή απόλυτης γραμμικής συσχέτισης.

Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο λόγω της φύσης της κατανομής Weibull η οποία δεν επιτρέπει τη σύνδεση τέτοιου τύπου μεταβλητών μέσω γραμμικής σχέσης της μορφής:

$$W_1 = \alpha \cdot L_2 + \beta$$

Ο παραπάνω περιορισμός ισχύει για όλες τις μεταβλητές που ακολουθούν μη κανονικές κατανομές όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των Αιολικών παραγωγών οι οποίες ακολουθούν κατανομές οι οποίες είναι μη γραμμικός συνδυασμός κατανομών Weibull.

4.2 Απαλειφή της επίδρασης των περιθώριων κατανομών στη μοντελοποίηση συσχετισμένων τυχαίων μεταβλητών

Από τις εφαρμογές των προηγούμενων παραγράφων προέκυψε ότι ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson παρουσιάζει αδυναμίες όταν χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της συσχέτισης μεταξύ μη κανονικών τυχαίων μεταβλητών.

Παρατηρήθηκε ότι επηρεάζεται από τις περιθώριες κατανομές των τυχαίων μεταβλητών, κάτι το οποίο τον καθιστά ανεπαρκή για τη μοντελοποίηση πραγματικών συστημάτων, τα οποία κατά κανόνα δεν περιλαμβάνουν μόνο μεταβλητές με κανονικές κατανομές. Γι αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η υιοθέτηση ενός νέου μέτρου συσχέτισης, το οποίο δε θα επηρεάζεται από τις περιθώριες κατανομές των υπό μελέτη μεταβλητών.

4.2.1 Συσχέτιση Τάξης μεγέθους

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, πλέον χρησιμοποιείται η συσχέτιση τάξης μεγέθους (rank correlation) και ως μέτρο αυτής της συσχέτισης χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης του Spearman, ο οποίος δε χρησιμοποιεί τις τιμές των μεταβλητών αλλά τη «θέση κατάταξης» κάθε τιμής αν όλες οι τιμές ταξινομηθούν με αύξουσα σειρά.

Εξάλλου, στη μοντελοποίηση της στοχαστικής συσχέτισης, ενδιαφερόμαστε για το κατά πόσο οι υψηλές τιμές μιας μεταβλητής συνεπάγονται υψηλές τιμές για τις υπόλοιπες μεταβλητές του συστήματος και όχι για τη συσχέτιση μεταξύ των πραγματικών τιμών που λαμβάνουν οι μεταβλητές.

Για τον υπολογισμό αυτού του τύπου συσχέτισης, οι τιμές των μεταβλητών τοποθετούνται κατά αύξουσα σειρά και κατόπιν όλες οι τιμές αντικαθίστανται από τη θέση που κατέχουν ανάμεσα στις υπόλοιπες. Έπειτα, υπολογίζεται ο συντελεστής του Pearson όχι όμως για τις τιμές των μεταβλητών αλλά για τις «θέσεις» τους.

Ουσιαστικά, η σχέση που συνδέει τους 2 συντελεστές συσχέτισης είναι η:

$$\rho_r(X, Y) = \rho(F_X(X), F_Y(Y)) \quad (4.1)$$

όπου F_X και F_Y οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής των μεταβλητών X και Y αντίστοιχα.

Για την παραγωγή δειγμάτων για συσχετισμένες μεταβλητές με τυχαίες κατανομές ακολουθείται η διαδικασία της «αντιστροφής της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής».

Συγκεκριμένα, οι μετρηθείσες τιμές κάθε μεταβλητής αντικαθίστανται από τις αντίστοιχες τιμές της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής. Αυτές οι τιμές είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στο διάστημα $[0,1]$.

Έχοντας κάνει την παραπάνω μετατροπή, υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson και βάσει αυτού, πραγματοποιείται η παραγωγή δειγμάτων για τις συσχετισμένες μεταβλητές ομοιόμορφων κατανομών.

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, τα παραπάνω δείγματα μετατρέπονται στις πραγματικές τιμές της μεταβλητής μέσω της σχέσης:

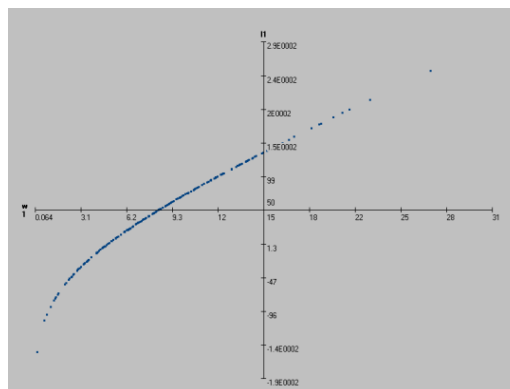
$$X = F_X^{-1}(U) \quad (4.2)$$

όπου X η τυχαία μεταβλητή, U η αντίστοιχη μεταβλητή ομοιόμορφης κατανομής και F_X η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της μεταβλητής X .

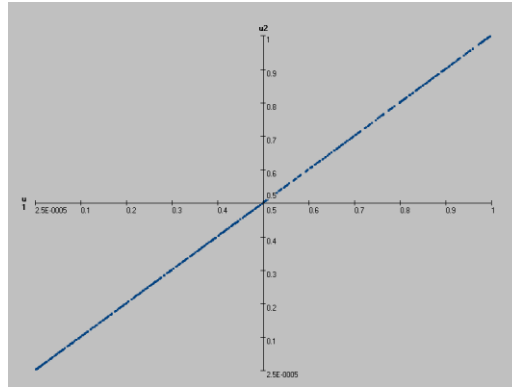
Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί τη βάση για τις προσομοιώσεις Monte Carlo και με αυτόν τον τρόπο οι περιθώριες κατανομές των υπό μελέτη μεταβλητών δεν επηρεάζουν το μοντέλο της συσχέτισης.

4.2.2 Εφαρμογή για μεταβλητές με μη κανονικές κατανομές

Προκειμένου να μελετηθεί η καταλληλότητα του νέου μέτρου συσχέτισης που περιγράφηκε, δημιουργήθηκε το διάγραμμα διασποράς για τις 2 μεταβλητές της παραγράφου 4.1.2 έχοντας θεωρήσει πλήρη συσχέτιση βάσει του συντελεστή συσχέτισης του Spearman. Οι τιμές που εισέρχονται στο διάγραμμα δεν είναι πλέον οι τιμές των μεταβλητών αλλά οι αντίστοιχες τιμές των αθροιστικών συναρτήσεων κατανομής τους. Παρακάτω φαίνεται το παραπάνω διάγραμμα διασποράς συγκριτικά με το αντίστοιχο που είχε προκύψει μέσω του συντελεστή του Pearson:



Σχήμα 4.10 Διασπορά L-W για $\rho=1$ (Product Moment Correlation)



Σχήμα 4.11 Διασπορά L-W για $\rho=1$ (Rank Correlation)

Συνεπώς, το πλέον κατάλληλο μέτρο για τη μοντελοποίηση της συσχέτισης είναι η συσχέτιση τάξης μεγέθους (Rank Correlation).

Είναι προφανές ότι στην περίπτωση κανονικών κατανομών, και οι 2 προσεγγίσεις (Product Moment Correlation και Rank Correlation) οδηγούν σε ίδια αποτελέσματα.

Πραγματοποιώντας το μετασχηματισμό που περιγράφηκε παραπάνω (αντικατάσταση των τιμών των μεταβλητών με τις αντίστοιχες τιμές της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής), πλέον δεν υπάρχει ενασχόληση με τις ακριβείς τιμές κάθε μεταβλητής αλλά με τις «τάξεις» των τιμών κάθε μεταβλητής, των οποίων τις κατανομές μελετούμε.

Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ένταξη των Συζευξών (Copulas) στη μελέτη της αβεβαιότητας των συστημάτων, οι οποίες είναι συναρτήσεις που αναλύονται στην επόμενη παράγραφο.

4.3 Συναρτήσεις Σύζευξης (Copulas)

Οι συζεύξεις εκφράζουν στην περίπτωση των διδιάστατων κατανομών, τη συναρτησιακή σχέση της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής μιας διδιάστατης κατανομής με τις αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής των μονοδιάστατων περιθώριων κατανομών, όπου οι τελευταίες μας είναι πάντοτε γνωστές.

Σκοπός της δημιουργίας αυτών των οικογενειών, ήταν να βρεθεί ένας απλός τρόπος για να εισαχθεί η συσχέτιση ανάμεσα στις τυχαίες περιθώριες κατανομές. Αναδεικνύεται δε, στη μελέτη και στην εισαγωγή τέτοιων οικογενειών, σε επίμαχο θέμα η εύρεση κλάσεων

διδιάστατων κατανομών με το επιθυμητό εύρος του συντελεστή συσχέτισης.

4.3.1 Ορισμός Σύζευξης

Σύζευξη είναι μια απεικόνιση $C(u, v), C: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ έτσι ώστε:

$$\triangleright C(t, 0) = C(0, t) = 0 \quad (4.3)$$

$$\text{και } C(t, 1) = C(1, t) = t \text{ για κάθε } t \in [0,1] \quad (4.4)$$

$$\triangleright C(u_2, v_2) - C(u_1, v_2) - C(u_2, v_1) + C(u_1, v_1) \geq 0 \quad (4.5)$$

για όλα τα u_1, u_2, v_1, v_2 για τα οποία ισχύει:

$$u_1 \leq u_2, v_1 \leq v_2 \quad (4.6)$$

Προκύπτει ότι κάθε σύζευξη :

- Είναι αύξουσα για κάθε μεταβλητή
- Είναι συνεχής
- Ικανοποιεί την ανισότητα

$$\max\{u + v - 1, 0\} \leq C(u, v) \leq \min\{u, v\} \quad (4.7)$$

για όλα τα u, v στο διάστημα $[0,1]$

4.3.2 Θεώρημα του Sklar

Το θεώρημα του Sklar αποτελεί ένα σημαντικό θεώρημα για τη θεωρία των συζεύξεων, ο οποίο αποτελεί θεμέλιο για πολλές εφαρμογές αυτής της θεωρίας. Μέσω του θεωρήματος του Sklar διευκρινίζεται ο ρόλος των Συζεύξεων στη σχέση των πολυδιάστατων συναρτήσεων κατανομών με τις μονοδιάστατές τους περιθώριες συναρτήσεις κατανομών.

Στην περίπτωση της διδιάστατης συνάρτησης κατανομής, το θεώρημα είναι ως εξής:

Έστω $H(x, y)$ είναι διδιάστατη συνάρτηση κατανομής με περιθώριες συναρτήσεις $F(x)$ και $G(y)$. Τότε υπάρχει μια σύζευξη $C(u, v)$ τέτοια ώστε :

$$H(x, y) = C(F(x), G(y)) \text{ για } x, y \in \mathbb{R}. \quad (4.8)$$

Αντίστροφα, για κάθε συνάρτηση κατανομής $F(x)$ και $G(y)$ και κάθε σύζευξη $C(u, v)$, η συνάρτηση $H(x, y)$ που ορίστηκε παραπάνω είναι μια διδιάστατη συνάρτηση κατανομής με περιθώριες $F(x)$ και $G(y)$.

Παρατηρήσεις:

- Εάν οι $F(x)$ και $G(y)$ είναι συνεχείς, τότε η $C(u, v)$ είναι μοναδική.
- Για συνεχείς περιθώριες συναρτήσεις $F(x)$ και $G(y)$ η μοναδική σύζευξη $C(u, v)$, για $(u, v) \in [0, 1] \times [0, 1]$ έχει τη μορφή :

$$C(u, v) = H(F^{-1}(u), G^{-1}(v)) \quad (4.9)$$

όπου F^{-1} και G^{-1} οι αντίστροφες των συναρτήσεων $F(x)$ και $G(y)$ αντίστοιχα.

- Η σύζευξη $C(u, v)$ είναι μια συνάρτηση που “συνδέει” την από κοινού συνάρτηση κατανομής με τις περιθώριες της.
- Όταν $F(x)$ και $G(y)$ είναι συνεχείς τότε οι τυχαίες μεταβλητές X και Y είναι ανεξάρτητες αν και μόνο αν $H(x, y) = F(x)G(y)$ για $x, y \in \mathbb{R}$. Ισοδύναμα, οι τυχαίες μεταβλητές X και Y είναι ανεξάρτητες αν και μόνο αν $C(u, v) = uv$ όπου:

$$(u, v) \in [0, 1] \times [0, 1]$$

4.3.3 Οικογένειες Συζεύξεων

Όπως ήδη αναφέρθηκε, σύζευξη καλείται μια δομή εξάρτησης η οποία παρουσιάζεται με τη μορφή ενός συναρτησιακού. Οι διαφορετικές μορφές αυτού του συναρτησιακού οδηγούν σε μια ποικιλία μοντέλων οικογενειών κατανομών.

Ποικίλες τέτοιες δομές κατασκευής διδιάστατων κατανομών με συγκεκριμένες περιθώριες έχουν ερευνηθεί από τους Plackett (1965), Mardia (1970), Genest (1987), Marshall και Olkin (1988) και άλλους.

Μια από τις πιο εύκολες σε εφαρμογή δομή, εμφανίζεται στην κλάση των διδιάστατων κατανομών που εισήχθη αρχικά από τον Morgenstern (1956), χρησιμοποιώντας Cauchy περιθώριες. Το 1960 ο Gumbel ερευνήσε την οικογένεια κατανομών με εκθετικές περιθώριες, ενώ ο Farlie σε συνδυασμό με τις έρευνες του για το συντελεστή συσχέτισης, πρότεινε μια γενίκευση της διδιάστατης δομής που είχε μελετηθεί από τους Morgenstern και Gumbel.

Οι Johnson και Kotz (1975) (1977) μελέτησαν την πολυδιάστατη περίπτωση και εισήγαγαν τον όρο οικογένεια κατανομών Farlie-Gumbel-Morgenstern, ενώ περαιτέρω μελέτες διεξήχθησαν από τους Schucany (1978), Kotz και Johnson (1977) και Huang και Kotz (1984) μεταξύ άλλων. Στην απλούστερη της μορφή, η διδιάστατη οικογένεια Farlie-Gumbel-Morgenstern έχει μόνο μία παράμετρο σε συνδυασμό με τις διαφορετικές περιθώριες. Αυτή όμως η μορφή έχει κάποια μειονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι η δομή εξάρτησης δεν είναι εύκαμπτη και το εύρος του συντελεστή συσχέτισης ρ είναι περιορισμένο.

Ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση κάποιων από τις βασικότερες οικογένειες συζεύξεων που χρησιμοποιούνται σήμερα.

➤ **Η οικογένεια των κανονικών συζεύξεων**

$$C_\rho(u, v) = N_\rho(\Phi^{-1}(u), \Phi^{-1}(v)) \quad (4.10)$$

Όπου με $N_\rho(x, y)$ συμβολίζουμε μια διδιάστατη συνάρτηση κατανομής με συντελεστή συσχέτισης ρ και με Φ την τυπική κανονική κατανομή.

➤ **Η Farlie-Gumbel-Mongerstern οικογένεια συζεύξεων**

$$C_\theta(u, v) = uv + \theta uv(1 - u)(1 - v), \theta \in [-1, 1] \quad (4.11)$$

τα μέλη της οποίας είναι συμμετρικά, δηλαδή ισχύει $C_\theta(u, v) = C_\theta(v, u)$ για όλα τα $(u, v) \in [0, 1] \times [0, 1]$

➤ **Η οικογένεια των κυβικών συζεύξεων**

$$C(u, v) = uv + uv(1-u)(1-v)[\alpha uv + \beta u(1-v) + \gamma v(1-u) + \delta(1-u)(1-v)] \quad (4.12)$$

με $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ πραγματικές σταθερές που έχουν επιλεγεί έτσι ώστε τα σημεία $(\alpha, \beta), (\alpha, \gamma), (\delta, \beta)$ και (δ, γ) να βρίσκονται στο σύνολο:

$$[-1, 2] \times [-2, 1] \cup \{(x, y) | x^2 - xy + y^2 - 3x + 3y \leq 0\}.$$

Στην περίπτωση που $\alpha = \beta = \gamma = \delta$ το C είναι δευτέρου βαθμού και οι συζεύξεις είναι μέλη της Farlie-Gumbel-Mongerstern οικογένειας. Σε αντίθεση με τις συζεύξεις Farlie-Gumbel-Mongerstern, οι κυβικές συζεύξεις μπορεί να μην είναι συμμετρικές.

➤ **Η οικογένεια των Quandras-Auge συζεύξεων**

$$C_{\alpha, \beta}(u, v) = \min(u^{1-\alpha}v, uv^{1-\beta}), \alpha, \beta \in [0, 1] \quad (4.13)$$

➤ **Η Frechet οικογένεια συζεύξεων**

$$C_{\alpha, \beta}(u, v) = \alpha M(u, v) + (1 - \alpha - \beta) \Pi(u, v) + \beta W(u, v) \quad (4.14)$$

όπου W, Π και M n -διάστατες συζεύξεις που συμβολίζονται με W_n, Π_n και M_n αντίστοιχα και δίνονται από τις σχέσεις:

$$W^n(u) = \max(u_1 + u_2 + \dots + u_n - n + 1, 0) \quad (4.15)$$

$$\Pi^n(u) = u_1 \cdot u_2 \dots u_n \quad (4.16)$$

$$M^n(u) = \min(u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (4.17)$$

Επίσης, $\alpha, \beta \in [0, 1]$ και $\alpha + \beta \leq 1$

➤ **Αρχιμήδειες Συζεύξεις**

Οι Αρχιμήδειες Συζεύξεις αποτελούν μια από τις πιο γνωστές κλάσεις συζεύξεων, κάτι το οποίο οφείλεται στην ευκολία με την οποία μπορούν να κατασκευαστούν και στο μεγάλο πλήθος οικογενειών συζεύξεων που ανήκουν σε αυτή.

Έστω φ_θ μια συνεχής και αυστηρά φθίνουσα συνάρτηση με πεδίο ορισμού το σύνολο $[0,1]$ και πεδίο τιμών το $[0,\infty)$, έτσι ώστε $\varphi_\theta(1)=0$ και φ_θ κυρτή. Επίσης, έστω φ_θ^{-1} η ψευδοαντίστροφη συνάρτηση της φ_θ . Τότε, η συνάρτηση $C:[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ η οποία ορίζεται ως:

$$C(u, v) = \varphi_\theta^{-1}(\varphi_\theta(u) + \varphi_\theta(v)), \theta \in \mathbb{R} \quad (4.18)$$

ονομάζεται Αρχιμήδεια Σύζευξη. Σημαντικές οικογένειες Αρχιμήδειων Συζεύξεων είναι η Clayton, η Gumbel και η Frank.

4.3.4 Συνδυασμός Copulas και συντελεστή συσχέτισης

Στην παρούσα παράγραφο επιχειρείται, μέσω παραδείγματος, η ανάδειξη της επίδρασης των διαφόρων τύπων Copulas στην κοινή συμπεριφορά 2 μεταβλητών.

Οι τυχαίες μεταβλητές του παραδείγματος είναι οι ταχύτητες του ανέμου σε 2 περιοχές. Οι μεταβλητές ακολουθούν κατανομές Weibull με παραμέτρους:

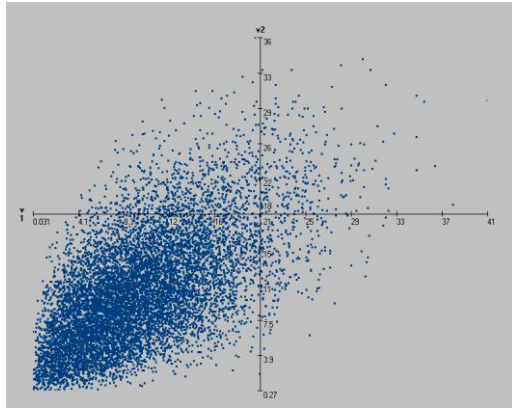
$$W_1: n=12 \quad \beta=2$$

$$W_2: n=11.1 \quad \beta=1.8$$

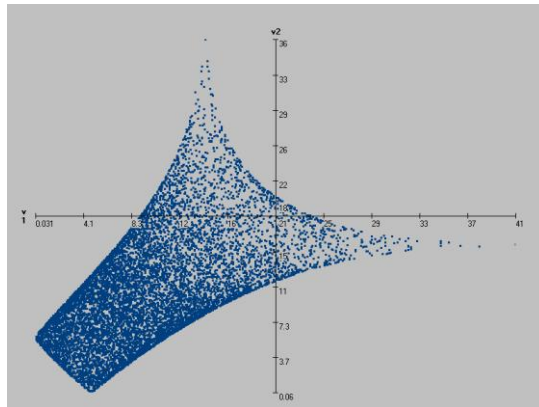
Ο συντελεστής συσχέτισης των παραπάνω μεταβλητών τέθηκε ίσος με: $\rho_r=0.6$. Διατηρώντας σταθερές τις περιθώριες κατανομές και το συντελεστή συσχέτισης, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία για 4 διαφορετικές copulas:

- Normal
- Elliptical
- Frank
- Diagonal Band

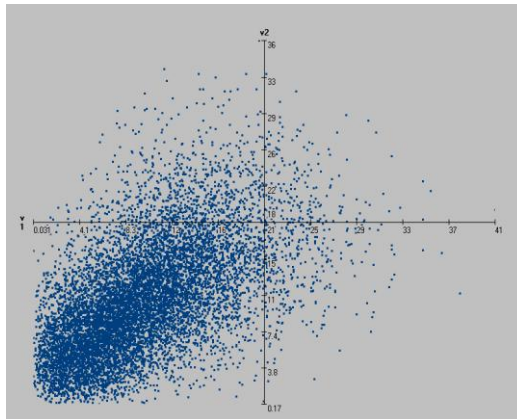
Από την προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε μέσω του UNICORN παράχθηκαν 10000 δείγματα για κάθε μεταβλητή και τα διαγράμματα διασποράς που προέκυψαν είναι τα εξής:



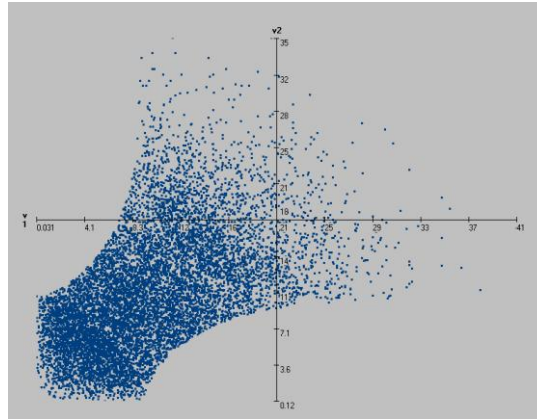
Σχήμα 4.12 Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου με *Normal Copula*



Σχήμα 4.13 Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου με *Elliptical Copula*



Σχήμα 4.14 Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου με *Frank Copula*



Σχήμα 4.15 Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου με *Diagonal Band Copula*

Από τα παραπάνω διαγράμματα διασποράς είναι φανερό ότι διατηρώντας σταθερές τις περιθώριες κατανομές και το βαθμό συσχέτισης των μεταβλητών και μεταβάλλοντας μόνο τη συνάρτηση σύζευξης που τις συνδέει, μεταβάλλεται ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρούν.

4.4 Επίδραση της συσχέτισης στην αθροιστική συμπεριφορά 2 τυχαίων μεταβλητών

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκαν οι βασικές έννοιες που περιλαμβάνει η μοντελοποίηση εξαρτημένων τυχαίων μεταβλητών.

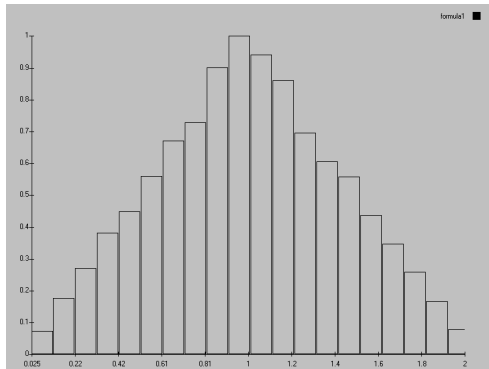
Πρωτεύοντα ρόλο διαδραμίζει ο καθορισμός των κατανομών των τυχαίων μεταβλητών ενώ η χρήση του κατάλληλου συντελεστή συσχέτισης και της κατάλληλης copula ολοκληρώνουν τη μοντελοποίηση της συσχέτισης.

Στην παρούσα παράγραφο μελετάται η επίδραση του δεύτερου παράγοντα (συντελεστής συσχέτισης) στην κατανομή του αθροίσματος 2 τυχαίων μεταβλητών.

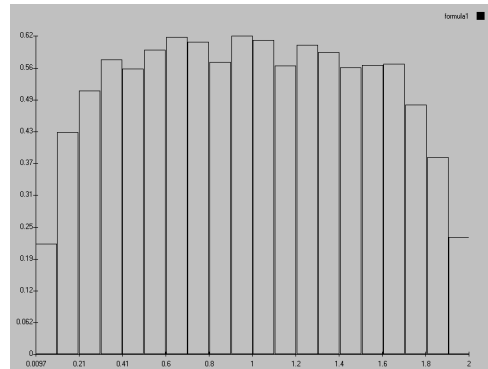
Θεωρούμε, λοιπόν, 2 τυχαίες μεταβλητές (U_1 και U_2) ομοιόμορφα κατανεμημένες στο διάστημα $[0,1]$ και μελετάται η κατανομή του αθροίσματός τους διατηρώντας σταθερές τις περιθώριες κατανομές τους και δίνοντας στο συντελεστή συσχέτισης τις εξής τιμές:

- $\rho=0$
- $\rho=0.6$
- $\rho=1$

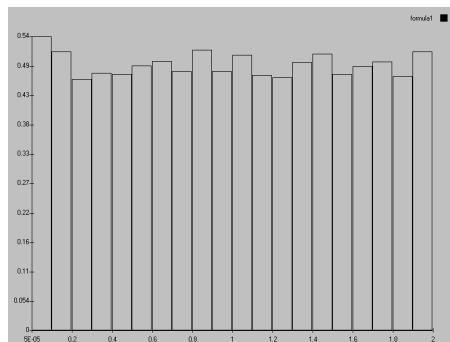
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις κατανομές του αθροίσματος των 2 μεταβλητών είναι τα εξής:



Σχήμα 4.16 Κατανομή U_1+U_2 για $\rho=0$



Σχήμα 4.17 Κατανομή U_1+U_2 για $\rho=0.6$



Σχήμα 4.18 Κατανομή U_1+U_2 για $\rho=1$

Παρατηρούμε ότι η αλλαγή του βαθμού συσχέτισης οδηγεί σε διαφορετικές κατανομές του αθροίσματος των 2 μεταβλητών παρόλο που οι περιθώριες κατανομές τους παραμένουν αμετάβλητες. Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς αναδεικνύει ενδεχόμενες λανθασμένες εκτιμήσεις για τις διακυμάνσεις των μεγεθών ενός συστήματος.

Όπως θα φανεί στις εφαρμογές της εργασίας, ιδιαίτερο ρόλο στη διαχείριση ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας διαδραματίζουν η συνολική ζήτηση φορτίου και η συνολική παραγωγή. Αγνοώντας τη συσχέτιση προκύπτουν αποτελέσματα μη ακριβή με αποτέλεσμα πιθανούς λανθασμένους χειρισμούς του συστήματος εφόσον βασισθούν στα συγκεκριμένα αποτελέσματα.

4.5 Μοντελοποίηση της συσχέτισης σε συστήματα πολλών μεταβλητών

Στην παρούσα παράγραφο επεκτείνονται όσα αναφέρθηκαν για την περίπτωση 2 συσχετισμένων μεταβλητών στην περίπτωση ενός συστήματος που περιλαμβάνει μεγαλύτερο αριθμό μεταβλητών.

Πρώτο βήμα στη μοντελοποίηση ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί ο καθορισμός των περιθώριων κατανομών των μεταβλητών που περιλαμβάνει, ο οποίος γίνεται όπως και στην περίπτωση των 2 μεταβλητών: μέσω επεξεργασίας των διαθέσιμων μετρήσεων.

Ωστόσο, όταν η μελέτη αφορά ένα σύστημα πολλών μεταβλητών, η μοντελοποίηση της συσχέτισης είναι μια διαδικασία σχετικά περίπλοκη. Για ένα σύστημα n μεταβλητών πρέπει να καθοριστεί η στοχαστική αλληλεπίδραση για $2^n - 1$ υποσύνολα μεταβλητών.

4.5.1 Τύποι συστημάτων

Ένα βασικό πρόβλημα στη στοχαστική μοντελοποίηση πραγματικών συστημάτων είναι η έλλειψη των απαιτούμενων πληροφοριών σχετικά με τα μοντέλα συσχέτισης που συνδέουν τις μεταβλητές. Βάσει αυτού, το πρόβλημα της μοντελοποίησης της συσχέτισης διαχωρίζεται σε 2 τύπους προβλημάτων:

- Προβλήματα για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμες οι απαραίτητες πληροφορίες μέσω μετρήσεων
- Προβλήματα για τα οποία υπάρχει έλλειψη στοιχείων.

Όσον αφορά στον πρώτο τύπο προβλημάτων, μέσω των διαθέσιμων μετρήσεων υπολογίζονται οι συντελεστές συσχέτισης όλων των συνδυασμών των μεταβλητών, οργανώνονται σε έναν **πίνακα συσχέτισης** (Rank Correlation Matrix) και βάσει αυτού γίνεται η δειγματοληψία των συσχετισμένων μεταβλητών του συστήματος.

Όσον αφορά στο δεύτερο τύπο προβλημάτων, λόγω έλλειψης στοιχείων δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί η συσχέτιση για όλα τα υποσύνολα μεταβλητών του συστήματος. Συστήματα τέτοιου τύπου χαρακτηρίζονται από έντονη αβεβαιότητα και, συνεπώς, η βέλτιστη λύση που προτείνεται είναι ο καθορισμός των συσχετίσεων που διαδραματίζουν σημαντικότερο ρόλο στο σύστημα ενώ οι υπόλοιπες συσχετίσεις παραμένουν ακαθόριστες.

Οι δομές συσχέτισης που χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση είναι οι εξής:

- Dependence Trees
- Dependence Vines

Τα παραπάνω αποτελούν γραφικούς τρόπους απεικόνισης της συσχέτισης και σε συνδυασμό με μια copula χρησιμοποιούνται για τη δειγματοληψία εξαρτημένων μεταβλητών, για τη συσχέτιση των οποίων υπάρχουν ελάχιστες πληροφορίες.

4.5.2 Πίνακες συσχέτισης

Στην περίπτωση που υπάρχουν οι διαθέσιμες μετρήσεις για κάθε μεταβλητή του συστήματος, οι συντελεστές συσχέτισης οργανώνονται σε έναν πίνακα συσχέτισης, ο οποίος έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Είναι τετραγωνικός μεγέθους $n \times n$, όπου n ο αριθμός των μεταβλητών του συστήματος
- Όλα τα στοιχεία του ανήκουν στο διάστημα $[-1,1]$
- Τα διαγώνια στοιχεία του είναι ίσα με 1
- Είναι συμμετρικός

4.5.2.1 Δειγματοληψία μέσω πίνακα συσχέτισης (Joint Normal Transform Methodology – JNT)

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη δειγματοληψία n εξαρτημένων μεταβλητών (διάνυμα X) συνοψίζεται στα εξής βήματα:

- Κατασκευάζεται ο πίνακας συσχέτισης βάσει των συντελεστών συσχέτισης του Spearman: R_r (Rank Correlation Matrix)
- Κατασκευάζει ο πίνακας συσχέτισης του Pearson (Product Moment Correlation Matrix) μέσω της σχέσης :

$$R = 2 \sin\left(\frac{\pi}{6} R_r\right) \quad (4.19)$$

- Παράγονται δείγματα βάσει του παραπάνω πίνακα συσχέτισης για n εξαρτημένες μεταβλητές ομοιόμορφης κατανομής (διάνυσμα U_C) χρησιμοποιώντας την πολυδιάστατη Normal Copula
- Τα δείγματα για τις αρχικές μεταβλητές του διανύσματος X προκύπτουν μέσω του μετασχηματισμού:

$$X_i = F_i^{-1}(U_C) \quad (4.20)$$

όπου F η αθροιστική συνάρτηση κατανομής κάθε μεταβλητής του διανύσματος X .

Όπως θα δείξουμε στο επόμενο κεφάλαιο, η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται με μεγάλη ευκολία μέσω λογισμικών ανάλυσης της αβεβαιότητας όπως είναι το UNICORN. Ουσιαστικά, κάνοντας χρήση τέτοιου τύπου λογισμικών απαιτείται μόνο ο καθορισμός του πίνακα συσχέτισης και των περιθώριων κατανομών των μεταβλητών του συστήματος.

Μια δυσκολία που ενδέχεται να προκύψει είναι όσον αφορά τον πίνακα συσχέτισης, ο οποίος είναι απαραίτητο να είναι θετικά ημιορισμένος προκειμένου να διεξαχθεί η προσομοίωση. Σε περίπτωση που δεν πληρείται η παραπάνω προϋπόθεση, ο χρήστης καλείται να κάνει την απαραίτητη μετατροπή πριν τροφοδοτήσει το λογισμικό με τον πίνακα συσχέτισης.

4.5.2.2 Μετατροπή πίνακα συσχέτισης σε θετικά ημιορισμένο

Η δυσκολία που προκύπτει συγκριτικά με την περίπτωση των 2 μεταβλητών είναι το γεγονός ότι η πραγματοποίηση της προσομοίωσης απαιτεί ο παραπάνω πίνακας συσχέτισης να είναι θετικά ημιορισμένος, δηλαδή να μην υπάρχουν αρνητικές ιδιοτιμές.

Ακόμα κι αν ο πίνακας συσχέτισης έχει προκύψει από πραγματικά δεδομένα, λόγω σφαλμάτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις, είναι πιθανό να μην ροκύψει θετικά ημιορισμένος, ειδικά αν το μέγεθος του είναι μεγάλο (σύστημα με πολλές μεταβλητές).

Γι αυτό το λόγο απαιτείται η μετατροπή του πίνακα συσχέτισης σε έναν όσο το δυνατόν πλησιέστερο τετραγωνικό πίνακα, διατηρώντας τα μοναδιαία διαγώνια στοιχεία και τη συμμετρικότητά του. Η διαδικασία μετατροπής περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Υπολογίζονται οι ιδιοτιμές του πίνακα συσχέτισης: λ_i
- Υπολογίζεται ο πίνακας των ιδιοδιανυσμάτων του C: S
- Κατασκευάζεται ο πίνακας ιδιοτιμών του πίνακα C:

$$\Lambda = \text{diag} (\lambda_i) \quad (4.21)$$

- Όλες οι αρνητικές ιδιοτιμές τίθενται ίσες με 0 και δημιουργείται ο νέος πίνακας

$$\Lambda' = \text{diag} (\lambda'_i) \quad (4.22)$$

- Δημιουργείται ο πίνακας B' μέσω της σχέσης:

$$B' = S\sqrt{\Lambda'} \quad (4.23)$$

- Κατασκευάζεται ο πίνακας T:

$$T = \text{diag} (t_i) \quad (4.24)$$

όπου:

$$t_i = [\sum s_{im}^2 \lambda'_m]^{-1} \quad (4.25)$$

- Κατασκευάζεται ο πίνακας B:

$$B = \sqrt{T}B' \quad (4.26)$$

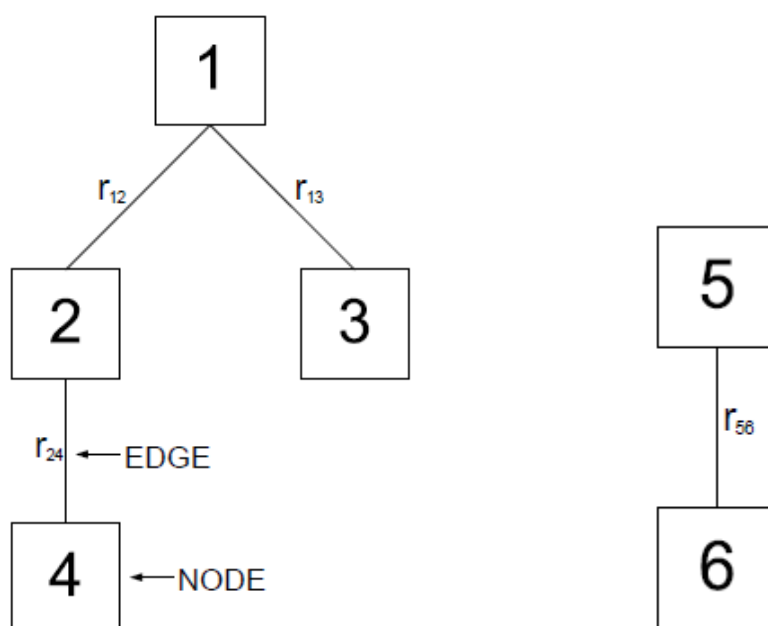
- Ο νέος θετικά ημιορισμένος πίνακας είναι ο:

$$C_{\text{new}} = B B^T \quad (4.27)$$

4.5.3 Dependence Trees

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, το σύστημα προσομοιώνεται μέσω γράφων χωρίς κύκλους (δέντρα) όπου κάθε κόμβος παριστάνει μια μεταβλητή (και χαρακτηρίζεται από την κατανομή της) και κάθε κλάδος περιέχει τη συσχέτιση των κόμβων που συνδέει.

Η τυπική δομή για ένα σύστημα 6 μεταβλητών είναι η εξής:



Σχήμα 4.19 Παράδειγμα Dependence Tree για 6 μεταβλητές

όπου r οι συντελεστές συσχέτισης.

Πέραν του συντελεστή συσχέτισης, τα ζεύγη των εξαρτημένων μεταβλητών συνδέονται με κάποια διδιάστατη *corula* με βάση την οποία γίνεται η δειγματοληψία μιας μεταβλητής βάσει μιας άλλης.

Ωστόσο, η χρήση της συγκεκριμένης δομής οδηγεί σε κάποιους περιορισμούς:

- Δε θα πρέπει να δημιουργούνται κύκλοι στο γράφο
- Οι μεταβλητές που μοιράζονται κάποιο κοινό κόμβο πρέπει να είναι ανεξάρτητες

Για παράδειγμα, στο σύστημα των 6 μεταβλητών του παραπάνω σχήματος, οι μεταβλητές 5 και 6 πρέπει να ληφθούν ως ανεξάρτητες. Η δειγματοληψία των μεταβλητών 2 και 3 θα

πρέπει να γίνει θεωρώντας ανεξαρτησία των συγκεκριμένων μεταβλητών αλλά με εξάρτηση από την τιμή της μεταβλητής 1.

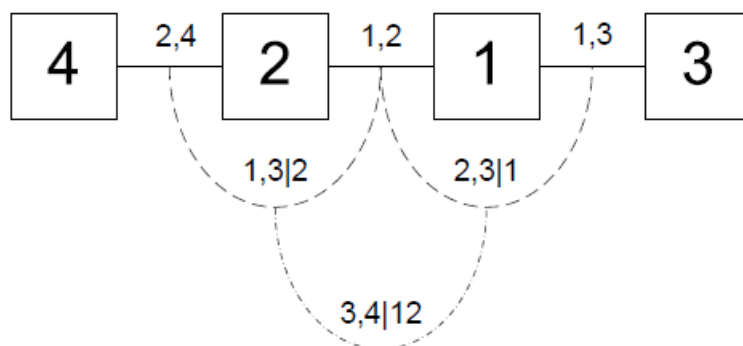
Η δειγματοληψία της μεταβλητής 6 εξαρτάται από τη δειγματοληψία της μεταβλητής 5 και η δειγματοληψία της 4 από τις τιμές της 2.

Συνεπώς υπάρχουν μεταβλητές οι οποίες είναι «ανεξάρτητες αλλά υπό συνθήκη» και η συσχέτιση αυτών των μεταβλητών προκύπτει μέσω των copulas που τις συνδέει.

Κάτι τέτοιο καθιστά δύσκολη τη δειγματοληψία μέσω της συγκεκριμένης δομής συσχέτισης. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη χρήσης των δομών τύπου «vines» μέσω των οποίων επιλύονται οι παραπάνω περιορισμοί.

4.5.4 Dependence vines

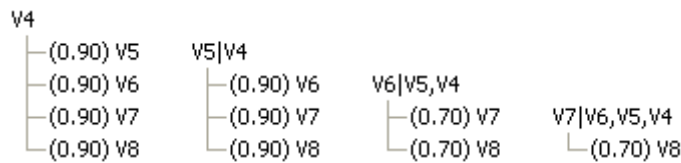
Κάνοντας χρήση των συγκεκριμένων δομών, είναι δυνατόν να καθοριστούν οι υπο συνθήκη συσχετίσεις μεταξύ μεταβλητών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.20 Παράδειγμα Vine για 4 μεταβλητές

Οι δομές «vines» είναι φωλιασμένα σύνολα από trees όπου οι κόμβοι του επόμενου κάθε φορά δέντρου είναι οι κλάδοι του προηγούμενου. Δύο κλάδοι ενός δέντρου αποτελούν τους κόμβους του «επόμενου δέντρου» μόνο αν αυτοί οι κλάδοι μοιράζονται κάποιο κοινό κόμβο.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής της παραπάνω δομής φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.21 Vine με καθορισμένες υπο συνθήκη συσχετίσεις

Έτσι, έχοντας καθορίσει όλες τις εξαρτήσεις των μεταβλητών προκύπτει ένας πλήρης πίνακας συσχέτισης ο οποίος είναι πάντα θετικά ορισμένος.

4.5.5 Συμπεράσματα

Στις προηγούμενες παραγράφους περιγράφηκαν 3 βασικές δομές μοντελοποίησης της συσχέτισης σε ένα σύστημα πολλών μεταβλητών.

Λόγω του γεγονότος ότι η μελέτη κάθε συστήματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες συνθήκες με σημαντικότερη παράμετρο την επάρκεια δεδομένων, η επιλογή της δομής που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζεται βάσει των παραπάνω συνθηκών.

Σε περίπτωση που υπάρχουν όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τη συσχέτιση των μεταβλητών (απλούστερη περίπτωση), οργανώνονται οι συντελεστές συσχέτισης σε έναν πίνακα με μοναδική απαίτηση να είναι θετικά ημισορισμένος. Σε περίπτωση που κάτι τέτοιο δεν ισχύει, μέσω της μεθοδολογίας που περιγράφηκε μετατρέπεται σε έναν ισοδύναμο θετικά ορισμένο πίνακα. Στην περίπτωση του πίνακα συσχέτισης, χρησιμοποιείται η πολυδιάστατη Normal Copula.

Εάν τα στοιχεία είναι ελλιπή και, συνεπώς, υπάρχουν ζεύγη μεταβλητών για τα οποία δεν υπάρχουν στοιχεία συσχέτισης, μια λύση είναι να θεωρηθούν συσχετίσεις κοντά στο μηδέν για αυτά τα ζεύγη. Ωστόσο, σε συστήματα με έντονη αβεβαιότητα (λόγω έλλειψης μεγάλου πλήθους πληροφοριών) μια τέτοια προσέγγιση συχνά οδηγεί σε μη θετικά ορισμένο πίνακα συσχέτισης ενώ ο «ισοδύναμος» πίνακας που θα προκύψει παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις από τον αρχικό πίνακα. Επομένως, ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία τα δείγματα που θα προκύψουν από την προσομοίωση θα είναι σε μεγάλο βαθμό ανακριβή.

Για τους παραπάνω λόγους είναι απαραίτητη η χρήση μοντέλων συσχέτισης τα οποία θα αξιοποιούν μόνο τη διαθέσιμη πληροφορία. Αυτές οι δομές (trees και vines) χρησιμοποιούν διδιάστατες Copulas για να συσχετίσουν κάθε ζεύγος μεταβλητών, σε αντίθεση με τη δομή του πίνακα συσχέτισης στην οποία χρησιμοποιείται μια πολυδιάστατη copula, η οποία είναι προκαθορισμένη (Normal Copula).

Οι δομές τύπου vine αναπτύχθηκαν προκειμένου να αντιμετωπιστούν κάποιες από τις αδυναμίες των δέντρων (μη κάλυψη της συσχέτισης όλων των ζευγών των μεταβλητών) και αποτελούν έναν αποτελεσματικό τρόπο μοντελοποίησης των συσχετίσεων ολόκληρου του συστήματος ενώ παράλληλα αποτελούν έναν τρόπο δημιουργίας ενός θετικά ορισμένου πίνακα συσχέτισης που περιγράφει το σύστημα.

4.6 Τεχνική των Stochastic Plants

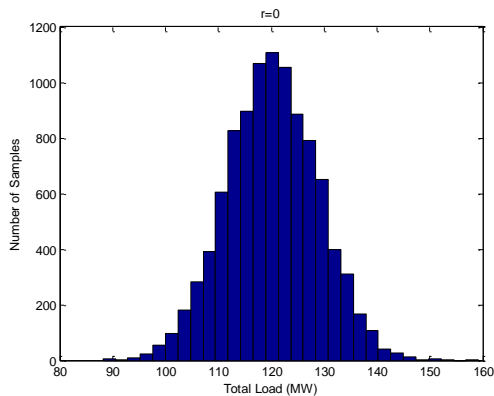
Στις προηγούμενες παραγράφους εξετάστηκε η μοντελοποίηση συστημάτων με περισσότερες από 2 μεταβλητές. Η συσχέτιση των μεταβλητών του συστήματος οργανώνεται σε δομές όπως πίνακες συσχέτισης, trees και vines, η κατασκευή των οποίων απαιτεί την άντληση των απαιτούμενων πληροφοριών συσχέτισης από μια σειρά διαθέσιμων μετρήσεων.

Είναι εμφανές ότι για συστήματα που περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό μεταβλητών η διαδικασία μοντελοποίησης καθίσταται δυσκολότερη. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη απλοποίησης του δημιουργούμενου μοντέλου που αναπαριστά το υπό μελέτη σύστημα. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί ομαδοποιώντας μέρη του συστήματος σε ομάδες που ονομάζονται Stochastic Plants (SG). Όταν η ομαδοποίηση αφορά μονάδες στοχαστικής παραγωγής (πχ μονάδες Αιολικής παραγωγής) ονομάζονται Stochastic Generation Plants (SGP).

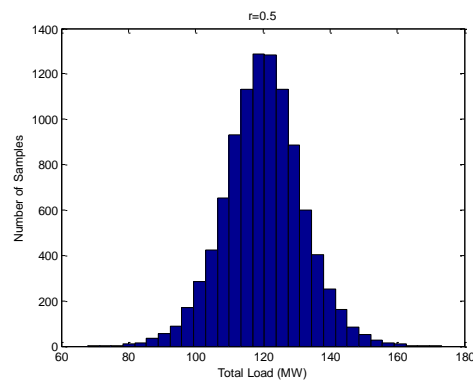
Για την λήψη όσο το δυνατόν ακριβέστερων αποτελεσμάτων, θεωρείται απόλυτη θετική συσχέτιση των μεταβλητών κάθε SP. Η απόλυτη θετική συσχέτιση (Comonotonicity) αποτελεί το πιο ακραίο σενάριο βάσει του οποίου μπορούν να συσχετιστούν οι μεταβλητές καθώς οδηγεί σε ακραίες αθροιστικές συμπεριφορές.

Το παραπάνω μπορεί να φανεί θεωρώντας μια ομάδα 5 φορτίων με κανονικές κατανομές και μελετώντας το άθροισμά τους για τις εξής τιμές συσχέτισης:

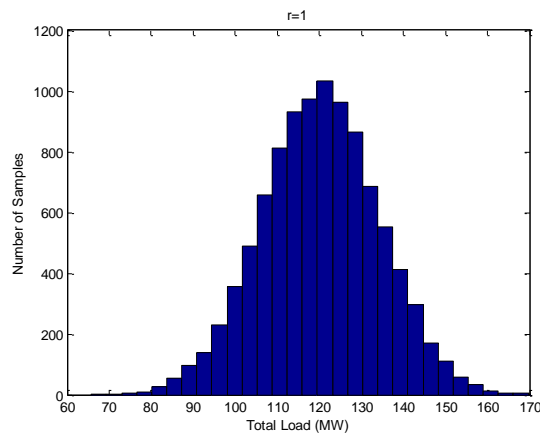
- $\rho=0$ (ανεξαρτησία)
- $\rho=0.5$
- $\rho=1$ (πλήρης συσχέτιση)



Σχήμα 4.22 Συνολικό φορτίο για $\rho=0$



Σχήμα 4.23 Συνολικό φορτίο για $\rho=0.5$



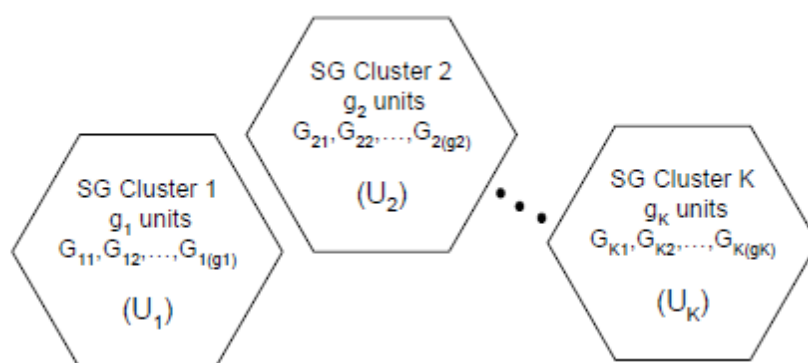
Σχήμα 4.24 Συνολικό φορτίο για $\rho=1$

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της απόλυτης θετικής συσχέτισης η κατανομή του αθροίσματος των 3 φορτίων λαμβάνει πιο ακραίες τιμές και παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση. Επιβεβαιώνεται, συνεπώς, το σενάριο ότι θεωρώντας πλήρη συσχέτιση για μια ομάδα μεταβλητών με «κοινή» συμπεριφορά καλύπτονται όλες οι ακραίες συμπεριφορές της ομάδας ως σύνολο.

Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται απλοποίηση του συστήματος αλλά και ακρίβεια των αποτελεσμάτων αφού λαμβάνονται υπόψιν ακόμα και οι πιο ακραίοι συνδυασμοί των τιμών των μεταβλητών κάθε SP.

Η απλοποίηση του συστήματος προέρχεται από τη μείωση του αριθμού των μεταβλητών των οποίων η συσχέτιση πρέπει να καθορισθεί εφόσον πλέον απομένει να καθοριστούν μόνο οι συσχετίσεις μεταξύ των SP.

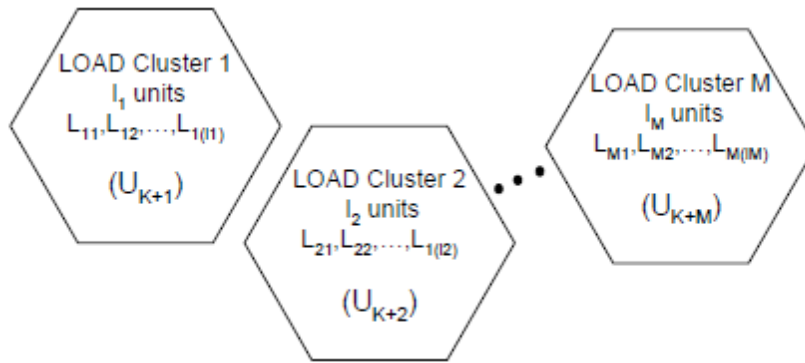
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η οργάνωση μονάδων στοχαστικής παραγωγής σε clusters:



Σχήμα 4.25 Stochastic Plant Παραγωγών

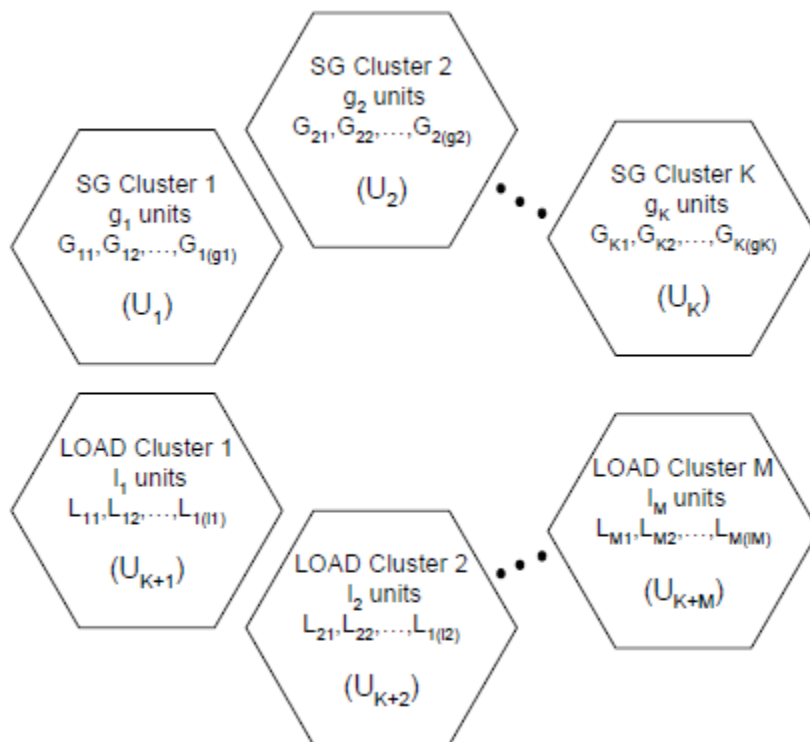
Κατασκευάζοντας την κατάλληλη δομή συσχέτισης μεταξύ των clusters έχει επιτευχθεί η μοντελοποίηση του συστήματος, η οποία εάν δεν είχε εφαρμοστεί η απλοποίηση που περιγράφηκε παραπάνω, θα ήταν σημαντικά δυσκολότερη καθώς θα περιελάμβανε πολύ μεγαλύτερο αριθμό μεταβλητών. Οι μονάδες που ανήκουν σε κάθε cluster έχουν συσχετιστεί με απόλυτη συσχέτιση.

Ανάλογη ομαδοποίηση μπορεί να γίνει και για τα φορτία ενός Σ.Η.Ε. θεωρώντας πάλι πλήρη θετική συσχέτιση:



Σχήμα 4.26 Stochastic Plant Φορτίων

Έτσι, ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας που αποτελείται από μεταβλητές που παριστάνουν φορτία και στοχαστικές παραγωγές μπορεί να λάβει την εξής οργάνωση:



Σχήμα 4.27 Stochastic Plant φορτίων και παραγωγών

Πλέον, η μοντελοποίηση της συσχέτισης μεταξύ των clusters μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας κάποια από τις δομές που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ανάλογα με τις συνθήκες του προβλήματος.

4.7 Συνολική θεώρηση της μοντελοποίησης Σ.Η.Ε με συμμετοχή στοχαστικής παραγωγής

Συνοψίζοντας όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, τα σύγχρονα Σ.Η.Ε χαρακτηρίζονται από έντονη αβεβαιότητα κυρίως λόγω της ένταξης μονάδων στοχαστικής παραγωγής όπως η Αιολική ενέργεια. Γι αυτό το λόγο τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τις καταστάσεις του συστήματος χαρακτηρίζονται ως τυχαίες μεταβλητές με συγκεκριμένες κατανομές και αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους.

Επομένως, είναι πλέον επιτακτική η ανάγκη της μοντελοποίησης του συνόλου των τυχαίων μεταβλητών του συστήματος έτσι ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν πιο πλήρης εικόνα για τη συμπεριφορά των μεγεθών και να είναι εφικτή η πρόβλεψη μελλοντικών καταστάσεων, η οποία οδηγεί σε ασφαλή οργάνωση της διαχείρισής του.

Τα μεγέθη τα οποία μοντελοποιούνται είναι τα φορτία και οι παραγωγές του συστήματος, με έμφαση τις παραγωγές μονάδων στοχαστικού χαρακτήρα. Στην περίπτωση της Αιολικής ενέργειας, η αβεβαιότητα προέρχεται από τη στοχαστική συμπεριφορά του ανέμου και για αυτό το λόγο η μοντελοποίηση της Αιολικής Παραγωγής έχει ως βάση τη μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου.

Τα μέρη στα οποία χωρίζεται η μοντελοποίηση ενός Σ.Η.Ε με διείσδυση Αιολικής ενέργειας είναι:

- Ο καθορισμός των περιθώριων κατανομών των φορτίων, των συμβατικών παραγωγών και των ταχυτήτων του ανέμου μέσω επεξεργασίας μετρήσεων
- Ο καθορισμός του τρόπου και του βαθμού συσχέτισης μεταξύ των παραπάνω μεγεθών.

Όσον αφορά στη συσχέτιση, αρχικός στόχος είναι η μείωση των μεταβλητών των οποίων πρέπει να καθοριστεί η συσχέτιση. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με την τεχνική των Stochastic Plants που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Όπως θα φανεί και από τις εφαρμογές στα επόμενα κεφάλαια, εάν δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με τη συσχέτιση κάποιων μεταβλητών, η ασφαλέστερη επιλογή είναι να λάβουμε υπόψιν το πιο ακραίο σενάριο συσχέτισης.

Έχοντας ολοκληρώσει την μοντελοποίηση σύμφωνα με τις περιθώριες κατανομές και τις συσχετίσεις των μεταβλητών του συστήματος, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις από τις οποίες θα προκύψουν δείγματα για κάθε μέγεθος.

Τα παραχθέντα δείγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες διεργασίες, όπως η επίλυση Ροών φορτίου, με σκοπό την ασφαλέστερη εκτίμηση παραμέτρων του συστήματος.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα πρόγραμμα ανάλυσης της αβεβαιότητας (UNICORN) μέσω του οποίου εφαρμόζονται όσα περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

5

Ανάλυση Αβεβαιότητας μέσω του λογισμικού

UNICORN

5.1 Εισαγωγή

Το UNICORN (Uncertainty analysis with CORrelations) είναι ένα πρόγραμμα που δημιουργήθηκε με στόχο την αξιόπιστη ανάλυση της αβεβαιότητας διαφόρων τύπων συστημάτων.

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση του UNICORN για τη μελέτη της στοχαστικότητας σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και συγκεκριμένα Αιολικής Ενέργειας.

Κύριως στόχος της χρήσης του συγκεκριμένου λογισμικού είναι η μοντελοποίηση της αβεβαιότητας σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει μεγέθη που ακολουθούν διάφορες κατανομές. Τα μεγέθη ενός τέτοιου συστήματος αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές με συγκεκριμένες συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας και αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής. Στις διακυμάνσεις των τιμών αυτών των τυχαίων μεταβλητών οφείλεται η στοχαστικότητα των συστημάτων και προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος διαχείρισης του συστήματος, είναι απαραίτητη η μελέτη όσον αφορά το εύρος τιμών κάθε τυχαίας μεταβλητής, των πιθανοτήτων οι μεταβλητές να λάβουν συγκεκριμένες τιμές καθώς και η μελέτη της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης.

Η σημαντικότερη ,ωστόσο, λειτουργία που διαθέτει το UNICORN είναι ο εύκολος και γρήγορος τρόπος πραγματοποίησης μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων πό τις οποίες προκύπτουν πολύτιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία του συστήματος και οι οποίες οδηγούν σε ασφαλή συμπεράσματα για τον τρόπο διαχείρισης του συστήματος και τη μελλοντική του συμπεριφορά.

Αναλυτικά, η τεχνική της προσομοίωσης μέσω του προγράμματος θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

Το UNICORN διαθέτει όλα τα εργαλεία Πιθανοτήτων και Στατιστικής που είναι απαραίτητα για μια πλήρη και ακριβή μελέτη ενός συστήματος με στοχαστικό χαρακτήρα.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά οι δυνατότητες του συγκεκριμένου πακέτου που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και παρουσιάζονται εφαρμογές και παραδείγματα που βοηθούν στην κατανόηση της διαχείρισης της αβεβαιότητας μέσω της χρήσης του UNICORN.

5.2 Εισαγωγή τυχαίων μεταβλητών

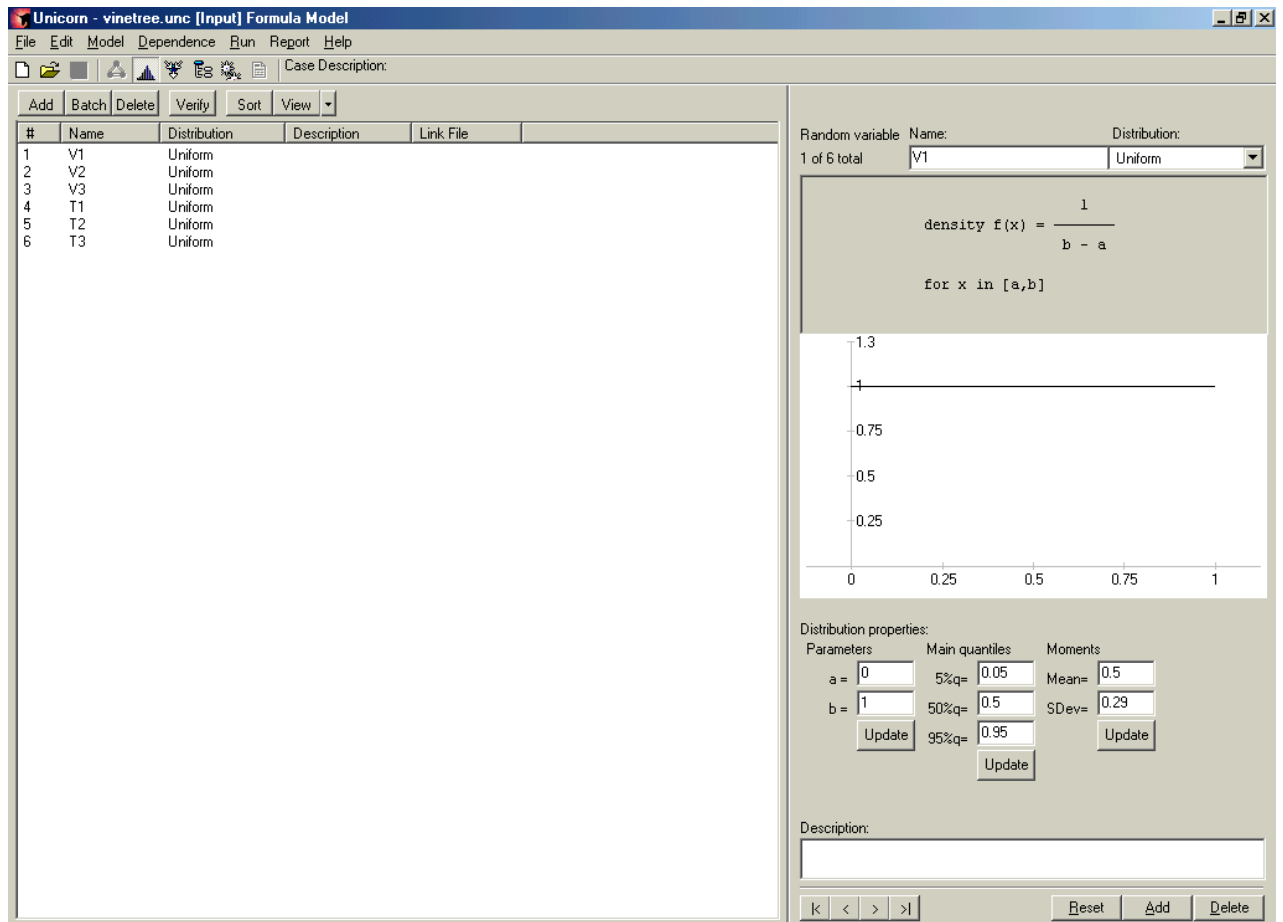
Σε προηγούμενο κεφάλαιο έχει γίνει αναλυτική περιγραφή της έννοιας της τυχαίας μεταβλητής και των εννοιών που περιλαμβάνει με κυριότερες τις συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας και τις αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής.

Το πρώτο βήμα για την ανάλυση της αβεβαιότητας ενός συστήματος είναι η εισαγωγή των μεταβλητών που περιλαμβάνει και ο καθορισμός της κατανομής που ακολουθεί κάθε μεταβλητή. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει τον αριθμό των τυχαίων μεταβλητών που επιθυμεί δίνοντας στην καθεμία συγκεκριμένη ονομασία και προσθέτοντας μια περιγραφή σχετικά με το τι αντιπροσωπεύει (βοηθητικού χαρακτήρα). Ωστόσο, το στοιχείο που χαρακτηρίζει κάθε τυχαία μεταβλητή είναι η κατανομή που ακολουθεί καθώς και οι παράμετροι αυτής της κατανομής.

Στη βάση του UNICORN υπάρχουν οι σημαντικότερες συναρτήσεις κατανομής όπως η κανονική, η ομοιόμορφη, η Weibull και άλλες.

Σε περίπτωση που κάποια μεταβλητή του συστήματος ακολουθεί διακριτή κατανομή, ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις διακριτές τιμές με τις αντίστοιχες πιθανότητες.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται με εύκολο τρόπο λόγω του εύχρηστου panel του UNICORN. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένα κλασσικό στιγμιότυπο εισαγωγής τυχαίων μεταβλητών με ομοιόμορφες κατανομές.

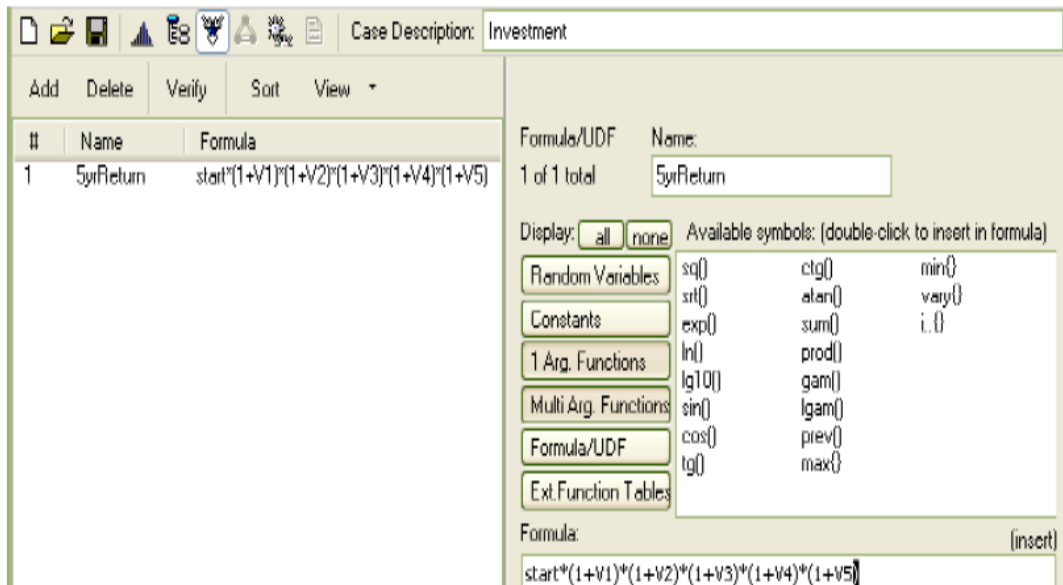


Σχήμα 5.1 Menu εισαγωγής τυχαίων μεταβλητών

Έχοντας, λοιπόν, εισάγει τις τυχαίες μεταβλητές που περιλαμβάνονται στο σύστημα και των απαραίτητων πληροφοριών για κάθε μεταβλητή, το επόμενο βήμα της μελέτης είναι ο καθορισμός του τρόπου που συνδέονται αριθμητικά οι συγκεκριμένες μεταβλητές για την παραγωγή νέων μεγεθών. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω της επιλογής “Formulae” του panel του προγράμματος, μέσω της οποίας δημιουργούμε μαθηματικά μοντέλα-συναρτήσεις με τα οποία συνδέονται οι μεταβλητές εισόδου του συστήματος.

Για τη δημιουργία των επιθυμητών συναρτήσεων, στη βάση του UNICORN υπάρχουν οι πλέον χρησιμοποιούμενες αριθμητικές πράξεις και συναρτήσεις .

Ένα παράδειγμα δημιουργίας συναρτήσεων φαίνεται στο ακόλουθο στιγμιότυπο:



Σχήμα 5.2 Menu Εισαγωγής συναρτήσεων

Σημειώνεται, τέλος, ότι για κάθε μοντέλο που δημιουργείται, μπορούν να εισαχθούν έως 101 μεταβλητές εισόδου ενώ ο υπάρχει απεριόριστο όριο όσον αφορά τις συναρτήσεις που δημιουργούνται από τους χρήστες.

5.3 Καθορισμός των συσχετίσεων των τυχαίων μεταβλητών

Σε ένα σύστημα, όμως, σπανίως ενδιαφερόμαστε μόνο για τις κατανομές κάθε μεταβλητής ξεχωριστά. Αντιθέτως, το σημαντικότερο μέρος της μελέτης σχετίζεται με τον τρόπο που κάθε μεταβλητή σχετίζεται και αλληλεπιδρά με τις υπόλοιπες.

Η εισαγωγή των απαιτούμενων δεδομένων από το χρήστη ολοκληρώνεται με τον καθορισμό της συσχέτισης μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών του συστήματος. Ο καθορισμός της συσχέτισης είναι το τελικό και πλέον σημαντικό βήμα για την έναρξη της διαδικασίας μελέτης του συστήματος.

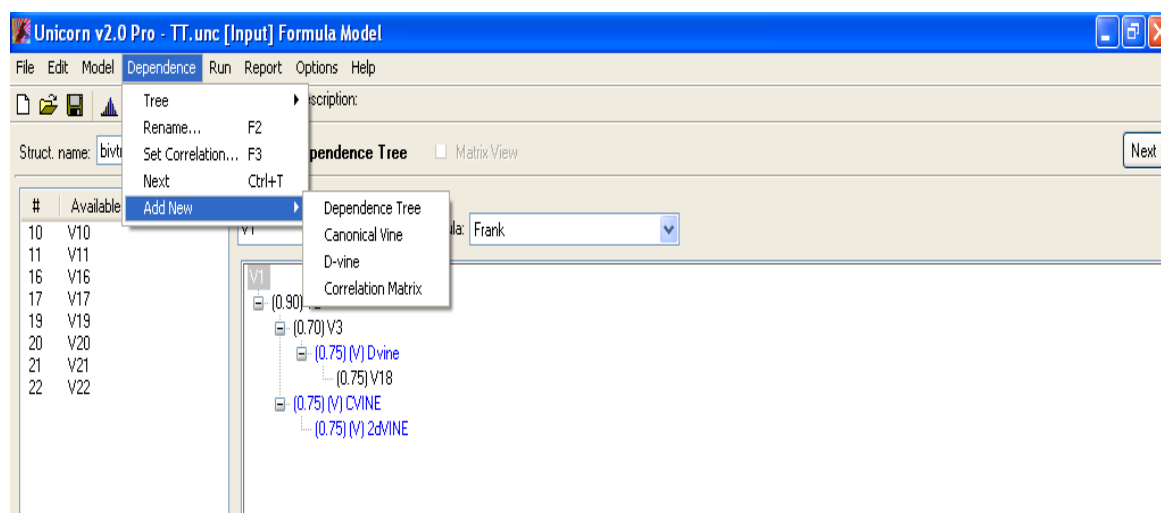
Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι τυχαίες μεταβλητές ενός συστήματος δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και στην περίπτωση που αγνοήσουμε τις συσχετίσεις που παρατηρούνται, τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν θα είναι μη ασφαλή.

Για τον πλήρη καθορισμό της συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών χρησιμοποιείται ένα μοντέλο που συνδυάζει την εισαγωγή των συντελεστών συσχέτισης και την εισαγωγή της κατάλληλης συνάρτησης copula, έννοιες οι οποίες έχουν αναλυθεί στο κεφάλαιο των Τυχαίων Μεταβλητών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης κυμαίνονται από -1 έως 1 και αναλόγως με το είδος της συσχέτισης για το οποίο έχουμε πληροφορίες, χρησιμοποιείται είτε ο συντελεστής του Pearson είτε του Spearman. Υπενθυμίζεται ότι στη μέτρηση της συσχέτισης με το συντελεστή του Spearman το ενδιαφέρον μας εστιάζεται στη θέση που έχει η τιμή μιας μεταβλητής συγκριτικά με τις υπόλοιπες τιμές και όχι στην καθαυτή τιμή. Στο menu του UNICORN υπάρχει επιλογή και για τους δύο τύπους συσχέτισης. Στη μελέτη που πραγματοποιείται μέσω της παρούσας διπλωματικής, όπου αναφέρεται ο όρος «συντελεστής συσχέτισης» εννοείται ο συντελεστής του Spearman καθώς στη μελέτη ενός συστήματος ενδιαφερόμαστε κυρίως για τη συσχέτιση «τάξης μεγέθους».

Μέχρι στιγμής εξετάστηκε η περίπτωση συσχέτισης 2 μεταβλητών. Στην περίπτωση των πολλών μεταβλητών, οι συντελεστές συσχέτισης μπορούν να οργανωθούν σε διάφορες δομές όπως οι πίνακες συσχέτισης, οι δομές τύπου tree και οι δομές τύπου vine.

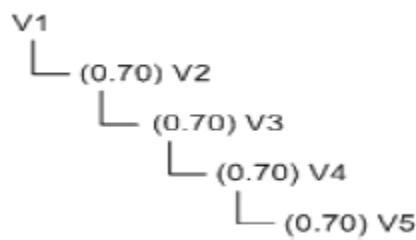
Με την επιλογή “Dependence” του menu ο χρήστης επιλέγει πως επιθυμεί να οργανωθούν οι συντελεστές συσχέτισης με τον τρόπο που φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.3 Menu εισαγωγής δομής συσχέτισης

Στην περίπτωση του πίνακα συσχέτισης (correlation matrix) ο χρήστης καλείται να εισάγει για κάθε ζεύγος μεταβλητών τους αντίστοιχους συντελεστές συσχέτισης. Τα στοιχεία αυτού του πίνακα έχουν τιμές από -1 έως 1 ενώ τα διαγώνια στοιχεία του έχουν την τιμή 1.

Όσον αφορά την περίπτωση της δομής tree (δέντρο), κάθε μεταβλητή αποτελεί έναν κόμβο ενώ πρέπει να οριστεί ποια μεταβλητή θα αποτελεί τον “parent node”. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης εισάγει τις συσχετίσεις κάθε κόμβου με τον επόμενο του κόμβο. Μια δομή τύπου tree έχει την εξής μορφή:

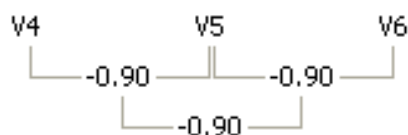


Σχήμα 5.4 Dependence Tree 5 μεταβλητών

Όσον αφορά τις δομές τύπου vine, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ουσιαστικά αποτελούνται από ένα σύνολο δέντρων όπου ο κόμβος του επόμενου δέντρου είναι ο κλάδος του προηγούμενου.

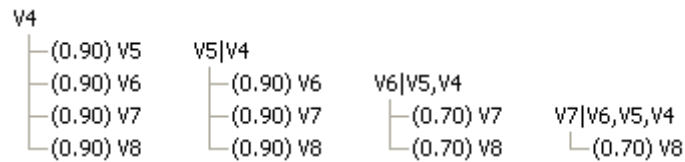
Στην περίπτωση της δομής τύπου vine, υπάρχουν 2 κατηγορίες αυτού του τύπου: οι δομές τύπου C-vine (Canonical vines) και οι δομές τύπου D-vine (drawing vine).

Τα D-Vines αποτελούνται από φωλιασμένα δέντρα οι κόμβοι των οποίων προέρχονται από το πολύ 2 κλάδους. Για τρεις μεταβλητές και για $\rho = -0.9$ η συγκεκριμένη δομή έχει την εξής δομή:



Σχήμα 5.5 D-Vine

Τα C-Vines αποτελούνται από φωλιασμένα (nested) δέντρα όπου κάθε δέντρο έχει έναν κόμβο μέγιστου βαθμού. Για τέσσερις μεταβλητές η συγκεριμμένη δομή, για διάφορες τιμές του συντελεστή συσχέτισης έχει την εξής μορφή:



Σχήμα 5.6 C-Vine

Για την παραπάνω περίπτωση, έχουμε συνολικά 8 μεταβλητές. Οι μεταβλητές 5,6,7 και 8 συνδέονται με τη μεταβλητή 8 με τους συντελεστές συσχέτισης που φαίνονται στο διάγραμμα. Η μεταβλητή 5 με τις μεταβλητές 6,7 και 8 υπό τη δέσμευση της σύνδεσης με τον 4 κ.ο.κ

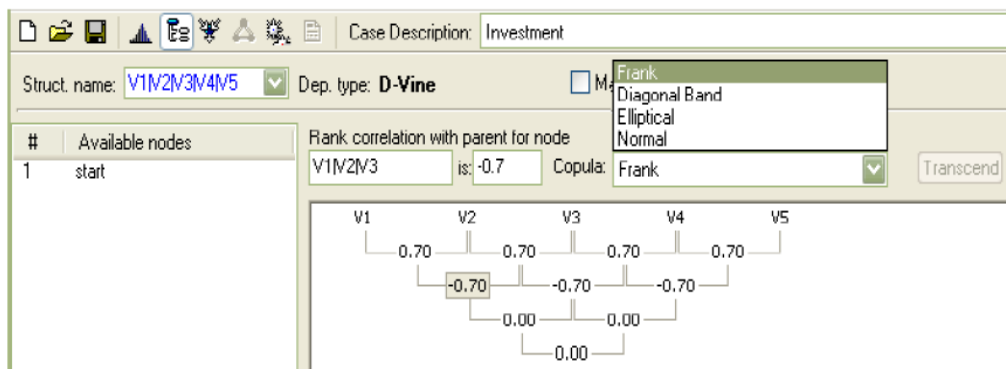
Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η απλή δομή των trees μπορεί να μετατραπεί σε πιο σύνθετες δομές ενώνοντας δέντρα μεταξύ τους μέσω των αντίστοιχων επιλογών του menu του προγράμματος (drag-and-drop actions).

Ο καθορισμός της συσχέτισης των τυχαίων μεταβλητών του υπό μελέτη συστήματος ολοκληρώνεται με τον καθορισμό της copula που θα χρησιμοποιηθεί.

Στο menu του προγράμματος περιλαμβάνονται οι τύποι συζεύξεων που χρησιμοποιούνται συχνότερα, οι οποίες είναι : η normal, η diagonal band, η elliptical, η Frank's και η minimum information.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση των vines, η minimum information copula δεν είναι διαθέσιμη ενώ εάν χρησιμοποιηθεί ο πίνακας συσχέτισης ως δομή, είναι εκ των προτέρων καθορισμένο ότι θα χρησιμοποιηθεί η Normal Copula.

Στο στιγμιότυπο που ακολουθεί φαίνεται ο τρόπος εισαγωγής της επιθυμητής copula για ένα σύστημα 5 τυχαίων μεταβλητών που συσχετίζονται με D-Vine δομή συσχέτισης:



Σχήμα 5.7 Menu εισαγωγής Copula

5.4 Προσομοιώσεις μέσω του UNICORN

Όπως ήδη αναφέρθηκε, μια από τις πιο χρήσιμες δυνατότητες που προσφέρει το UNICORN είναι η δυνατότητα πραγματοποίησης μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων με εύκολο και γρήγορο τρόπο.

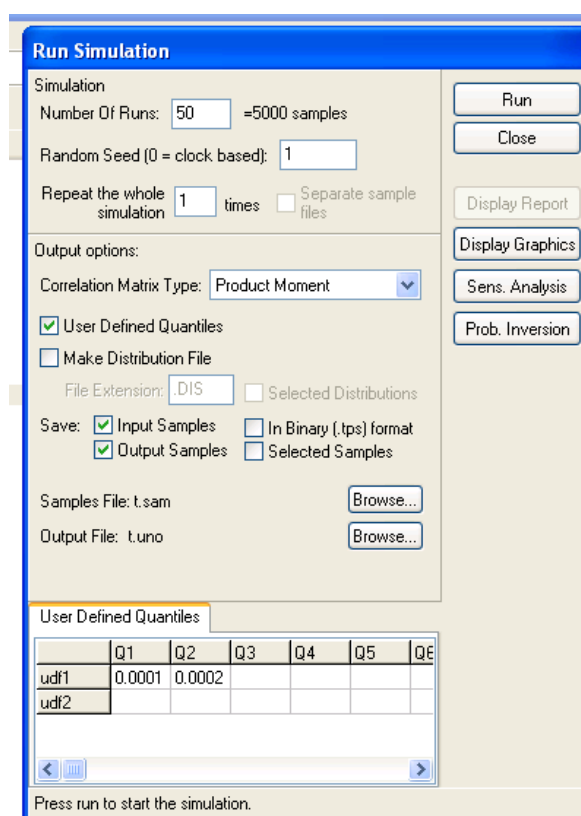
Έχοντας πραγματοποιήσει τις διαδικασίες που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους όπως η εισαγωγή των τυχαίων μεταβλητών, ο καθορισμός του τρόπου που συνδέονται οι μεταβλητές μέσω formulas και ο καθορισμός της συσχέτισής τους, το UNICORN έχει τροφοδοτηθεί με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την πραγματοποίηση προσομοιώσεων, μέσω των οποίων θα προκύψουν πολύτιμα συμπεράσματα.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει πόσες φορές θα «τρέξει» η προσομοίωση, δηλαδή ποιος είναι ο επιθυμητός αριθμός των τιμών που θα παραχθούν. Κάθε φορά που τρέχει η προσομοίωση παράγονται 100 τιμές-δείγματα για κάθε μεταβλητή. Τα προαναφερθέντα στοιχεία καθορίζονται με βάση την ακρίβεια που επιθυμεί να προσδώσει ο χρήστης στη μελέτη του καθώς και τις διαδικασίες στις οποίες τα παραχθέντα δείγματα πρόκειται να χρησιμοποιηθούν μετέπειτα.

Εκτός από τη δειγματοληψία των τυχαίων μεταβλητών που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα, γίνεται και δειγματοληψία των formulas που έχει δημιουργήσει ο χρήστης δηλαδή παράγονται τιμές-δείγματα για τις συναρτήσεις που συνδέουν τις τυχαίες μεταβλητές κι

έχουν καθοριστεί από το χρήστη. Οι τιμές που προκύπτουν για τις συναρτήσεις αποτελούν τα δείγματα εξόδου (output samples) για τα οποία μετά το πέρας της προσομοίωσης είναι δυνατός ο υπολογισμός της μεταξύ τους συσχέτισης. Οι συντελεστές συσχέτισης των δειγμάτων εξόδου οργανώνονται σε έναν πίνακα συσχέτισης, ο οποίος μπορεί να είναι είτε τύπου “Product moment correlation matrix” (συσχέτιση μεταξύ των τιμών) είτε τύπου “Rank correlation matrix” (συσχέτιση τάξης μεγέθους). Την παραπάνω επιλογή την κάνει ο χρήστης μέσω του menu.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η δειγματοληψία βασίζεται στις κατανομές των μεταβλητών που περιλαμβάνει κάθε συνάρτηση και στο μαθηματικό μοντέλο που συνδέει τις μεταβλητές. Ακολουθεί ένα στιγμιότυπο από τη χρήση του UNICORN που απεικονίζει τον τρόπο επιλογής των παραμέτρων της προσομοίωσης:



Σχήμα 5.8 Menu προσομοίωσης

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω στιγμιότυπο, υπάρχει μια σειρά στοιχείων που ο χρήστης πρέπει να καθορίσει ανάλογα με τον τύπο της προσομοίωσης που επιθυμεί να πραγματοποιήσει.

Η απλούστερη, λοιπόν, λειτουργία της προσομοίωσης είναι η παραγωγή τυχαίων τιμών για τις μεταβλητές του συστήματος (ή ακριβέστερα ψευδοτυχαίων τιμών εφόσον η παραγωγή αυτών των δειγμάτων βασίζεται σε συγκεκριμένες συναρτήσεις κατανομής, διαστήματα τιμών, συσχετίσεις μεταβλητών κλπ).

Πέρα από τη δειγματοληψία των μεταβλητών και των συναρτήσεων, η διαδικασία της προσομοίωσης προσφέρει δυνατότητες όπως η δημιουργία διαφόρων τύπων διαγραμμάτων και εν τέλει η παρουσίαση ολοκληρωμένης αναφοράς με τα συνολικά αποτελέσματα της προσομοίωσης, αναλυτικές πληροφορίες για τις οποίες βρίσκονται στις επόμενες παραγράφους.

Σημειώνεται ότι προκειμένου να παραχθούν αυτά τα διαγράμματα, οι τιμές-δείγματα που έχουν προκύψει από την προσομοίωση πρέπει να αποθηκευτούν σε ένα αρχείο. Γι αυτό το λόγο, στο menu της προσομοίωσης πρέπει να τσεκριστούν οι επιλογές Save input files και Save output files. Ως input samples θεωρούνται τα δείγματα που έχουν παραχθεί για τις τυχαίες μεταβλητές εισόδου που έχει εισάγει ο χρήστης ενώ ως output samples θεωρούνται οι τιμές-δείγματα που έχουν παραχθεί για τις συναρτήσεις που έχει ορίσει ο χρήστης (UDFs).

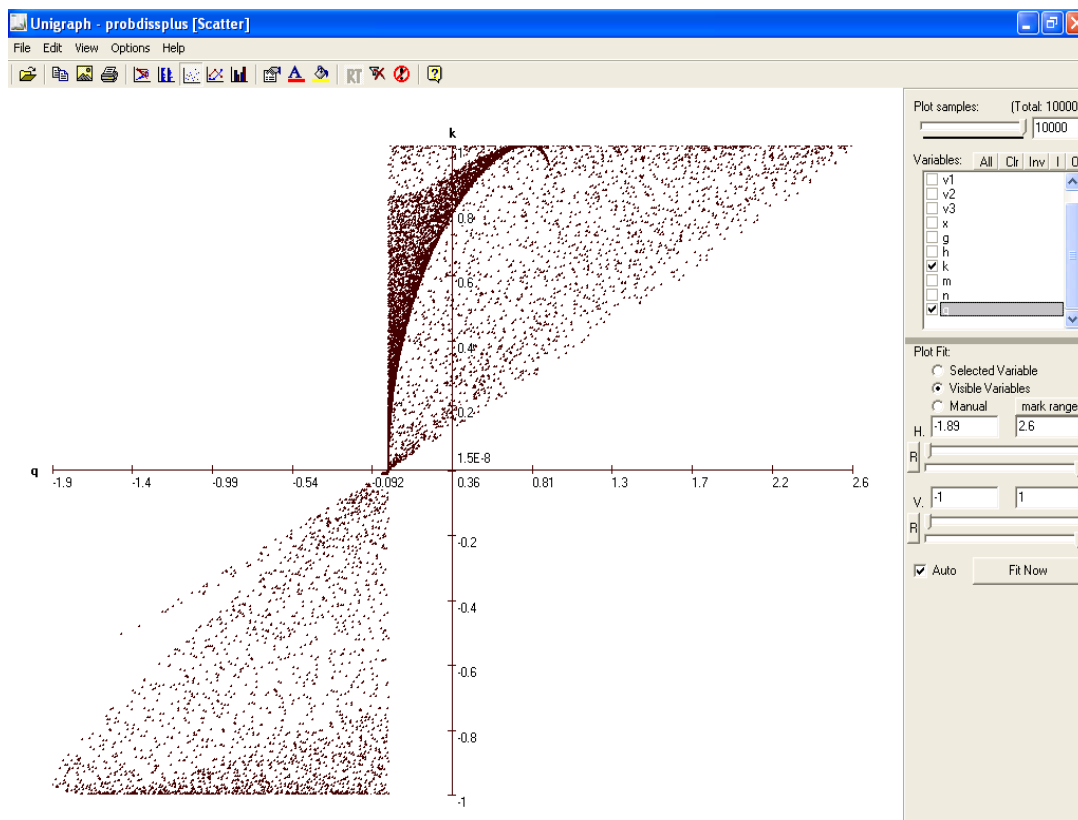
Τα δείγματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις αποθηκεύονται σε ένα αρχείο τύπου .sae , αλλάζοντας κατάλληλα την κατάληξη του οποίου, μετατρέπεται σε αρχείο τύπου .xls ή .m και ο χειρισμός του γίνεται μέσω Excel ή Matlab αντίστοιχα.

Όσον αφορά την επιλογή Random seed, στο συγκεκριμένο πεδίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει έναν ακέραιο αριθμό μεταξύ 1 και 32767. Σε κάθε διαφορετικό ακέραιο αντιστοιχεί και μια διαφορετική ακολουθία δειγμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση.

5.5 Πακέτο Unigraph

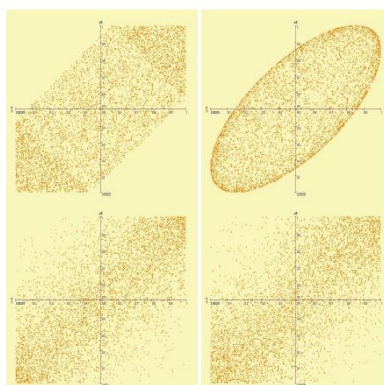
Το UNIGRAPH είναι ένα πακέτο που περιέχεται στο πρόγραμμα UNICORN, μέσω του οποίου κατασκευάζονται και παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προκύπτουν μετά από κάθε προσομοίωση. Οι διαθέσιμοι τύποι διαγραμμάτων είναι οι εξής: Cobwebs, Marginals, Scatter, Density and Histogram.

Ο τρόπος εμφάνισης ενός διαγράμματος διασποράς (scatter diagram) στο panel του UNIGRAPH φαίνεται στο παρακάτω στιγμιότυπο:



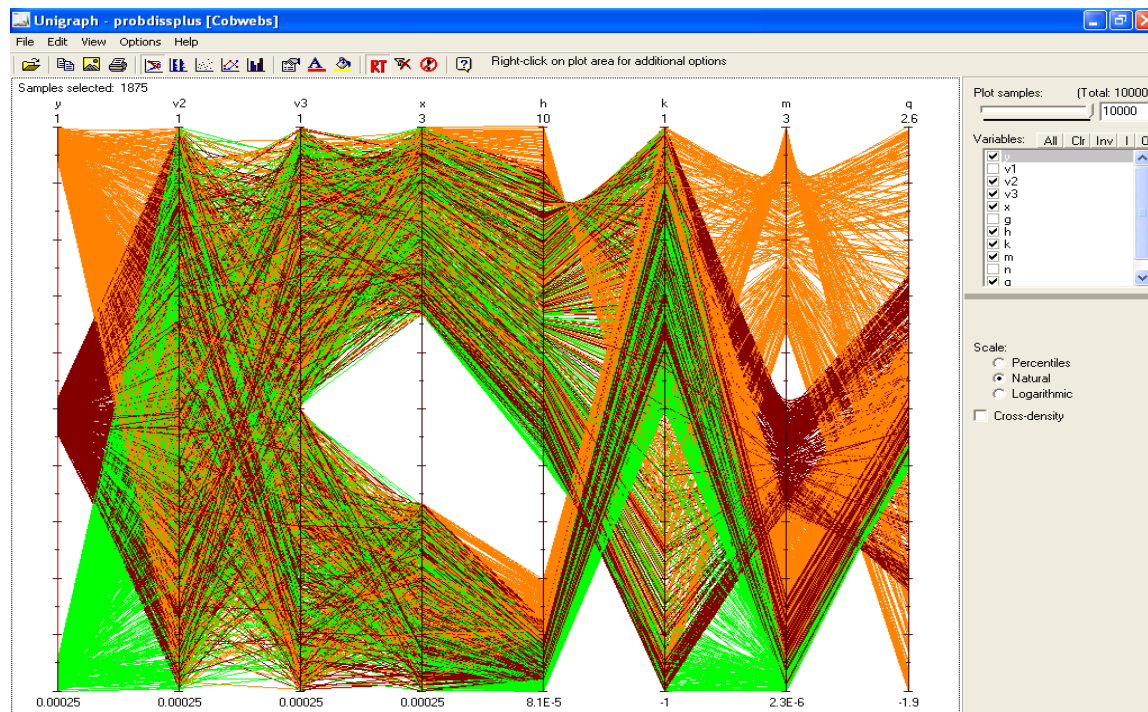
Σχήμα 5.9 Παράδειγμα διαγράμματος διασποράς στο UNICORN

Τα παρακάτω διαγράμματα αποτελούν τα διαγράμματα διασποράς για 2 τυχαίες μεταβλητές με κανονική κατανομή και συντελεστή συσχέτισης $\rho=0.7$. Τα διαγράμματα έχουν κατασκευαστεί για τις copulas: diagonal band, elliptical, Frank's και minimum information αντίστοιχα.



Σχήμα 5.10 Διαγράμματα διασποράς για 4 είδη Copulas

Σημαντικοί, επίσης, τύποι διαγραμμάτων είναι τα cobweb διαγράμματα, δύο παραδείγματα των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω για 8 μεταβλητές.



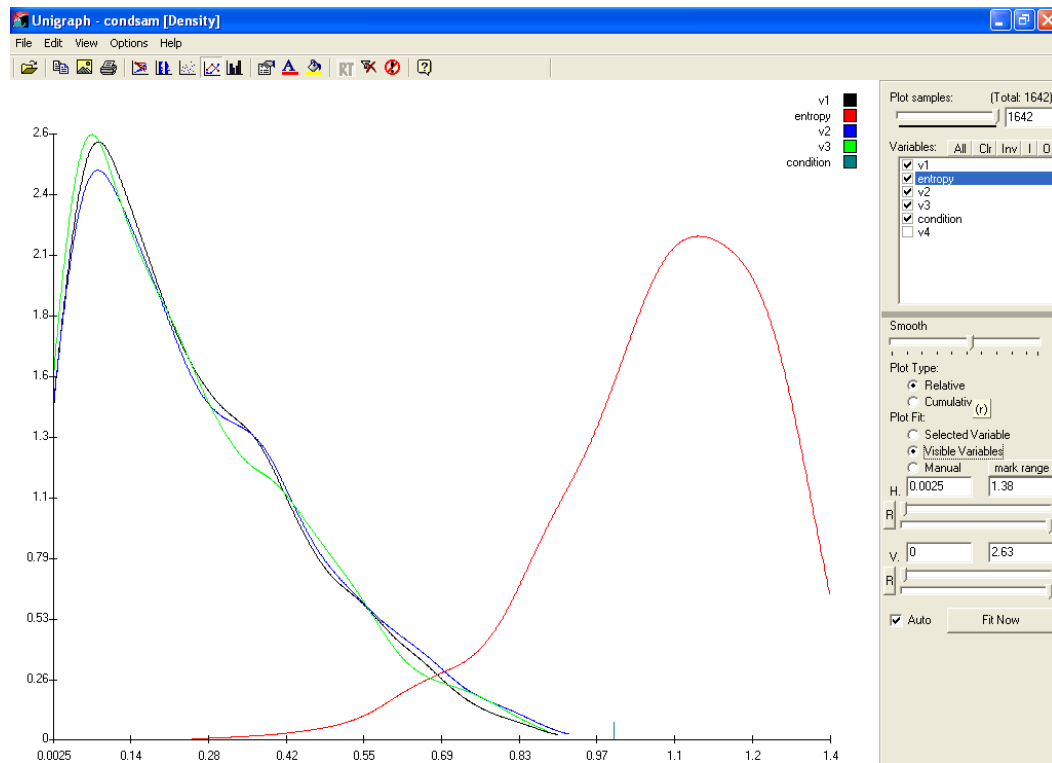
Σχήμα 5.11 Cobweb διαγράμματα στο UNICORN

Τα διαγράμματα τύπου cobweb αποτελούν μια γραφική αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών του υπο μελέτη συστήματος.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω στιγμιότυπο, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποιές μεταβλητές επιθυμεί να περιλαμβάνει το διάγραμμα, τον επιθυμητό αριθμό δειγμάτων και το είδος της κλίμακας με βάση την οποία θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα (λογαριθμική κλπ).

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας διαγραμμάτων πυκνότητας πιθανότητας (density plots) και ιστογραμμάτων τα οποία παρέχουν με γρήγορο τρόπο μια πρώτη άποψη σχετικά με τις τιμές των μεταβλητών που έχουν προκύψει από τις προσομοιώσεις.

Ένα παράδειγμα διαγραμμάτων πυκνότητας πιθανότητας φαίνεται στο ακόλουθο στιγμιότυπο του UNICORN:



Σχήμα 5.12 Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας

Από το menu του UNIGRAPH εκτός από τον τύπο του διαγράμματος, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις διάφορες παραμέτρους των διαγραμμάτων όπως ο τρόπος εμφάνισης (χρώματα καμπυλών, μέγεθων των «κουκίδων» στα διαγράμματα διασποράς, αριθμός δειγμάτων κλπ).

5.6 Δειγματοληψία υπό συνθήκη

Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε αναφορά στην παραγωγή «ψευδοτυχαίων» αριθμών – δειγμάτων με συγκεκριμένες κατανομές, μέσες τιμές κλπ.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, ωστόσο, ειδικά εάν το σύστημα που μελετάμε περιλαμβάνει πολλές μεταβλητές και συναρτήσεις, τίθενται κάποιοι περιορισμοί σχετικά με τις τιμές που επιθυμούμε να λάβουν τα δείγματα που θα παραχθούν μέσω της διαδικασίας της προσομοίωσης.

Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας συνάρτησης-συνθήκης είναι η εξής:

$$iK\{Y_L, Y_1, \dots, Y_M, Y_U\}$$

Η παραπάνω συνάρτηση παίρνει την τιμή 1 εάν οι τιμές των Y_1, \dots, Y_M είναι μεταξύ του Y_L και του Y_U . Σε αντίθετη περίπτωση παίρνει την τιμή 0. Το ∞ και το $-\infty$ συμβολίζονται με \ll και \gg αντίστοιχα. Συνδυάζοντας τα παραπάνω, αν θέλουμε να κάνουμε έλεγχο για το αν μια τιμή είναι αρνητική ή θετική, χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση $i1\{0, Y, \ll\}$, η οποία επιστρέφει 1 εάν ο αριθμός είναι μη-αρνητικός και 0 εάν είναι αρνητικός.

Παράδειγμα άλλης συνάρτησης είναι η $i\#\{Y_L, Y_1, \dots, Y_M, Y_U\}$, η οποία επιστρέφει τον αριθμό των Y_L, \dots, Y_M που είναι μεγαλύτεροι ή ίσοι του Y_L και μικρότεροι ή ίσοι του Y_M .

Τα ορίσματα των παραπάνω συναρτήσεων μπορεί να είναι τυχαίες μεταβλητές, συναρτήσεις ορισμένες από το χρήστη, αριθμητικές παραστάσεις κλπ.

Ένα απλό παράδειγμα συνθήκης που πρέπει να πληρούν τα δείγματα που θα παραχθούν είναι η περίπτωση όπου απαιτείται το άθροισμα των τιμών κάποιων μεταβλητών του συστήματος να μην ξεπερνούν κάποια συγκεκριμένη τιμή.

Έστω για παράδειγμα ότι έχουμε 3 τυχαίες μεταβλητές που αναπαριστούν φορτία (L_1, L_2, L_3), οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή. Μια συνθήκη που θα μπορούσε να τεθεί είναι το άθροισμα των τιμών των 3 φορτίων να μην ξεπερνούν τη μονάδα. Μια τέτοια συνθήκη δημιουργείται κατασκευάζοντας μια συνάρτηση με την ονομασία "condition". Για το παράδειγμα με τα τρία φορτία που αναφέραμε, η συνάρτηση με το όνομα condition έχει τη μορφή: condition: $i1\{0, L_1 + L_2 + L_3, 0.9999\}$.

Εάν η τιμή της συνάρτησης condition είναι 1, τότε η συνθήκη πλεριείται και τα δείγματα που έχουν παραχθεί για τις μεταβλητές L_1, L_2, L_3 γίνονται αποδεκτά. Εάν η συνάρτηση παίρνει την τιμή 0 τότε τα δείγματα απορρίπτονται.

5.7 Οι συναρτήσεις "prev" και "vary"

Οι τιμές των συναρτήσεων που έχουν οριστεί από το χρήστη (User Defined Functions-UDFs) για το n-οστό δείγμα διατηρούνται στη μνήμη κατά τη διάρκεια του υπολογισμού για το (n+1)-οστό δείγμα. Αυτό σημαίνει ότι προηγούμενες τιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των τωρινών τιμών. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η έκφραση

prev(a), όπου το a είναι μια ταθερά που καθορίζει την τιμή που θα χρησιμοποιηθεί στο πρώτο δείγμα.

Για παράδειγμα, οι εκφράσεις:

$$\text{UDF1} = \text{prev}(0) + 1 \quad (5.1)$$

$$\text{UDF2} = 2 * \text{prev}(\text{UDF1}) \quad (5.2)$$

έχουν το εξής αποτέλεσμα:

Αν n ο αριθμός των δειγμάτων, στο τέλος της προσομοίωσης η UDF1 έχει την τιμή n ενώ η UDF2 στο τέλος της προσομοίωσης έχει την τιμή 2(n-1).

Όσον αφορά τη συνάρτηση vary, χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις συναρτήσεις SUM και PROD για τη δημιουργία απλών loops.

Η γενική σύνταξη της συνάρτησης VARY είναι: VARY{bound1, bound2, stepsize}

Για παράδειγμα, η παρακάτω δομή:

UDF1 (name j): VARY{1,5,1}

UDF2 (name k): VARY{1,5,1}

UDF3: X^j * Y^k

UDF4: SUM(UDF3)

υπολογίζει το άθροισμα των 5 πρώτων δυνάμεων των μεταβλητών X και Y.

5.8 Ανάλυση Ευαισθησίας

Στα πλαίσια της ανάλυσης ενός συστήματος, σημαντικές πληροφορίες λαμβάνουμε από την ανάλυση της ευαισθησίας του ως προς τις μεταβλητές του. Ο χρήστης καλείται να επιλέξει ποιες μεταβλητές θα περιλαμβάνει η ανάλυση ευαισθησίας, δηλαδή να καθορίσει ποιων

μεταβλητών την ευαισθησία επιθυμεί να μελετήσει και ως προς ποιες μεταβλητές θα γίνει η ανάλυση. Ένα στιγμιότυπο του αντίστοιχου panel του UNICORN φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, όπου είναι διαθέσιμες όλες οι μεταβλητές που έχει ορίσει ο χρήστης στην αρχή της μοντελοποίησης του συστήματος και ο χρήστης μπορεί είτε να τις επιλέξει όλες είτε να κάνει επιλογή ανάλογα με τις πληροφορίες που τον ενδιαφέρουν.

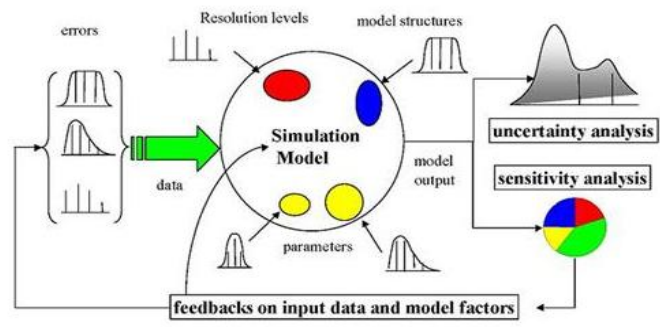
The screenshot shows the 'Sensitivity Analysis' window with the 'Detailed results' panel active. The table below represents the data shown in the interface.

Id	Predicted variable	Base variable	Product moment correlation	Rank correlation	Regression coefficient	Correlation ratio	Partial correlation coeff.	Partial regression coeff.	Multiple correlation coeff.
1	g	y	0.30948409	0.39618108	1.15492344	0.09696134	0.51098537	1.11688960	0.86412203
2	g	v1	0.10005539	0.13841274	0.38433260	0.01347289	0.24668188	0.49240389	0.86412203
3	g	v2	0.10481005	0.15028064	0.39558381	0.01457768	0.21333732	0.41501281	0.86412203
4	g	v3	0.79245228	0.74248326	3.02285576	0.66264039	0.84467119	3.03127646	0.86412203
5	k	y	0.24982193	0.30672270	0.53418750	0.06619119	0.31606400	0.51700306	0.68822664
6	k	v1	0.15121043	0.22986642	0.33281028	0.02713709	0.20344119	0.33200169	0.68822664
7	k	v2	0.52220833	0.44605234	1.12934756	0.35427347	0.57804507	1.11203945	0.68822664
8	k	v3	-0.35360333	-0.24637593	-0.77287436	0.15464559	-0.42903081	-0.75362659	0.68822664

Σχήμα 5.13 Menu ανάλυσης ευαισθησίας

Ως base variables χαρακτηρίζονται οι μεταβλητές ως προς τις οποίες γίνεται η ανάλυση ενώ ως predicted variables χαρακτηρίζονται οι μεταβλητές των οποίων μας ενδιαφέρει η διακύμανση ανάλογα με τις μεταβλητές των base variables. Αφού τροφοδοτήσουμε το πρόγραμμα με τις απαραίτητες πληροφορίες, λαμβάνουμε τα απαιτούμενα αποτελέσματα (ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τον τρόπο μέτρησης της ευαισθησίας, ενώ κάποια από τα μέτρα φαίνονται παραπάνω) από την ανάλυση ευαισθησίας όπως φαίνεται και στο παραπάνω στιγμιότυπο.

Η συνολική διαδικασία που πραγματοποιείται για την ανάλυση της ευαισθησίας ενός συστήματος μέσω της διαδικασίας της προσομοίωσης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 5.14 Διαδικασία ανάλυσης ευαισθησίας

6

Μελέτη Δικτύου 26 ζυγών με έντονη Διείσδυση Αιολικής Ενέργειας

6.1 Περιγραφή Συστήματος

Η παρούσα μελέτη εφαρμόζεται σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διείσδυση Αιολικής Ενέργειας.

Συνεπώς, το συγκεκριμένο σύστημα παρουσιάζει έντονα στοιχεία αβεβαιότητας κάτι που απαιτεί τη μοντελοποίησή του, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εύκολη και ασφαλής διαχείρισή του.

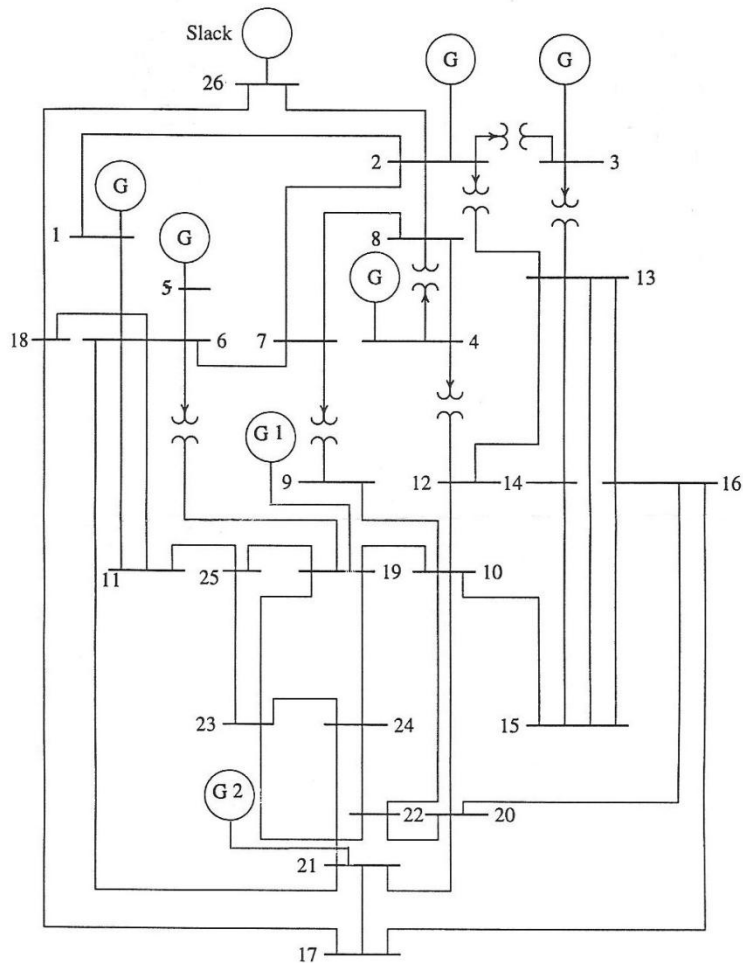
Τα θέματα που εξετάζονται στο παρόν κεφάλαιο είναι:

- Η θεωρία των Stochastic Plants και η συμπεριφορά τους για διάφορα σενάρια συμπεριφοράς των μεταβλητών που περιλαμβάνουν
- Η στοχαστική ροή φορτίου. Με δεδομένη την έντονη αβεβαιότητα φορτίου και αιολικής παραγωγής, επιχειρείται η επίλυση της ροής φορτίου του δικτύου με μη ντετερμινιστικές μεθόδους.

6.1.1 Περιγραφή Δικτύου

Το υπο μελέτη δίκτυο αποτελείται από 26 ζυγούς και 46 γραμμές μεταφοράς. Ο ζυγός 26 είναι ο ζυγός αναφοράς του συστήματος, οι ζυγοί 1-5 έχουν χαρακτηριστεί ως ζυγοί PV ενώ οι υπόλοιποι 20 χαρακτηρίστηκαν ως ζυγοί PQ.

Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 6.1 Σύστημα 26 ζυγών

Στους ζυγούς 1-5 υπάρχουν εγκατεστημένες 5 μονάδες συμβατικής παραγωγής με τις εξής ονομαστικές ισχύεις:

	<i>Εγκατεστημένη ισχύς</i>
Μονάδα 1	360 MW
Μονάδα 2	279 MW
Μονάδα 3	360 MW
Μονάδα 4	350 MW
Μονάδα 5	400 MW

Πίνακας 6.1 Εγκατεστημένη ισχύς Αιολικών Πάρκων

Όσον αφορά τη συμμετοχή Αιολικών μονάδων παραγωγής στο σύστημα, στο ζυγό 21 είναι εγκατεστημένο ένα Αιολικό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 128 MW που απαρτίζεται από

150 Α/Γ ενώ στο ζυγό 19 είναι συνδεδεμένο ένα Stochastic Plant Αιολικής παραγωγής το οποίο χωρίζεται σε 3 υποπεριοχές – ομάδες Α/Γ με τα εξής χαρακτηριστικά:

	Αριθμός Α/Γ	Εγκατεστημένη ισχύς
Stochastic Plant – Ζυγός 19 – Περιοχή 1	50	42.5 MW
Stochastic Plant – Ζυγός 19 – Περιοχή 2	100	85 MW
Stochastic Plant – Ζυγός 19 – Περιοχή 3	100	85 MW

Πίνακας 6.2 Κατανομή εγκατεστημένος ισχύος στις 3 περιοχές του SGP

Ο τρόπος σύνδεσης των ζυγών του συστήματος και τα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

```

%          Bus bus  R      X      1/2 B      = 1 for lines
%          nl  nr  p.u.   p.u.   p.u.      >1 or<1 tr. tap at bus nl
linedata=[26  2  0.00055  0.00480  0.03000  1
           26 18  0.00130  0.01150  0.06000  1
           2  3  0.00146  0.05130  0.05000  0.96
           2  7  0.01030  0.05860  0.01800  1
           2  8  0.00740  0.03210  0.03900  1
           2 13  0.00357  0.09670  0.02500  0.96
           2  1  0.03230  0.19670  0.00000  1
           3 13  0.00070  0.00548  0.00050  1.017
           4  8  0.00080  0.02400  0.00010  1.050
           4 12  0.00160  0.02070  0.01500  1.050
           5  6  0.00690  0.03000  0.09900  1
           6  7  0.00535  0.03060  0.00105  1
           6 11  0.00970  0.05700  0.00010  1
           6 18  0.00374  0.02220  0.00120  1
           6 19  0.00350  0.06600  0.04500  0.95
           6 21  0.00500  0.09000  0.02260  1
           7  8  0.00120  0.00693  0.00010  1
           7  9  0.00095  0.04290  0.02500  0.95
           8 12  0.00200  0.01800  0.02000  1
           9 10  0.00104  0.04930  0.00100  1
          10 12  0.00247  0.01320  0.01000  1
          10 19  0.05470  0.23600  0.00000  1
          10 20  0.00660  0.01600  0.00100  1
          10 22  0.00690  0.02980  0.00500  1
          11 25  0.09600  0.27000  0.01000  1
          11  1  0.01650  0.09700  0.00400  1
          12 14  0.03270  0.08020  0.00000  1
          12 15  0.01800  0.05980  0.00000  1
          13 14  0.00460  0.02710  0.00100  1
          13 15  0.01160  0.06100  0.00000  1
          13 16  0.01793  0.08880  0.00100  1
          14 15  0.00690  0.03820  0.00000  1
          15 16  0.02090  0.05120  0.00000  1
          16 17  0.09900  0.06000  0.00000  1
          16 20  0.02390  0.05850  0.00000  1
          17 18  0.00320  0.06000  0.03800  1
          17 21  0.22900  0.44500  0.00000  1
          19 23  0.03000  0.13100  0.00000  1
          19 24  0.03000  0.12500  0.00200  1
          19 25  0.11900  0.22490  0.00400  1
          20 21  0.06570  0.15700  0.00000  1
          20 22  0.01500  0.03660  0.00000  1
          21 24  0.04760  0.15100  0.00000  1
          22 23  0.02900  0.09900  0.00000  1
          22 24  0.03100  0.08800  0.00000  1
          23 25  0.09870  0.11680  0.00000  1];

```

Πίνακας 6.3 Χαρακτηριστικά των γραμμών του δικτύου

6.1.2 Περιθώριες κατανομές των μεταβλητών του συστήματος

Πρώτο βήμα για την πιθανοτική προσέγγιση του συγκεκριμένου συστήματος αποτελεί ο καθορισμός των κατανομών που ακολουθούν τα μεγέθη που παρουσιάζουν στοχαστική συμπεριφορά. Βάσει των περιθωριων κατανομών τους θα παραχθούν τα απαραίτητα δείγματα για την πραγματοποίηση της μελέτης του κεφαλαίου.

Όσον αφορά τα φορτία, θεωρήθηκε ότι ακολουθούν κανονικές κατανομές με τις εξής αναμενόμενες τιμές:

%	Bus	---Load---	
%		MW	Mvar
	1	40	20
	2	22	15
	3	64	50
	4	25	10
	5	50	30
	6	76	29
	7	10	40
	8	0	0
	9	89	50
	10	0	0
	11	25	15
	12	89	48
	13	31	15
	14	24	12
	15	70	31
	16	55	27
	17	78	38
	18	153	67
	19	75	15
	20	48	27
	21	46	23
	22	45	22
	23	25	12
	24	54	27
	25	28	13
	26	51	41

Πίνακας 6.4 Αναμενόμενες τιμές φορτίων

Οι τυπικές αποκλίσεις των φορτίων θεωρήθηκε ότι είναι της τάξης του 10% των αναμενόμενων τιμών.

Για την προσομοίωση των παραγωγών από τις συμβατικές εγκαταστάσεις θεωρήθηκαν διακριτές κατανομές με τα εξής χαρακτηριστικά:

	Πιθανότητα
Κατάσταση βλάβης – συντήρησης: Μηδενική παραγωγή	0.01
Ονομαστική Παραγωγή	0.98
Παραγωγή 50% της ονομαστικής	0.01

Πίνακας 6.5 Στοιχεία προσομοίωσης συμβατικών παραγωγών

Για τις Αιολικές παραγωγές δε θεωρήθηκαν εκ των προτέρων συγκεκριμένες κατανομές αλλά προέκυψαν ως συνδυασμοί των Weibull κατανομών των ταχυτήτων του ανέμου.

Οι παράμετροι των κατανομών Weibull της ταχύτητας του ανέμου για τις υπο μελέτη περιοχές είναι οι εξής:

	Παράμετρος β	Παράμετρος n
Αιολικό Πάρκο – Ζυγός 21	2.1	12
Stochastic Plant – Ζυγός 19 – Περιοχή 1	1.8	11.8
Stochastic Plant – Ζυγός 19 – Περιοχή 2	1.8	11.9
Stochastic Plant – Ζυγός 19 – Περιοχή 3	2	12.3

Πίνακας 6.6 Παράμετροι κατανομών Weibull ταχυτήτων ανέμου

Η σύνδεση των Αιολικών παραγωγών με τις ταχύτητες του ανέμου έγινε λαμβάνοντας υπόψιν την εξής καμπύλη ισχύος (ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 0.85 MW) :

6.2.1 Επίδραση της συσχέτισης των ταχυτήτων του ανέμου στη συνολική παραγόμενη ισχύ του SGP

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να εξεταστεί το κατά πόσο είναι δυνατόν η συνολική ισχύς που συνδέεται στο ζυγό 19 του συστήματος να επηρεαστεί από τις συσχετίσεις μεταξύ των ταχυτήτων του ανέμου στις 3 περιοχές που αποτελούν το Stochastic Generation Plant.

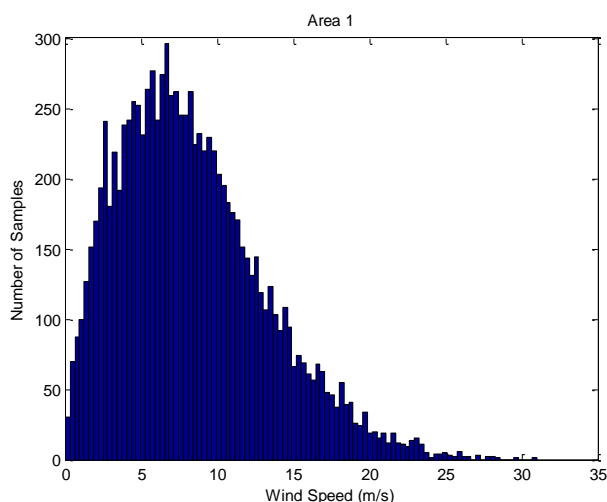
Σημαντικά συμπεράσματα θα προκύψουν σχετικά με το αν ο καθορισμός των κατανομών των ταχυτήτων του ανέμου είναι αρκετός για την ασφαλή πρόβλεψη της συμπεριφοράς της παραγόμενης ισχύος του SGP.

Για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης μελέτης, αναπτύχθηκαν 3 σενάρια συσχέτισης για τις ταχύτητες του ανέμου στις 3 υποπεριοχές του SGP:

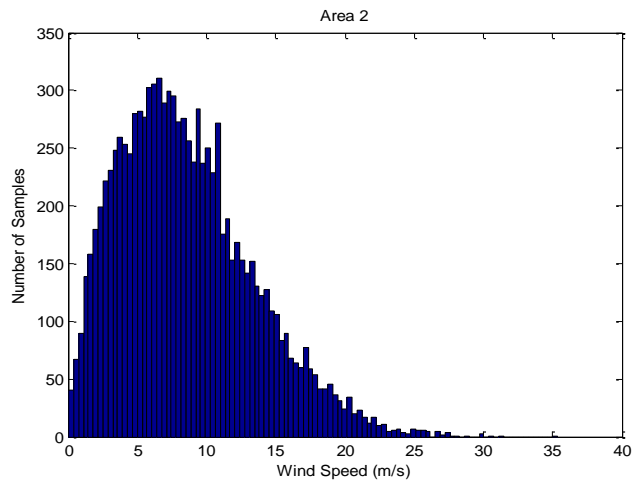
- Πλήρης ανεξαρτησία ($\rho=0$)
- Μεσαία συσχέτιση ($\rho = 0.5$)
- Πλήρης θετική συσχέτιση ($\rho=1$)

Κατά την υλοποίηση των παραπάνω σεναρίων συσχέτισης οι παράμετροι των ταχυτήτων του ανέμου διατηρήθηκαν σταθερές και ίσες με αυτές που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

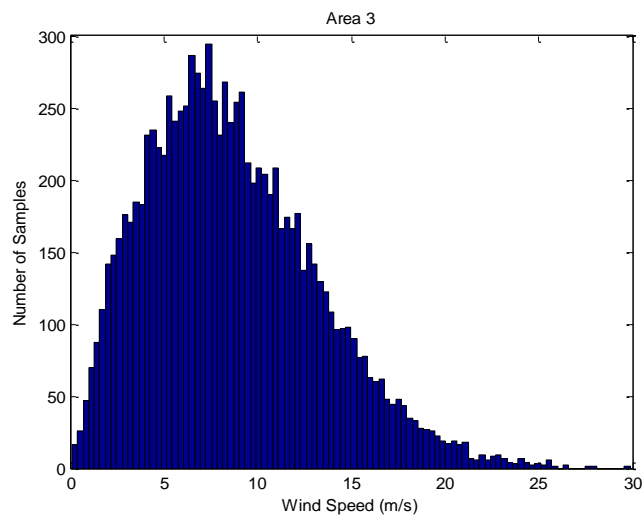
Οι κατανομές της ταχύτητας του ανέμου στις περιοχές του SP 19 παρουσιάζουν τις εξής κατανομές (10000 δείγματα):



Σχήμα 6.3 Κατανομή ανέμου –Περιοχή 1



Σχήμα 6.4 Κατανομή ανέμου –Περιοχή 2



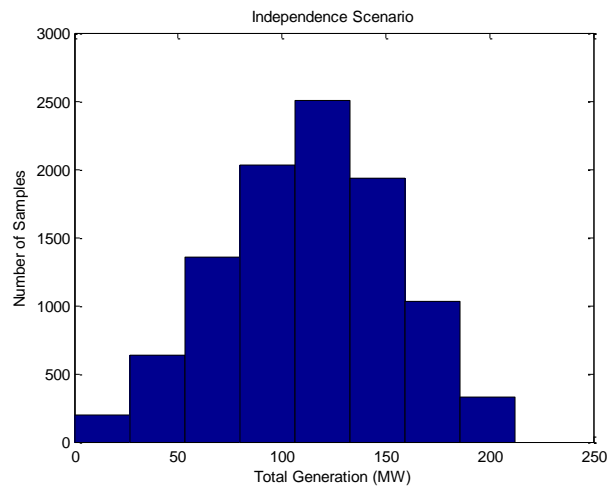
Σχήμα 6.5 Κατανομή ανέμου –Περιοχή 3

Οι παραπάνω κατανομές παρέμειναν σταθερές κατά την υλοποίηση των σεναρίων ενώ η αναγωγή των ταχυτήτων στο ύψος του άξονα της έλικας των Α/Γ έγινε μέσω της σχέσης:

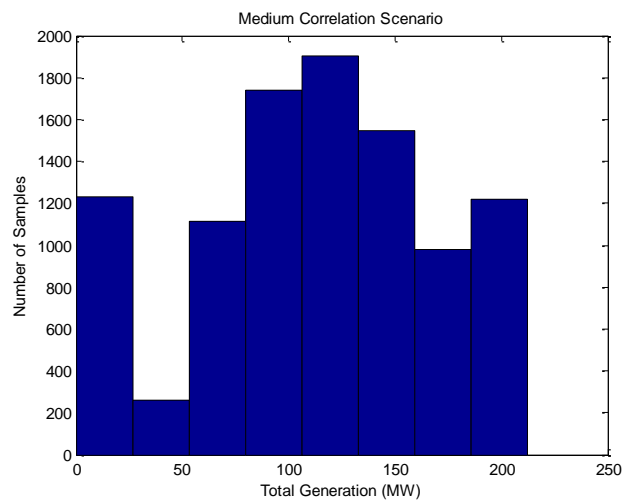
$$W = 0.8 W_h$$

Από την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων μέσω του UNICORN προέκυψαν δείγματα για τις επιμέρους παραγωγές των υπο-μονάδων του SGP αλλά και για τη συνολική Αιολική παραγωγή του SGP.

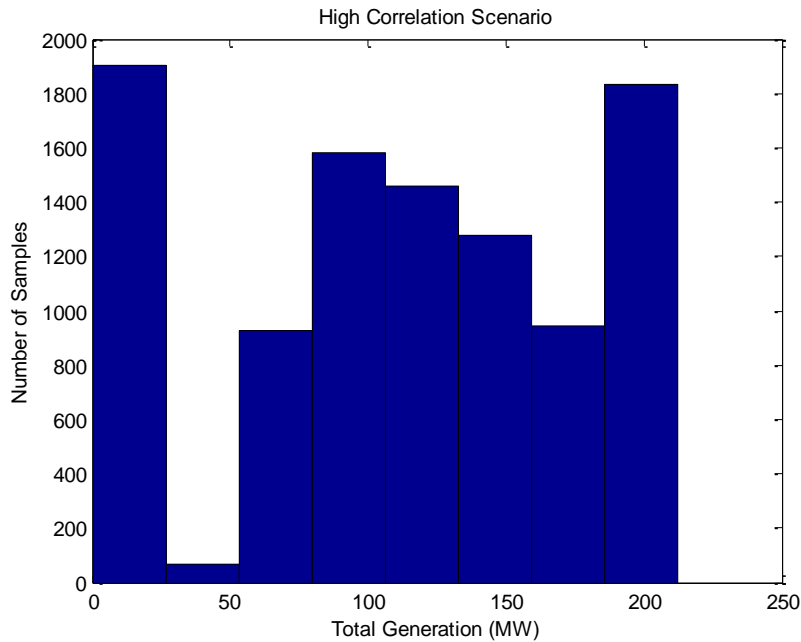
Τα διαγράμματα κατανομής που προέκυψαν για τη συνολική παραγόμενη ισχύ είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 6.6 Κατανομή Αιολικής παραγωγής –Independence Scenario



Σχήμα 6.7 Κατανομή Αιολικής παραγωγής –Medium Correlation Scenario



Σχήμα 6.8 Κατανομή Αιολικής παραγωγής –High Correlation Scenario

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανής η διαφορά της κατανομής της συνολικής Αιολικής Παραγωγής. Όσο αυξάνεται η συσχέτιση παρατηρείται μεγαλύτερη πιθανότητα η συνολική ισχύς να λάβει τιμή ίση με το άθροισμα των ονομαστικών ισχύων των 3 ομάδων παραγωγής. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με τη μηδενική παραγωγή.

Μέσω των παραπάνω διαγραμμάτων προέκυψαν οι πιθανότητες η συνολική παραγωγή να λάβει τις 2 ακραίες τιμές (ονομαστική – μηδενική παραγωγή):

	<i>Σενάριο πλήρους Ανεξαρτησίας</i>	<i>Σενάριο Μεσαίας Συσχέτισης</i>	<i>Σενάριο πλήρους θετικής συσχέτισης</i>
P (gen=max)	0.45 %	6.2 %	13 %
P(gen=0)	0.5 %	8.3 %	15.8 %

Πίνακας 6.7 Πιθανότητες ακραίων τιμών αιολικής παραγωγής

Από τις παραπάνω τιμές προκύπτει το συμπέρασμα ότι αγνοώντας τις συσχετίσεις ενδέχεται να προκύψουν λανθασμένα συμπεράσματα με αποτέλεσμα τη μη ασφαλή διαχείριση του συστήματος.

Για το συγκεκριμένο σύστημα των 26 ζυγών , θεωρώντας πλήρη ανεξαρτησία , έχει αγνοηθεί η μεγάλη πιθανότητα ο ζυγός 19 να έχει μηδενική παραγωγή καθώς από το

σενάριο πλήρους ανεξαρτησίας προέκυψε πιθανότητα μικρότερη του 1% για μηδενική συνολική παραγωγή. Αντιθέτως, μια συσχέτιση μεσαίου βαθμού προβλέπει πιθανότητα 8.3% .

Το σενάριο πλήρους συσχέτισης, σε επίπεδο διαχείρισης του συστήματος, αποτελεί το «χειρότερο σενάριο» και στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τις συσχετίσεις των μεταβλητών, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν καθώς προβλέπει τις ακραίες καταστάσεις στις οποίες ενδέχεται να βρεθεί το σύστημα.

Δεδομένου του μικρού πλήθους των μεταβλητών (3 επιμέρους παραγωγές) και του μεγάλου πλήθους δειγμάτων (10000) , έστω και με μικρή πιθανότητα (0.45%) υπήρξαν συνδυασμοί δειγμάτων τέτοιοι ώστε κάθε ομάδα παραγωγής να παράγει την ονομαστική της ισχύ ταυτόχρονα με τις υπόλοιπες. Σε περίπτωση μεγαλύτερου αριθμού μεταβλητών, στο σενάριο της πλήρους ανεξαρτησίας, υπήρχε πιθανότητα ο συνδυασμός αυτός να μη γίνει. Κάτι τέτοιο θα είχε ως αποτέλεσμα η συνολική παραγόμενη ισχύς να είχε μικρότερο εύρος τιμών συγκριτικά με τα άλλα σενάρια συσχέτισης.

Οι αναμενόμενες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις που προέκυψαν για τη συνολική παραγόμενη ισχύ είναι οι εξής:

	<i>Σενάριο Πλήρους Ανεξαρτησίας</i>	<i>Σενάριο Μεσαίας Συσχέτισης</i>	<i>Σενάριο Πλήρους Θετικής Συσχέτισης</i>
<i>Αναμενόμενη τιμή συνολικής παραγωγής</i>	112.93 MW	112.93 MW	112.93 MW
<i>Τυπική απόκλιση συνολικής παραγωγής</i>	41.15 MW	56.35 MW	68.3 MW

Πίνακας 6.8 Αναμενόμενη τιμή και τυπική απόκλιση συνολικής παραγωγής ζυγού 19

Παρατηρούμε ότι οι αναμενόμενες τιμές παραμένουν αμετάβλητες και στα 3 σενάρια συσχέτισης. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς η μέση τιμή της συνολικής παραγωγής εξαρτάται αποκλειστικά από τις περιθώριες κατανομές της ταχύτητας του ανέμου, οι οποίες παρέμειναν σταθερές για τα 3 σενάρια διείδυσης. Ωστόσο, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές όσον αφορά τις τυπικές αποκλίσεις. Η αύξηση του βαθμού συσχέτισης οδηγεί σε μεγαλύτερες αποκλίσεις από τη μέση τιμή, κάτι το οποίο οφείλεται στους συνδυασμούς ακραίων τιμών των επιμέρους παραγωγών.

6.2.2 Επίδραση των περιθώριων κατανομών των ταχυτήτων του ανέμου στη συνολική παραγόμενη ισχύ του SGP

Μέσω της μελέτης της προηγούμενης παραγράφου προέκυψε η ευαισθησία της συνολικής παραγωγής που συνδέεται στο ζυγό 19 του συστήματος ως προς τις συσχετίσεις των ταχυτήτων του ανέμου.

Σε αυτή την παράγραφο επιχειρείται η διαπίστωση του βαθμού επίδρασης των κατανομών των ταχυτήτων του ανέμου στη συνολική Αιολική παραγωγή του SGP του συστήματος.

Για τον καθορισμό της επίδρασης των περιθώριων κατανομών χρησιμοποιήθηκε το σενάριο της πλήρους συσχέτισης (ασφαλέστερη επιλογή όπως αποδείχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο) ενώ αναπτύχθηκαν διαφορετικά σενάρια για τις τιμές των παραμέτρων Weibull της ταχύτητας του ανέμου στις υπο μελέτη περιοχές.

Συγκεκριμένα, παράχθηκαν 3 ζεύγη παραμέτρων β και n για κάθε περιοχή. Η παραγωγή έγινε θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή των παραπάνω μεταβλητών στα διαστήματα:

- β : [1.8 , 2.2]
- n : [7.5 , 12.8]

Τα σενάρια που υλοποιήθηκαν είναι τα εξής:

	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Περιοχή 3
Σενάριο 1	$\beta=1.8$ $n=7.6$	$\beta=1.9$ $n=8.2$	$\beta=2.2$ $n=7.5$
Σενάριο 2	$\beta=2.1$ $n=12.1$	$\beta=2.1$ $n=12.7$	$\beta=1.9$ $n=11.3$
Σενάριο 3	$\beta=2.1$ $n=12.8$	$\beta=1.9$ $n=11.9$	$\beta=2$ $n=12.6$

Πίνακας 6.9 Παράμετροι Weibull για τα 3 σενάρια

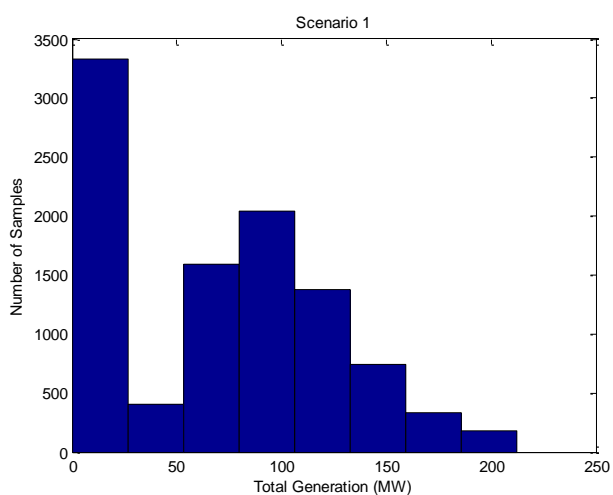
Πραγματοποιώντας προσομοιώσεις, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα για την κατανομή της παραγόμενης ισχύος:

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Αναμενόμενη τιμή συνολικής παραγωγής	67.84 MW	114.93 MW	117.15 MW
Τυπική απόκλιση συνολικής παραγωγής	55.81 MW	65.53 MW	67.03 MW

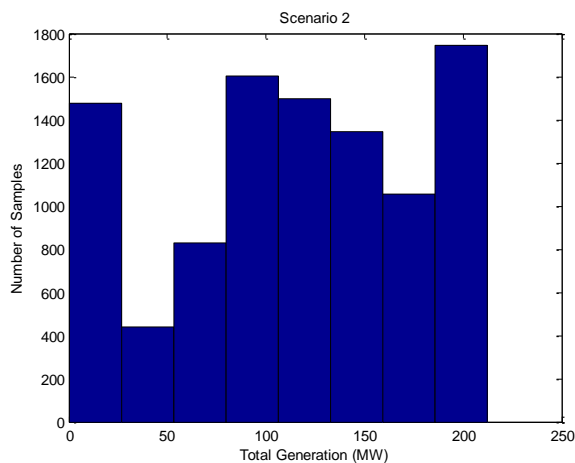
Πίνακας 6.10 Αναμενόμενη τιμή και τυπική απόκλιση συνολικής παραγωγής για 3 σενάρια κατανομών

Από τις παραπάνω τιμές φαίνεται ότι η αναμενόμενη τιμή και η τυπική απόκλιση της συνολικής παραγωγής επηρεάζεται άμεσα από τις περιθώριες κατανομές των ταχυτήτων του ανέμου.

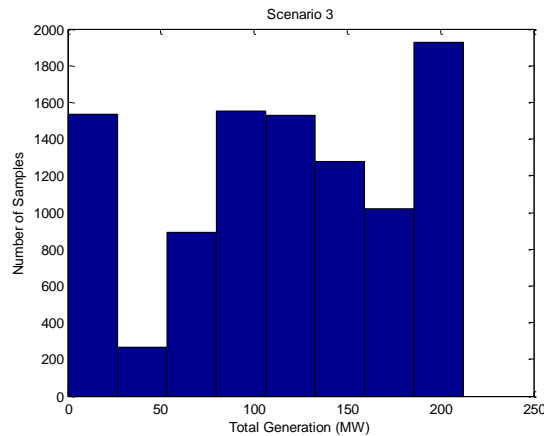
Τα παρακάτω ιστογράμματα παρουσιάζουν τις κατανομές που προέκυψαν από την εφαρμογή των 3 σεναρίων:



Σχήμα 6.9 Κατανομή Αιολικής παραγωγής – Σενάριο 1



Σχήμα 6.10 Κατανομή Αιολικής παραγωγής – Σενάριο 2



Σχήμα 6.11 Κατανομή Αιολικής παραγωγής – Σενάριο 3

Παρατηρούμε ότι η αύξηση των παραμέτρων της κατανομής Weibull από το σενάριο 1 στο σενάριο 2 σε συνδυασμό με το σενάριο της απόλυτης συσχέτισης που χρησιμοποιήθηκε οδήγησε σε ραγδαία αύξηση της πιθανότητας η παραγόμενη αιολική ισχύς να λάβει τιμή ίση με το άθροισμα των ονομαστικών ισχύων των 3 υπομονάδων (212.5 MW).

Συμπερασματικά, για να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τη συνολική παραγωγή που συνδέεται στο ζυγό 19 του συστήματος πρέπει να λάβουμε υπόψιν τόσο τις κατανομές της ταχύτητας του ανέμου στις 3 υποπεριοχές του SGP όσο και τις μεταξύ τους συσχετίσεις.

Εφόσον καθοριστούν τα παραπάνω, πλέον η μοντελοποίηση της στοχαστικότητας του συστήματος έγκειται στον καθορισμό της συσχέτισης μεταξύ της Αιολικής παραγωγής που συνδέεται στο ζυγό με την αντίστοιχη του ζυγού 21 με αφετηρία τη συσχέτιση των ταχυτήτων του ανέμου.

6.3 Επίδραση των συσχετίσεων των ταχυτήτων του ανέμου στις υποπεριοχές του SGP 19 στη ροή φορτίου

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα της παραγράφου 2.1, η αύξηση του βαθμού συσχέτισης των ταχυτήτων του ανέμου στις 3 υποπεριοχές όπου είναι εγκατεστημένες οι μονάδες Αιολικής Παραγωγής που συνδέονται στο ζυγό 19 οδηγεί σε πιο ακραίες συμπεριφορές της συνολικής παραγόμενης ισχύος.

Εξετάζοντας τα 2 ακραία σενάρια συσχέτισης (πλήρης ανεξαρτησία – απόλυτη συσχέτιση) επιλύθηκαν 10000 ντετερμινιστικές ροές φορτίου μέσω της μεθόδου Monte Carlo.

Στην περίπτωση της πλήρους ανεξαρτησίας λήφθηκαν υπόψιν μόνο οι περιθώριες κατανομές των ταχυτήτων του ανέμου οι οποίες διατηρήθηκαν σταθερές για τα 2 σενάρια συσχέτισης. Οι παράμετροι της κατανομής Weibull που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

<i>Περιοχή 1</i>	<i>Περιοχή 2</i>	<i>Περιοχή 3</i>
$\beta=1.8$ $n=7.6$	$\beta=1.9$ $n=8.2$	$\beta=2.2$ $n=7.5$

Πίνακας 6.11 Παράμετροι κατανομής Weibull για τις 3 περιοχές του SGP

Για την επίλυση των ροών φορτίου, οι τιμές των φορτίων και των συμβατικών παραγωγών διατηρήθηκαν σταθερές και ίσες με εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες των προηγούμενων παραγράφων.

Η συσχέτιση μεταξύ των Αιολικών παραγωγών των ζυγών 19 και 21 διατηρήθηκε σταθερή και για τα 2 σενάρια και τέθηκε ίση με $\rho=0.54$.

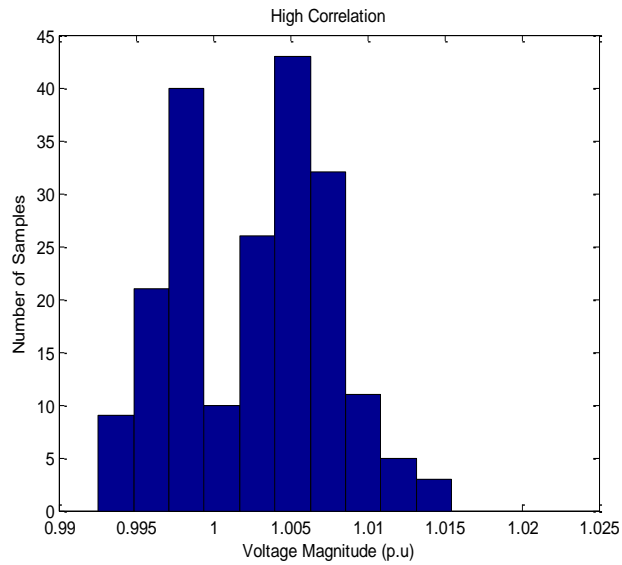
6.3.1 Αποτελέσματα για την τάση του ζυγού 19

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την αναμενόμενη τιμή και την τυπική απόκλιση της τάσης τους ζυγού 19 είναι τα ακόλουθα:

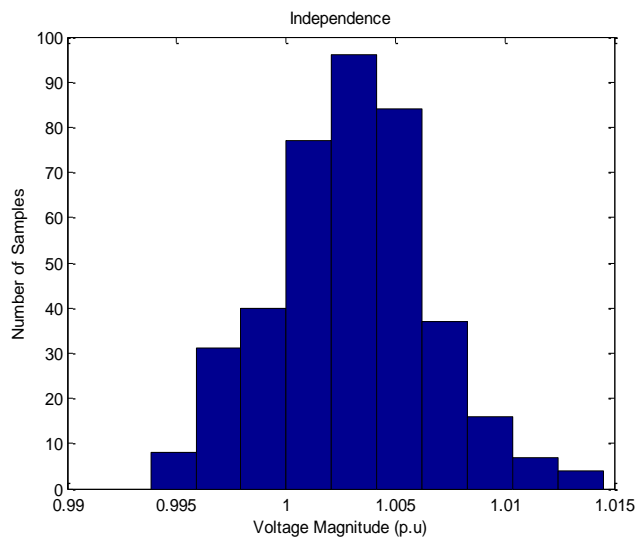
	<i>Ανεξαρτησία</i>	<i>Συσχέτιση</i>
Αναμενόμενη τιμή τάσης – Ζυγός 19	1.0030 p.u	1.0028 p.u
Τυπική απόκλιση τάσης – Ζυγός 19	0.0037 p.u	0.0050 p.u

Πίνακας 6.12 Αναμενόμενη τιμή και τυπική απόκλιση τάσης ζυγού 19

Οι κατανομές της τάσης φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Σχήμα 6.12 Κατανομή τάσης ζυγού 19 – High Correlation Scenario



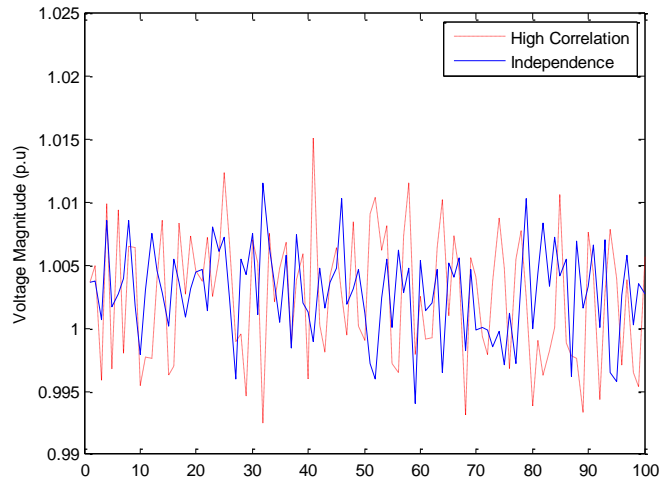
Σχήμα 6.13 Κατανομή τάσης ζυγού 19 – Independence Scenario

Συνεπώς, τα όρια μέσα στα οποία αναμένεται να κυμανθεί η τάση του ζυγού 19 είναι:

	<i>min</i>	<i>max</i>
Σενάριο Ανεξαρτησίας	0.9938 p.u	1.0145 p.u
Σενάριο Συσχέτισης	0.9926 p.u	1.0155 p.u

Πίνακας 6.13 Όρια της τάσης του ζυγού 19

Επιλέγοντας 100 διαδοχικές μεταβολές της τάσης του ζυγού 19 προέκυψαν τα εξής διαγράμματα μεταβολών:



Σχήμα 6.14 Μεταβολές τάσης ζυγού 19 για 2 σενάρια συσχέτισης

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συνεπάγεται ότι σε ένα Σ.Η.Ε με διείσδυση Αιολικής Ενέργειας, ο καθορισμός των κατανομών της ταχύτητας του ανέμου στις περιοχές όπου είναι εγκατεστημένες οι Αιολικές μονάδες δεν επαρκεί για την ακριβή μελέτη του συστήματος.

Είναι απαραίτητος ο καθορισμός των συσχετίσεων των ταχυτήτων του ανέμου καθώς, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα της παρούσας παραγράφου, αλλαγή του βαθμού συσχέτισης οδηγεί σε διαφορετική κατανομή της συνολικής παραγόμενης ισχύος, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει μεγέθη του συστήματος όπως οι τάσεις των ζυγών.

Σε περίπτωση που λόγω έλλειψης στοιχείων δεν είναι δυνατός ο καθορισμός του βαθμού συσχέτισης, απαιτείται να λαμβάνεται υπόψιν το πιο ακραίο σενάριο, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η πλήρης συσχέτιση. Τα όρια που προέκυψαν για την τάση στο ζυγό όπου είναι εγκατεστημένο το Αιολικό πάρκο 19 θεωρώντας πλήρη συσχέτιση είναι ασφαλέστερα από εκείνα του σεναρίου πλήρους ανεξαρτησίας καθώς προβλέπουν τιμές τάσης πάνω από το όριο της 1.0145 p.u που προέκυψε το πρώτο σενάριο, λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις κατανομές των ταχυτήτων του ανέμου.

6.3.2 Αποτελέσματα για τη ροή ισχύος στη γραμμή 10-19

Απο τη ροή φορτίου για τα 2 σενάρια της προηγούμενης παραγράφου προέκυψαν, επίσης, τα όρια εμπιστοσύνης για τις ροές ισχύος στις γραμμές του δικτύου.

Τα όρια εμπιστοσύνης που προέκυψαν για τη ροή ισχύος στη γραμμή 10-19 είναι τα εξής:

	<i>min</i>	<i>max</i>
Σενάριο Ανεξαρτησίας	-11.89 MW	18.96 MW
Σενάριο Συσχέτισης	-21.41 MW	26.69 MW

Πίνακας 6.14 Όρια ροής ισχύος – γραμμή 10-19

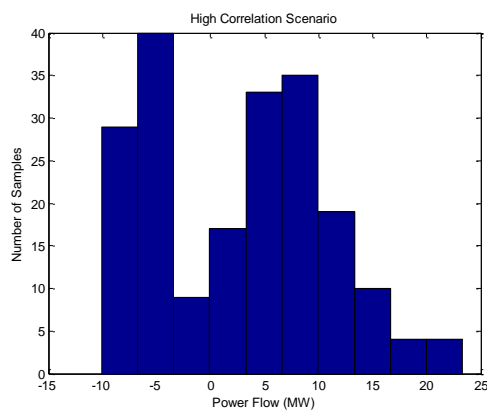
Επιβεβαιώνεται γι ακόμη μια φορά, συνεπώς, ότι τα υψηλότερα επίπεδα συσχέτισης συνεπάγονται μεγαλύτερες διακυμάνσεις των τιμών των μεγεθών του συστήματος.

Τα παραπάνω όρια εμπιστοσύνης προέκυψαν μέσω της “3-s formula” που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με βάση τις εξής αναμενόμενες τιμές και αποκλίσεις:

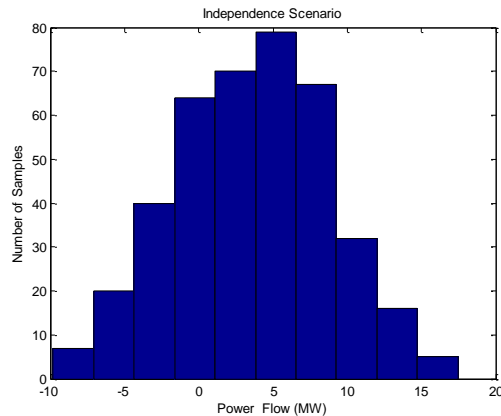
	Αναμενόμενη τιμή ροής ισχύος	Τυπική απόκλιση ροής ισχύος
Σενάριο Ανεξαρτησίας	3.53 MW	5.14 MW
Σενάριο Συσχέτισης	2.64 MW	8.02 MW

Πίνακας 6.15 Αναμενόμενη τιμή και τυπική απόκλιση ροής ισχύος στη γραμμή 10-19

Δεδομένου ότι τα όρια που υπολογίστηκαν μέσω της απλοποιημένης 3-s formula δίνουν μια πιο μακροπρόθεσμη πρόβλεψη, έγινε σύγκριση των πραγματικών ορίων μέσα στα οποία κυμάνθηκε η ροή ισχύος για τα 2 σενάρια συσχέτισης:



Σχήμα 6.15 Κατανομή της Ροής ισχύος της γραμμής 10-19 (High Correlation Scenario)



Σχήμα 6.16 Κατανομή της Ροής ισχύος της γραμμής 10-19 (Independence Scenario)

Παρατηρούμε ότι και τα πραγματικά δείγματα που προέκυψαν επιβεβαιώνουν όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως. Το όριο των 17.5 MW που προέκυψε από το σενάριο πλήρους ανεξαρτησίας ξεπερνάται όταν, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα μεγέθη του συστήματος σταθερά, μεταβληθεί η συσχέτιση.

6.4 Μελέτη της επίδρασης της συσχέτισης των Αιολικών Παραγωγών των ζυγών 19 και 21 στη ροή φορτίου

Στις προηγούμενες παραγράφους μελετήθηκε η συσχέτιση των ταχυτήτων του ανέμου στις 3 υποπεριοχές που απαρτίζουν το SGP που συνδέεται στο ζυγό 19 και προέκυψε ότι το μοντέλο της πλήρους συσχέτισης οδηγεί σε ακραίες συμπεριφορές του ανέμου και, συνεπώς, αποτελεί το ασφαλέστερο σενάριο για τη διαχείριση του συστήματος.

Θεωρώντας, λοιπόν, απόλυτη συσχέτιση για το SGP του ζυγού 19, σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται η επίδραση της συσχέτισης των Αιολικών παραγωγών των ζυγών 19 και 21 στα αποτελέσματα της ροής φορτίου.

Πλέον, οι μεταβλητές των οποίων μελετάται η συσχέτιση είναι 2 και, συνεπώς, στα σενάρια της πλήρους ανεξαρτησίας, της μεσαίας συσχέτισης και της πλήρους συσχέτισης μπορεί να προστεθεί το σενάριο της πλήρους αρνητικής συσχέτισης.

Τα σενάρια τα οποία αναπτύχθηκαν για την παρούσα μελέτη είναι τα εξής:

➤ Σενάριο 1

Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 21	$\beta=2.1$ $n=12$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 1	$\beta=1.8$ $n=7.6$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 2	$\beta=1.9$ $n=8.2$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 3	$\beta=2.2$ $n=7.5$
Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου στις περιοχές του Αιολικού πάρκου 19	Απόλυτη θετική συσχέτιση : $\rho=1$
Συσχέτιση Αιολικών Παραγωγών των ζυγών 19 και 21	Ανεξαρτησία $\rho=0$

Πίνακας 6.16 Χαρακτηριστικά σεναρίου 1

➤ Σενάριο 2

Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 21	$\beta=2.1$ $n=12$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 1	$\beta=1.8$ $n=7.6$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 2	$\beta=1.9$ $n=8.2$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 3	$\beta=2.2$ $n=7.5$
Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου στις περιοχές του Αιολικού πάρκου 19	Απόλυτη θετική συσχέτιση : $\rho=1$
Συσχέτιση Αιολικών Παραγωγών των ζυγών 19 και 21	Μεσαία συσχέτιση: $\rho=0.54$

Πίνακας 6.17 Χαρακτηριστικά σεναρίου 2

➤ Σενάριο 3

Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 21	$\beta=2.1$ $n=12$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 1	$\beta=1.8$ $n=7.6$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 2	$\beta=1.9$ $n=8.2$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 3	$\beta=2.2$ $n=7.5$
Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου στις περιοχές του Αιολικού πάρκου 19	Απόλυτη θετική συσχέτιση : $\rho=1$
Συσχέτιση Αιολικών Παραγωγών των ζυγών 19 και 21	Απόλυτη θετική συσχέτιση: $\rho=1$

Πίνακας 6.18 Χαρακτηριστικά σεναρίου 3

➤ Σενάριο 4

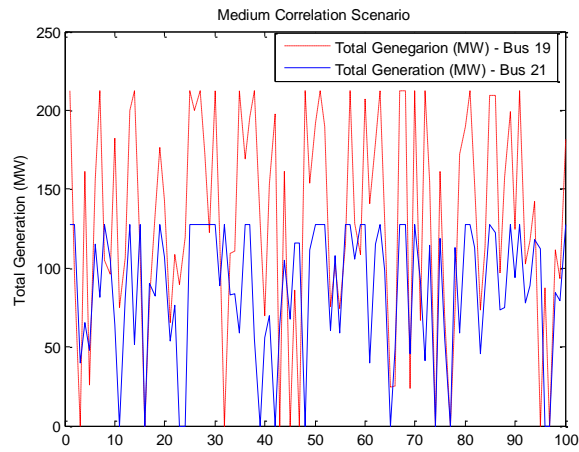
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 21	$\beta=2.1$ $n=12$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 1	$\beta=1.8$ $n=7.6$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 2	$\beta=1.9$ $n=8.2$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 3	$\beta=2.2$ $n=7.5$
Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου στις περιοχές του Αιολικού πάρκου 19	Απόλυτη θετική συσχέτιση : $\rho=1$
Συσχέτιση Αιολικών Παραγωγών των ζυγών 19 και 21	Απόλυτη αρνητική συσχέτιση $\rho=-1$

Πίνακας 6.19 Χαρακτηριστικά σεναρίου 4

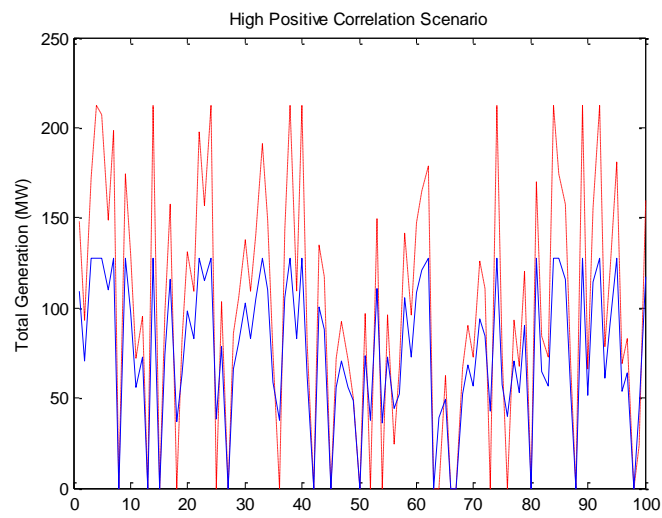
Ο τρόπος μεταβολής των παραγωγών των 2 ζυγών (100 διαδοχικές μεταβολές) για τα 4 σενάρια συσχέτισης φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα :



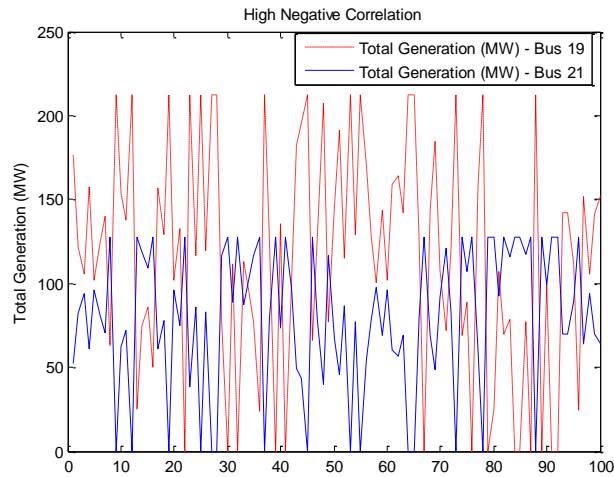
Σχήμα 6.17 Μεταβολές παραγωγών (independence)



Σχήμα 6.18 Μεταβολές παραγωγών (medium correlation)



Σχήμα 6.19 Μεταβολές παραγωγών (high correlation)

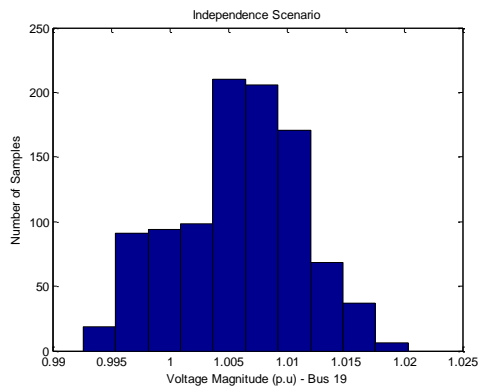


Σχήμα 6.20 Μεταβολές παραγωγών (high negative correlation)

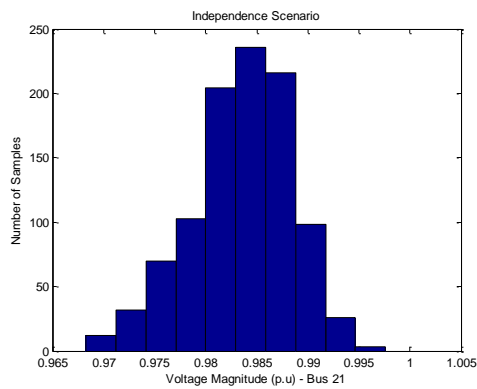
6.4.1 Μελέτη Τάσεων

Με βάση τα 4 σενάρια που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο επιλύθηκε η ροή φορτίου του συστήματος μέσω της μεθόδου Monte Carlo για 1000 δείγματα.

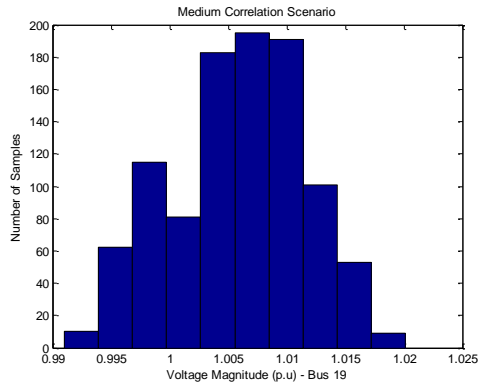
Οι κατανομές που προέκυψαν για τις τάσεις στους ζυγούς 19 και 21 είναι οι εξής:



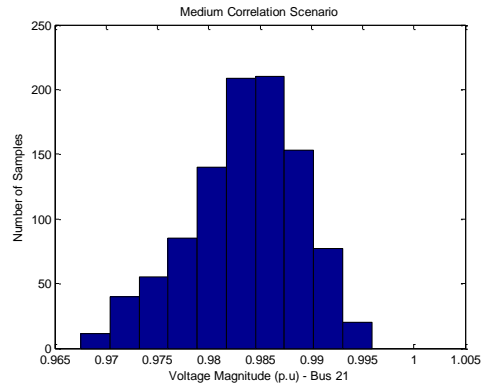
Σχήμα 6.21 Κατανομή τάσης 19 (independence)



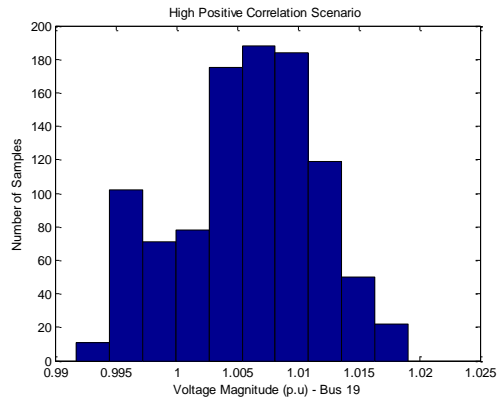
Σχήμα 6.22 Κατανομή τάσης 21 (independence)



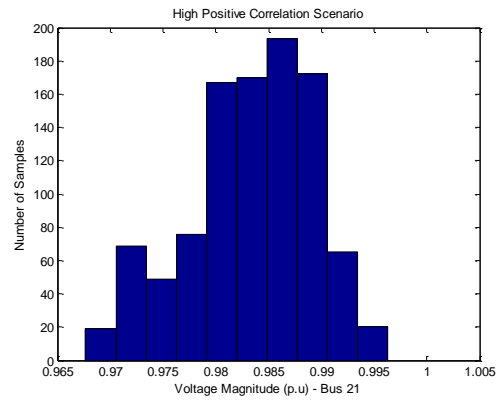
Σχήμα 6.23 Κατανομή τάσης 19 (medium corr.)



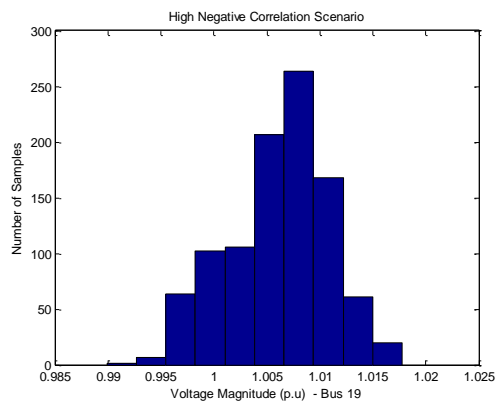
Σχήμα 6.24 Κατανομή τάσης 21 (medium corr.)



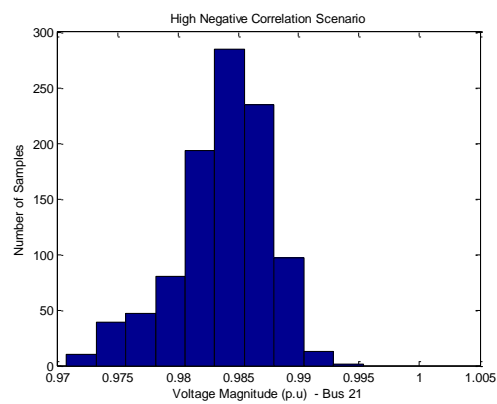
Σχήμα 6.25 Κατανομή τάσης 19 (high corr.)



Σχήμα 6.26 Κατανομή τάσης 21 (high corr.)



Σχήμα 6.27 Κατανομή τάσης 19 (negative corr.)



Σχήμα 6.28 Κατανομή τάσης 21 (negative corr.)

Οι αναμενόμενες τιμές και οι αποκλίσεις των τάσεων στους παραπάνω ζυγούς φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

	<i>Ανεξαρτησία</i>	<i>Μεσαία Συσχέτιση</i>	<i>Απόλυτη θετική συσχέτιση</i>	<i>Απόλυτη αρνητική συσχέτιση</i>
<i>Αναμενόμενη τιμή τάσης – Ζυγός 19</i>	1.0059 (p.u)	1.0059 (p.u)	1.0058 (p.u)	1.0061 (p.u)
<i>Τυπική απόκλιση τάσης – Ζυγός 19</i>	0.0053 (p.u)	0.0056 (p.u)	0.0057 (p.u)	0.0047 (p.u)
<i>Αναμενόμενη τιμή τάσης – Ζυγός 21</i>	0.9835 (p.u)	0.9835 (p.u)	0.9834 (p.u)	0.9837 (p.u)
<i>Τυπική απόκλιση τάσης – Ζυγός 21</i>	0.0048 (p.u)	0.0055 (p.u)	0.0059 (p.u)	0.0038 (p.u)

Πίνακας 6.20 Αναμενόμενες τιμές και τυπικές αποκλίσεις τάσεων

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανές ότι η αλλαγή της συσχέτισης των Αιολικών παραγωγών που συνδέονται στους ζυγούς 19 και 21 οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά τις τάσεις των συγκεκριμένων ζυγών.

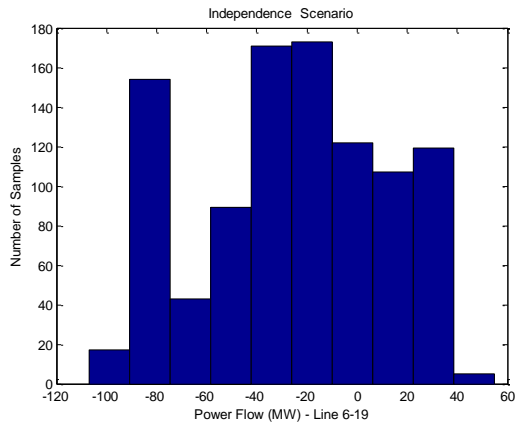
Εξετάζοντας πιθανοτικά τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι το σενάριο της αρνητικής συσχέτισης οδηγεί σε ακραίες τιμές για τις τάσεις των ζυγών. Για παράδειγμα, το σενάριο της πλήρους ανεξαρτησίας έχει προβλέψει ότι η αναμενόμενη τιμή της τάσης στο ζυγό 19 είναι 1.0059 p.u ενώ από το σενάριο της αρνητικής συσχέτισης η αναμενόμενη τιμή είναι 1.0061. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει με την τάση του ζυγού 21.

6.4.2 Μελέτη ροών ισχύος

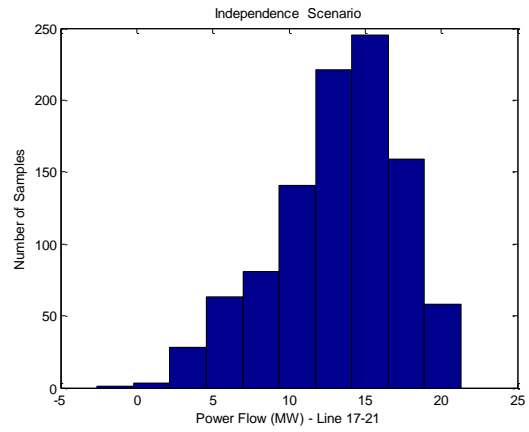
Μέσω της διαδικασίας της προηγούμενης παραγράφου προέκυψαν εκτιμήσεις για τις ροές ισχύος στις γραμμές του δικτύου.

Ενδεικτικά μελετώνται οι ροές ισχύος στις γραμμές 6-19 και 17-21.

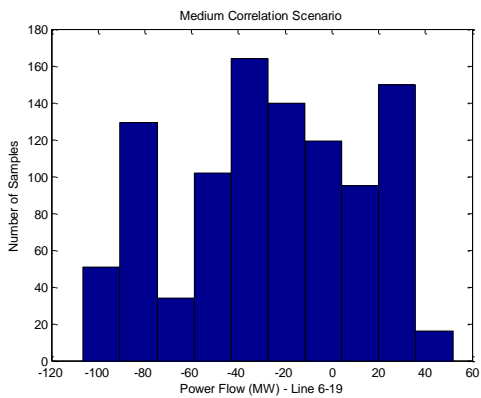
Από τις 1000 ροές φορτίου που επιλύθηκαν προέκυψαν οι εξής κατανομές για τις ροές ισχύος στις παραπάνω γραμμές:



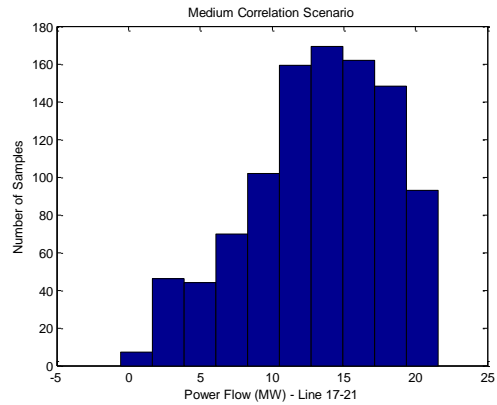
Σχήμα 6.29 Κατανομή ροής ισχύος (6-19) –Indep.



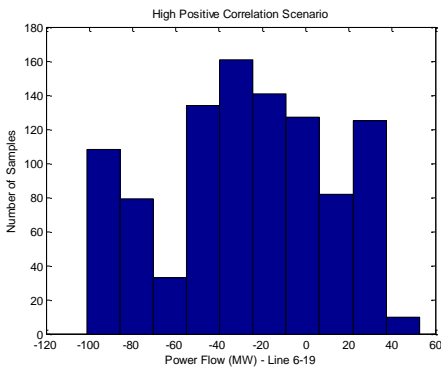
Σχήμα 6.30 Κατανομή ροής ισχύος (17-21) –Indep.



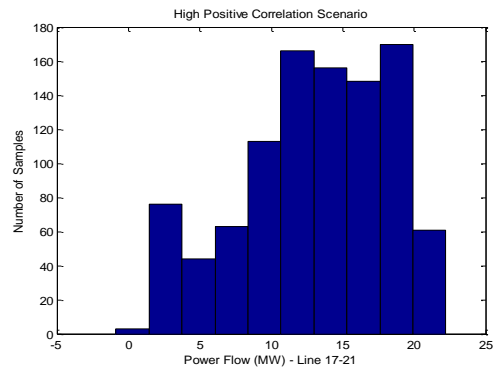
Σχήμα 6.31 Κατανομή ροής ισχύος (6-19) –Med.Corr



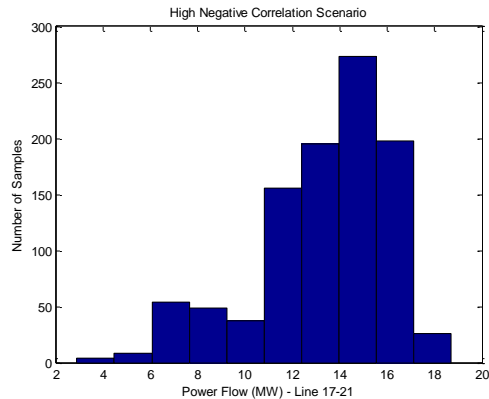
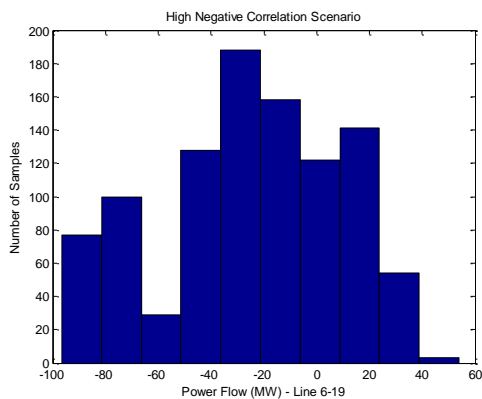
Σχήμα 6.32 Κατανομή ροής ισχύος (17-21) –Med.Corr.



Σχήμα 6.33 Κατανομή ροής ισχύος (6-19) –High Corr.



Σχήμα 6.34 Κατανομή ροής ισχύος (17-21) –High Corr.



Σχήμα 6.35 Κατανομή ροής ισχύος (6-19) –Neg.Corr. **Σχήμα 6.36 Κατανομή ροής ισχύος (17-21) –Neg.Corr.**

Στον παρακάτω πίνακα βρίσκονται συγκεντρωμένες οι αναμενόμενες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των ρών ισχύος των 2 γραμμών για τα 4 σενάρια συσχέτισης:

	<i>Ανεξαρτησία</i>	<i>Μεσαία Συσχέτιση</i>	<i>Απόλυτη θετική συσχέτιση</i>	<i>Απόλυτη αρνητική συσχέτιση</i>
Αναμενόμενη τιμή ροής ισχύος – Γραμμή 6-19	-25.91 MW	-25.88 MW	-26.78 MW	-24.77 MW
Τυπική απόκλιση ροής ισχύος – Γραμμή 6-19	37.43 MW	39.06 MW	38.14 MW	34.2 MW
Αναμενόμενη τιμή ροής ισχύος – Γραμμή 17-21	13.17 MW	13.19 MW	13.07 MW	13.32 MW
Τυπική απόκλιση ροής ισχύος – Γραμμή 17-21	4.08 MW	4.81 MW	5.1 MW	2.82 MW

Πίνακας 6.21 Αναμενόμενες τιμές και τυπικές αποκλίσεις ρών ισχύος

Και στην περίπτωση των ρών ισχύος φαίνονται οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των 4 σεναρίων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι το σενάριο της αρνητικής συσχέτισης οδηγεί σε υψηλότερες τιμές των αναμενόμενων τιμών ενώ οι υψηλότερες τυπικές αποκλίσεις παρατηρούνται στην περίπτωση της απόλυτης υψηλής συσχέτισης.

6.5 Επίλυση Στοχαστικής Ροής Φορτίου

Στην παρούσα παράγραφο επιλύεται η Ροή φορτίου μέσω της Στοχαστικής μεθόδου, για 1000 μεταβολές του συστήματος.

Τα δείγματα για τα φορτία του συστήματος έχουν παραχθεί θεωρώντας ότι ακολουθούν κανονικές κατανομές με τις αναμενόμενες τιμές της παραγράφου 6.1 και τυπικές αποκλίσεις της τάξης του 10 % της αναμενόμενης τιμής.

Η δειγματοληψία για τις παραγωγές των συμβατικών μονάδων έγινε με τον τρόπο που περιγράφηκε στην παράγραφο 1 (διακριτή κατανομή).

Όσον αφορά τις Αιολικές παραγωγές που συνδέονται στους ζυγούς 19 και 21 του συστήματος, δεδομένου ότι το πλέον ρεαλιστικό σενάριο είναι οι παραγωγές των 2 Αιολικών εγκαταστάσεων να συνδέονται με μεσαίου βαθμού συσχέτιση, παράχθηκαν δείγματα βάσει του εξής σεναρίου:

Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 21	$\beta=2.1$ $n=12$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 1	$\beta=1.8$ $n=7.6$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 2	$\beta=1.9$ $n=8.2$
Παράμετροι κατανομής Weibull – Αιολικό πάρκο 19 – Περιοχή 3	$\beta=2.2$ $n=7.5$
Συσχέτιση ταχυτήτων ανέμου στις περιοχές του Αιολικού πάρκου 19	Απόλυτη θετική συσχέτιση : $\rho=1$
Συσχέτιση Αιολικών Παραγωγών των ζυγών 19 και 21	Μεσαία συσχέτιση: $\rho=0.54$

Πίνακας 6.22 Χαρακτηριστικά κατανομών και συσχέτισης σεναρίου

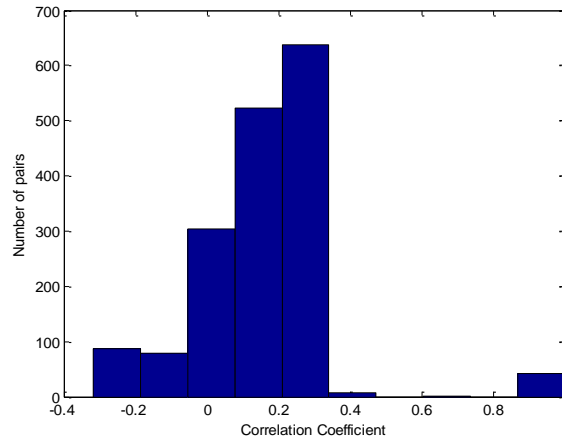
Οι μεταβλητές εισόδου του προβλήματος της στοχαστικής ροής (διάνυσμα γ) είναι οι ενεργές και άεργες εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς Φορτίου και οι εγχύσεις ενεργού ισχύος στους ζυγούς παραγωγής.

Συνολικά υπάρχουν 45 μεταβλητές εισόδου (2 μεταβλητές για κάθε έναν από τους 20 ζυγούς φορτίου και 1 μεταβλητή για κάθε έναν από τους 5 ζυγούς παραγωγής).

Με εξαίρεση τη συσχέτιση των παραγωγών των ζυγών 19 και 21 που καθορίστηκε εκ των προτέρων, οι συσχετίσεις μεταξύ των υπολοίπων μεταβλητών του συστήματος προέκυψαν μέσω της σχέσης:

$$\rho = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

και παρουσίασαν της εξής κατανομή:



Σχήμα 6.37 Κατανομή των συντελεστών συσχέτισης φορτίων-παραγωγών

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι δεν υπήρχαν ακραίες συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών εισόδου της στοχαστικής ροής.

Από την επίλυση της στοχαστικής ροής φορτίου προέκυψαν οι εξής αναμενόμενες τιμές για τις τάσεις στους ζυγούς του συστήματος:

--- Expected Values for Voltage ---		
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree
1	1.015	17.054
2	1.020	1.549
3	1.045	3.688
4	1.050	4.725
5	1.045	9.037
6	0.997	3.711
7	0.992	2.710
8	0.998	2.856
9	1.008	1.134
10	0.990	1.692
11	0.990	7.527
12	0.994	2.528
13	1.022	3.081
14	1.007	2.323
15	0.998	1.696
16	0.990	0.901
17	0.971	-0.810
18	1.004	0.461
19	1.004	1.891
20	0.983	1.297
21	0.984	2.946
22	0.979	1.058
23	0.976	1.009
24	0.971	0.729
25	0.974	2.054
26	1.025	0.000

Πίνακας 6.23 Αποτελέσματα Στοχαστική Ροής για τις αναμενόμενες τιμές των τάσεων

Οι παραπάνω τιμές αποτελούν τις μέσες τιμές ως προς τις οποίες υπολογίστηκαν οι Ιακωβιανοί πίνακες J και K της στοχαστικής μεθόδου. Υπενθυμίζεται ότι οι διασπορές των μεγεθών χ (μέτρα και γωνίες τάσης) και z (ροές ισχύος) προκύπτουν από τις σχέσεις (3.35) και (3.41).

Όσον αφορά τις ροές ισχύος και τις απώλειες, ενδεικτικά παρατίθενται οι αναμενόμενες τιμές που προέκυψαν για τις γραμμές που περιλαμβάνουν τους ζυγούς 19 και 21, όπου συνδέονται τα Αιολικά πάρκα:

----- Expected Values for Line Flows and Losses -----						
--Line-- from to	Power at bus & line flow			--Line loss--	Transformer tap	
	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	
19	-10.330	-14.997	18.210			
6	-54.128	-69.936	88.435	0.250	-4.760	
10	2.639	5.076	5.721	0.018	0.077	
23	15.621	17.945	23.792	0.169	0.736	
24	20.986	21.388	29.964	0.270	0.735	
25	4.551	10.530	11.471	0.166	-0.469	
21	37.342	-22.918	43.814			
6	-15.283	-15.325	21.644	0.021	-4.053	
17	12.467	-3.080	12.842	0.390	0.758	
20	15.339	-5.670	16.354	0.182	0.434	
24	24.819	1.158	24.846	0.304	0.963	

Πίνακας 6.24 Αποτελέσματα Στοχαστικής Ροής φορτίου για ροές ισχύος και απώλειες

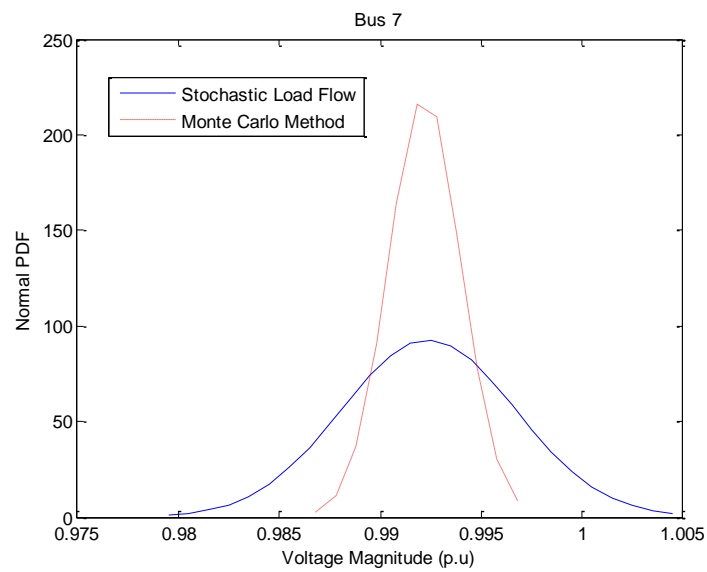
Για τα παραπάνω μεγέθη προέκυψαν, επίσης, οι τυπικές αποκλίσεις από τις αναμενόμενες τιμές.

Επιλύοντας ντετερμινιστικές ροές φορτίου μέσω της μεθόδου Monte Carlo για όλους τους συνδυασμούς φορτίων – παραγωγών, προέκυψαν τα εξής συγκριτικά αποτελέσματα για το μέτρο και τη γωνία της τάσης στο ζυγό 7 και τη ροή ισχύος στη γραμμή 11-23 :

	Αναμενόμενη τιμή (Ντετερμινιστικές ροές φορτίου)	Αναμενόμενη τιμή (Stochastic Load Flow)	Τυπική απόκλιση (Ντετερμινιστικές ροές φορτίου)	Τυπική απόκλιση (Stochastic Load Flow)
Μέτρο τάσης – Ζυγός 7	0.9922 (p.u)	0.9924 (p.u)	0.0018 (p.u)	0.0043(p.u)
Γωνία τάσης – Ζυγός 7	2.7024 °	2.71 °	0.6533 °	2.9 °
Ροή ισχύος – Γραμμή 11-25	31.54 MW	32.598 MW	4.82 MW	7.08 MW

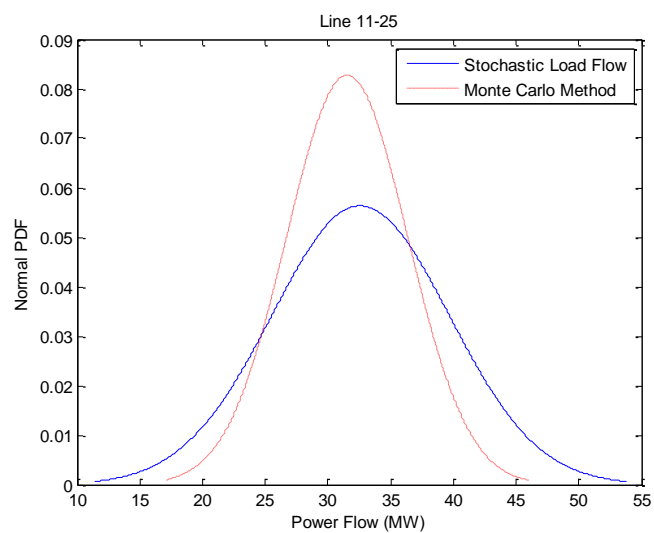
Πίνακας 6.25 Σύγκριση αποτελεσμάτων Monte Carlo και Στοχαστικής Ροής

Προσομοιώνοντας την κατανομή του μέτρου της τάσης με την κανονική κατανομή προέκυψαν τα εξής διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας:



Σχήμα 6.38 Σύγκριση κατανομών τάσης (ζυγός 7) για Monte Carlo και Στοχαστική Ροή

Τα αντίστοιχα διαγράμματα για τη ροή ισχύος στη γραμμή 11-25 είναι τα εξής:



Σχήμα 6.39 Σύγκριση κατανομών της ροής ισχύος (11-25) για Monte Carlo και Στοχαστική Ροή

Όπως ήταν αναμενόμενο, η επίλυση της ροής φορτίου μέσω της στοχαστικής μεθόδου οδήγησε σε μεγαλύτερες αποκλίσεις για τα μεγέθη του συστήματος και κατ'επέκταση σε πιο ευρεία όρια εμπιστοσύνης.

Ωστόσο, σε περιπτώσεις που ενδιαφερόμαστε για μια γρήγορη εκτίμηση των ορίων μέσα στα οποία αναμένεται να κυμανθούν τα μεγέθη του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η στοχαστική ροή φορτίου. Σε μακροπρόθεσμες μελέτες, όμως, προτείνεται η μέθοδος Monte Carlo καθώς λαμβάνει υπόψιν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των στοχαστικών εισόδων του συστήματος, δηλαδή των φορτίων και των παραγωγών.

7

Στοχαστική Ανάλυση του Δικτύου της Κρήτης

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται η συμπεριφορά ενός πραγματικού δικτύου με έντονη διείδυση Αιολικής Ενέργειας. Το δίκτυο που επιλέχθηκε είναι το δίκτυο της Κρήτης, στο οποίο λόγω των ιδιαίτερα ευνοϊκών ανεμολογικών συνθηκών υπάρχει υψηλή εγκαταστημένη Αιολική ισχύς.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος αναπτύχθηκαν σενάρια για διάφορα επίπεδα διείδυσης και στοχαστικής συσχέτισης.

Συγκεκριμένα, η μελέτη εστιάζει στα παρακάτω σημεία:

- Απίδραση των συσχετίσεων των ταχυτήτων του ανέμου στη συνολική παραγόμενη Αιολική ισχύ της Κρήτης
- Συμπεριφορά των μεγεθών του δικτύου για ακραία σενάρια συσχέτισης Αιολικών παραγωγών-φορτίου

Αρχικά μελετώνται οι διάφορες παράμετροι του συστήματος με έμφαση στη συμπεριφορά του ανέμου στις περιοχές όπου είναι εγκατεστημένα τα Αιολικά πάρκα.

Μέσω των διαθέσιμων μετρήσεων προσομοιώνονται οι κατανομές των ταχυτήτων του ανέμου με κατανομές Weibull και υπολογίζεται ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των ταχυτήτων και κατ'επέκταση των Αιολικών Παραγωγών.

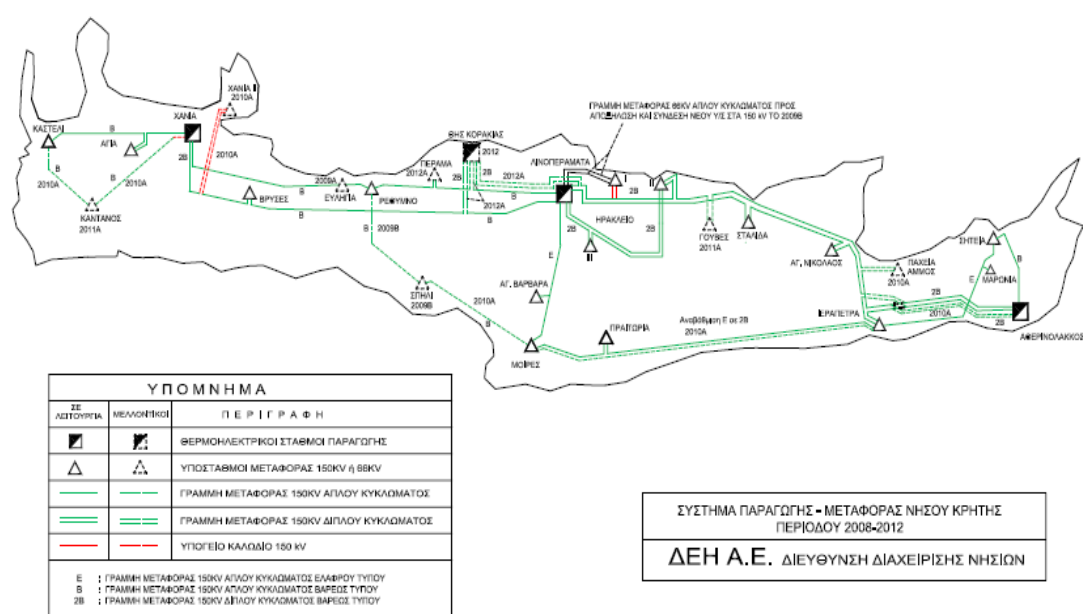
Στη συνέχεια υλοποιούνται διάφορα σενάρια στοχαστικής συσχέτισης εξετάζοντας την επίδρασή τους στην παραγόμενη Αιολική ισχύ και στη ροή φορτίου.

Τα δείγματα για τα φορτία και τις παραγωγές που χρησιμοποιούνται σε κάθε σενάριο έχουν παραχθεί μέσω του UNICORN και οι ροές φορτίου έχουν επιλυθεί μέσω της μεθόδου Monte Carlo.

7.2 Παρουσίαση του Δικτύου της Κρήτης

Συνοπτικά, το Δίκτυο της Κρήτης απαρτίζεται από 114 ζυγούς εκ των οποίων στην παρούσα μελέτη οι 75 έχουν χαρακτηριστεί ως ζυγοί φορτίου (PQ) και οι 28 ως ζυγοί παραγωγής (PV).

Το σύστημα παραγωγής-μεταφοράς της Κρήτης με τα υπάρχοντα και τα μελλοντικά δεδομένα φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 7.1 Σύστημα Παραγωγής-Μεταφοράς της Κρήτης

7.2.1 Συμβατικοί Σταθμοί Παραγωγής

Στην Κρήτη λειτουργούν 3 θερμικοί Σταθμοί Παραγωγής (ΑΗΣ Χανίων στη θέση ξυλοκαμάρα, ΑΗΣ Λινοπεραμάτων στο Ηράκλειο και ΑΗΣ Αθερνολακκου στο Λασιίθι) στους οποίους βρίσκονται εγκατεστημένες συνολικά 28 μονάδες παραγωγής συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 826,6 MW με καθαρή αποδιδόμενη ισχύ 781,6 MW, λαμβάνοντας υπόψη τις δύο νέες αμμοστροβιλικές μονάδες ισχύος 46,5 MW έκαστη, η εγκατάσταση των οποίων στον ΑΗΣ Αθερνολακκου βρίσκεται σε εξέλιξη.

Σημειώνεται επίσης ότι 3 από τις παραπάνω μονάδες συνολικής ισχύος 46,5 MW έχουν τεθεί με υπουργική απόφαση σε ψυχρή εφεδρεία.

Ο Σταθμός της Ξυλοκαμάρας χρησιμοποιεί για την ηλεκτροπαραγωγή πετρέλαιο ντήζελ, ο Σταθμός του Αθρινολάκκου βαρύ πετρέλαιο χαμηλού θείου και ο Σταθμός στα Λινοπεράματα πετρέλαιο ντήζελ και βαρύ πετρέλαιο χαμηλού θείου.

Τα χαρακτηριστικά των προαναφερθέντων μονάδων συμβατικής παραγωγής περιέχονται στον παρακάτω πίνακα:

ΚΡΗΤΗ		Εγκατεστημένη ισχύς (MW)	Αποδιδόμενη καθαρή ισχύς (MW)	Παρατηρήσεις
Σταθμός	Μονάδα			
ΑΗΣ Λινοπεράματων	ATM 1	6,25	5,90	Σε ψυχρή εφεδρεία με υπουργική απόφαση.
	ATM 2	15,0	14,3	
	ATM 3	15,0	14,3	
	ATM 4	25,0	23,5	
	ATM 5	25,0	23,5	Απόσυρση μετά τη θέση σε λειτουργία της πρώτης Μονάδας Συνδυασμένου Κύκλου στον ΘΗΣ Κορακιάς στα τέλη του 2012.
	ATM 6	25,0	23,5	
	DIESEL 1	12,28	11,0	
	DIESEL 2	12,28	11,0	
	DIESEL 3	12,28	11,0	Σε ψυχρή εφεδρεία με υπουργική απόφαση.
	DIESEL 4	12,28	11,0	
	AEP 1	16,25	15,0	Μετατροπή για καύση φυσικού αερίου και εγκατάσταση στον ΘΗΣ Κορακιάς στα τέλη του 2012.
	AEP 2	16,25	15,0	
	AEP 3	43,3	42,7	
	AEP 4	14,72	13,5	
AEP 5	28,0	27,6		
ΑΗΣ Χαλίων	AEP 1	16,2	14,0	Απόσυρση μετά την ολοκλήρωση των μετατροπών των Μονάδων του Σταθμού.
	AEP 2(13)	28,0	27,6	Μετατροπή για καύση φυσικού αερίου.
	AEP 4	24,0	20,0	Σε ψυχρή εφεδρεία με υπουργική απόφαση. Απόσυρση μετά την ολοκλήρωση των μετατροπών των Μονάδων του Σταθμού.
	AEP 5	30,0	28,0	Απόσυρση μετά την ολοκλήρωση των μετατροπών των Μονάδων του Σταθμού.
	AEP 11	59,37	58,0	Μετατροπή σε Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου ισχύος 180 MW με καύση φυσικού αερίου με την προσθήκη δύο λεβητών ανάκτησης θερμότητας και ενός ατμοστροβίλου το έτος 2012.
	AEP 12	59,37	58,0	
	AEP 6	45,5	126,0	Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου.
	AEP 7	45,5		
ATM 8	44,4			
ΑΗΣ Αθρινολάκκου	DIESEL 1	51,2	49,7	
	DIESEL 2	51,2	49,7	
	ATM 1	46,5	44,3	Υπό εγκατάσταση.
	ATM 2	46,5	44,3	Υπό εγκατάσταση.
Σύνολο		826,6	782,2	

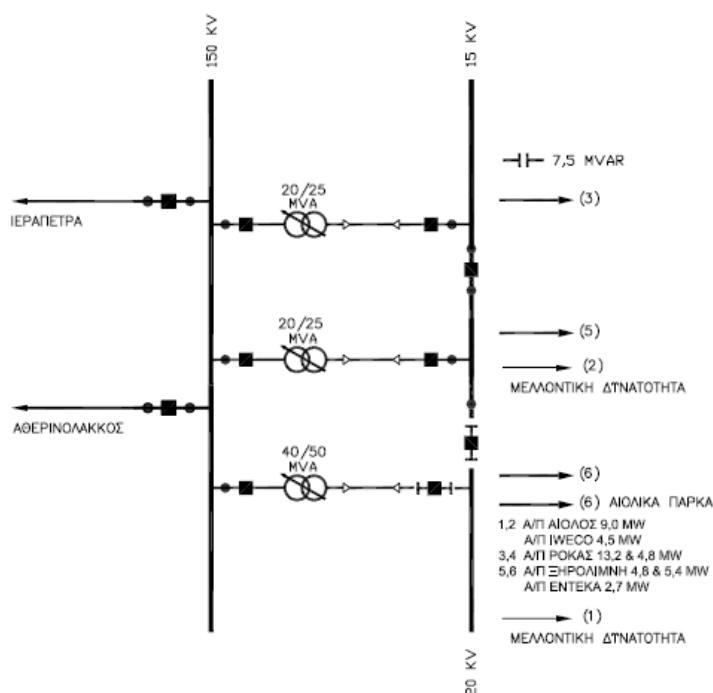
Πίνακας 7.1 Χαρακτηριστικά συμβατικών σταθμών παραγωγής της Κρήτης

7.2.2 Υποσταθμοί

Στο Σύστημα είναι συνδεδεμένοι συνολικά 21 Υποσταθμοί εκ των οποίων:

- 15 Υ/Σ υποβιβασμού 150 kV/MT με 34 Μ/Σ υποβιβασμού συνολικής ισχύος μετασχηματισμο 1185 MVA που εξυπηρετούν τις ανάγκες των πελατών της Διανομής. Στους Υ/Σ αυτούς συμπεριλαμβάνονται ο Υ/Σ υποβιβασμού που είναι συνδεδεμένος στον Υ/Σ ανυψώσεως της ΔΕΗ στον ΑΗΣ Χανίων και ο προσωρινός Υ/Σ υποβιβασμού στον ΑΗΣ Λινοπεραμάτων.
- 4 Υ/Σ ανυψώσεως MT/150 kV με 27 Μ/Σ ανυψώσεως συνολικής ισχύος μετασχηματισμού 1017 MVA στους Σταθμούς Παραγωγής της ΔΕΗ ΑΗΣ Χανίων, ΑΗΣ Λινοπεραμάτων 66 και 150 Kv και ΑΗΣ Αθερινόλακκου.
- 2 Υ/Σ (Μαρωνιάς και Αγ. Βαρβάρας) με 2 Μ/Σ ανυψώσεως ισχύος 50 MVA έκαστος που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την υποδοχή της ισχύος Αιολικών Πάρκων.

Ενδεικτικά, παρατίθεται το μονογραμμικό διάγραμμα για τον Υποσταθμό στη Σητεία:



Σχήμα 7.2 Μονογραμμικό διάγραμμα Υποσταθμού Σητείας

7.2.3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Όσον αφορά τις ΑΠΕ, βρίσκονται σε λειτουργία 24 Αιολικά Πάρκα (Α/Π) και 6 Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί (Φ/Β) με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 149,1 MW.

Από τα Α/Π 10 συνδέονται με τον Υ/Σ Σητείας, 5 με τον Υ/Σ Μαρωινιάς, 1 με τον Υ/Σ Αγ. Βαρβάρας και τα υπόλοιπα με τους Υ/Σ Ηράκλειο III, Καστέλι, Μοίρες και Αγ. Νικόλαο. Τα περισσότερα από τα Α/Π συνδέονται στους Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ με αποκλειστικές γραμμές ΜΤ ενώ οι Φ/Β Σταθμοί λόγω της μικρής ισχύος τους (έως 172 KW) συνδέονται στο δίκτυο διανομής.

Τα χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων ΑΠΕ φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

ΚΡΗΤΗ		Επωνυμία Εταιρίας	Τοποθεσία	Είδος Σταθμού	Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)	Τρόπος Σύνδεσης	
Υποσταθμός	Αριθ. Διαγρ. ΜΑΣΜ-Ν						
Αγιά	1.1	ΕΝΥΠΤΕC ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕC Α.Ε.	ΒΑΡΔΙΑ	Αιολικό	5,400	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ	
			ΒΑΤΑΛΙ	Αιολικό	5,400	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ	
Καστέλι	1.3	ΥΔΡΟΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.	ΡΟΒΑΣ Δ. ΚΙΣΣΑΜΟΥ	Αιολικό	9,350	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ	
Ηράκλειο III	3.3	ΔΟΜΙΚΗ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.	ΒΟΣΚΕΡΟ Δ. ΚΡΟΥΣΩΝΑ	Αιολικό	5,950	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ	
Μοίρες	3.5	ΙΩΕCΟ ΑΕΒΕ	ΜΕΓΑΛΗ ΒΡΥΣΗ	Αιολικό	5,000	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ	
			ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΜΟΙΡΩΝ Α.Ε.	ΑΝΤΙΣΚΑΡΙ ΜΟΙΡΩΝ	Αιολικό	5,250	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ
			ΓΕΡΜΑΝΟC ΑΒΕΕ	ΜΕCΧΩΡΙΟ Δ. ΑCΤΕΡΟΥCΙΩΝ	Φ/Β	169	Δίκτυο Διανομής
Αγ. Βαρβάρα	3.9	ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.	ΠΕΡΔΙΚΟΚΟΡΥΦΗ Δ. ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑC	Αιολικό	14,450	Υ/Σ Παραγωγής	
Αγ. ΝικόλαοC	4.1	ΠΛΑCΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.	ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗC ΒΡΟΥΧΑ	Αιολικό	11,900	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ	
Σητεία	4.4	ΕΝ.ΤΕ.ΚΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.	ΔΕΗ	Α/Π ΜΟΝΗC ΤΟΠΛΟΥ	Αιολικό	5,100	Δίκτυο Διανομής
			ΔΕΗ	ΕΠΙΔΕΙΚΤΙΚΕC Α/Γ ΜΟΝΗC ΤΟΠΛΟΥ	Αιολικό	1,500	Δίκτυο Διανομής
			ΔΕΗ	Α/Π ΞΗΡΟΛΙΜΝΗC	Αιολικό	10,200	Δίκτυο Διανομής
			ΔΕΗ	Α/Π ΞΗΡΟΛΙΜΝΗC ΙΙΙ	Αιολικό	3,000	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ
			ΕΝ.ΤΕ.ΚΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.	ΠΙCΚΟΚΟΠΑΝΙΕC ΠΙCΚΟΛΑΚΚΟC Δ. ΙΤΑΝΟΥ	Αιολικό	2,700	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ
			ΙΩΕCΟ ΧΩΝΟC ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.	ΧΩΝΟC Δ. ΙΤΑΝΟΥ	Αιολικό	4,500	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ
			ΑΙΟΛΟC ΑΕ	ΧΑΝΔΡΑC	Αιολικό	10,000	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ
			ΡΟΚΑC ΑΙΟΛΙΚΗ ΑΒΕΕ	ΠΛΑΚΟΚΕΡΑΤΙΑ	Αιολικό	9,900	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ
			ΡΟΚΑC ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗ ΑΒΕΕ	ΞΗΡΟΛΙΜΝΗ (ΑΓΡΙΛΙΔΙΑ ΜΗΤΑΤΟΥ)	Αιολικό	3,000	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ
			ΡΟΚΑC ΑΙΟΛΙΚΗ ΑΒΕΕ	ΠΛΑΚΟΚΕΡΑΤΙΑ ΜΗΤΑΤΟΥ (LOAD DISPATCH)	Αιολικό	4,800	Αποκλειστική Γραμμή ΜΤ
			ΡΟΚΑC ΑΙΟΛΙΚΗ ΑΒΕΕ	ΠΛΑΚΟΚΕΡΑΤΙΑ	Φ/Β	172	Δίκτυο Διανομής
			Ο.Α.Σ. Α.Ε.	ΣΗΤΕΙΑC	Αιολικό	500	Δίκτυο Διανομής
Μαρωινιά	4.5	ΑΝΕΜΟΕCCΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ Α.Ε.	ΒΙΓΛΙ	Αιολικό	5,000	Υ/Σ Παραγωγής	
			ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΡΥΩΝ Α.Ε.	ΒΟΥΒΑΛΙ-ΠΛΑΤΥΒΟΛΟ-ΜΕΓΑΛΟ ΜΟΥΡΙ	Αιολικό	10,000	Υ/Σ Παραγωγής
			ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΑΧΛΑΔΙΩΝ Α.Ε.	ΑΓΡΙΛΙΔΑ ΒΕΛΗΡΑC	Αιολικό	10,000	Υ/Σ Παραγωγής
			ENERCON Α.Ε.	ΠΛΑΤΥΒΟΛΑ ΑΧΛΑΔΙΩΝ	Αιολικό	2,500	Υ/Σ Παραγωγής
			WRE HELLAS Α.Ε.	ΠΛΑΤΥΒΟΛΑ ΚΡΥΩΝ	Αιολικό	3,000	Υ/Σ Παραγωγής
Περιοχή Ηρακλείου		ΚΟΡΗ Α.Ε.	ΛΙΜΕΝΑC ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Φ/Β	20	Δίκτυο Διανομής	
			ΑΓΓΕΛΑΚΗC ΙΩΑΝΝΗC	ΚΑΡΤΕΡΟC ΚΑΛΙΘΕΑC Δ. ΑΛΙΚΑΡΝΑCCΟΥ	Φ/Β	135	Δίκτυο Διανομής
			ΛΕΥΚΟCΙΔΗΡΟΥΡΓΙΑ ΚΡΗΤΗC ΑΕΒΕ	ΒΙ.ΠΕ. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Φ/Β	127	Δίκτυο Διανομής
Περιοχή Χανίων		Θ. & Ι. ΚΛΑΠΑΚΗC Ο.Ε.	ΛΟΥΤΡΑΚΙ ΧΑΝΙΩΝ	Φ/Β	60	Δίκτυο Διανομής	
Σύνολο					149,082		

Πίνακας 7.2 Χαρακτηριστικά ΑΠΕ της Κρήτης

7.3 Μελέτη της στοχαστικής συμπεριφοράς ταχυτήτων ανέμου & Αιολικών παραγωγών

Για την κατάστρωση σχεδίου μοντελοποίησης ενός Σ.Η.Ε με διεΐσδυση Αιολικής Ενέργειας απαιτείται η άντληση των απαραίτητων πληροφοριών από πραγματικές μετρήσεις.

Όπως φάνηκε και από τη μελέτη του συστήματος των 26 ζυγών του Κεφαλαίου 6, τα βασικότερα στοιχεία για τη μοντελοποίηση της Αιολικής Παραγωγής είναι:

- Ο καθορισμός των κατανομών των ταχυτήτων του ανέμου
- Ο καθορισμός των συσχετίσεων των ταχυτήτων του ανέμου.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα παραπάνω στοιχεία όπως προέκυψαν από επεξεργασία 8760 μέσων ωριαίων μετρήσεων που υπάρχουν διαθέσιμες από το έτος 2008.

7.3.1 Κατανομές ταχυτήτων ανέμου

Οι παράμετροι των κατανομών Weibull που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά το 2008 είναι οι εξής:

	Scale parameter n	Shape parameter β		Scale parameter n	Shape parameter β
Περιοχή 1	7	2.1	Περιοχή 13	7.4	2.3
Περιοχή 2	7.2	2.1	Περιοχή 14	12	2.1
Περιοχή 3	6.8	2	Περιοχή 15	13	2.9
Περιοχή 4	7	2.07	Περιοχή 16	11	2.1
Περιοχή 5	12	2.3	Περιοχή 17	14	2.89
Περιοχή 6	6.8	1.8	Περιοχή 18	17	2.19
Περιοχή 7	11.2	1.98	Περιοχή 19	21	2.01
Περιοχή 8	7	2.2	Περιοχή 20	11.2	2.88
Περιοχή 9	10.96	2.13	Περιοχή 21	12.9	2.6
Περιοχή 10	9.1	2.34	Περιοχή 22	14.1	2.8
Περιοχή 11	14	2.7	Περιοχή 23	11.1	2.1
Περιοχή 12	16	2.6	Περιοχή 24	12.01	2.4

Πίνακας 7.3 Παράμετροι κατανομών Weibull των ταχυτήτων του ανέμου στα πάρκα της Κρήτης

Βάσει των παραπάνω παραμέτρων έγινε η προσομοίωση των ταχυτήτων του ανέμου.

Στο παρακάτω ιστογράμματα φαίνεται η πραγματική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στο πάρκο «IWECO» και η αντίστοιχη κατανομή όπως προέκυψε από την προσομοίωση:

Όπως φαίνεται και από την καμπύλη ισχύος, τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης Α/Γ είναι τα εξής:

- Ονομαστική ταχύτητα: 12 m/s
- Ταχύτητα έναρξης: 4 m/s
- Ταχύτητα αποκοπής: 25 m/s

Η αναγωγή των τιμών της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του άξονα της έλικας κάθε ανεμογεννήτριας έγινε μέσω της σχέσης:

$$W = 0.8 W_h$$

όπου h το ύψος στο οποίο λήφθηκαν οι μετρήσεις μέσω των οποίων υπολογίστηκαν οι παράμετροι της κατανομής Weibull για κάθε περιοχή.

Για την εξαγωγή της παραπάνω σχέσης θεωρήθηκε τραχύτητα εδάφους ίση με $Z_0 = 0.1$ ενώ ο λόγος του ύψους του άξονα της έλικας προς το ύψος των μετρήσεων λήφθηκε ίσος

με: $\frac{h_{\text{άξονα}}}{h} = 0.8$

Η Αιολική παραγωγή κάθε πάρκου είναι ανάλογη του αριθμού των Α/Γ από τις οποίες απαρτίζεται:

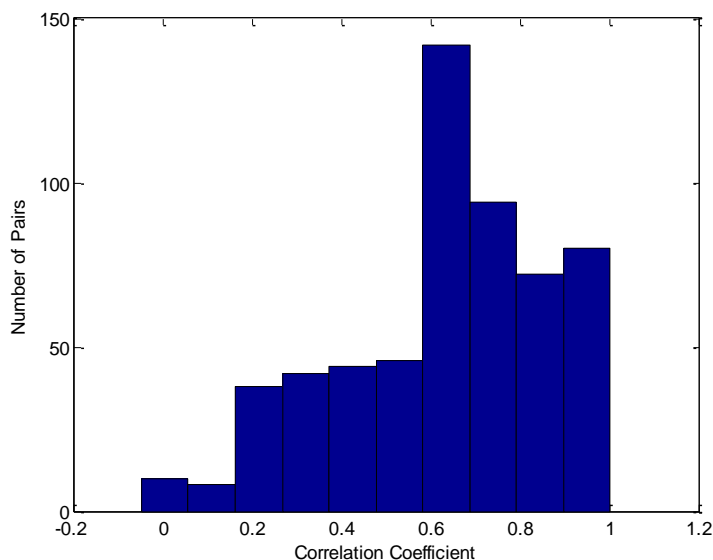
Αιολικό πάρκο	Αριθμός Α/Γ	Αιολικό πάρκο	Αριθμός Α/Γ
Α/Π 1	7	Α/Π 13	4
Α/Π 2	7	Α/Π 14	6
Α/Π 3	11	Α/Π 15	12
Α/Π 4	7	Α/Π 16	12
Α/Π 5	6	Α/Π 17	4
Α/Π 6	7	Α/Π 18	6
Α/Π 7	17	Α/Π 19	1
Α/Π 8	14	Α/Π 20	6
Α/Π 9	6	Α/Π 21	12
Α/Π 10	2	Α/Π 22	12
Α/Π 11	12	Α/Π 23	3
Α/Π 12	4	Α/Π 24	4

Πίνακας 7.4 Αριθμός Α/Γ στα Αιολικά πάρκα της Κρήτης

7.3.3 Συσχετίσεις ταχυτήτων ανέμου

Μέσω των διαθέσιμων μετρήσεων υπολογίστηκε ο πίνακας συσχέτισης των ταχυτήτων του ανέμου μεταξύ των 24 περιοχών (μέγεθος 24 x 24).

Μια εικόνα για το βαθμό συσχέτισης των ταχυτήτων μας δίνει το παρακάτω ιστόγραμμα:

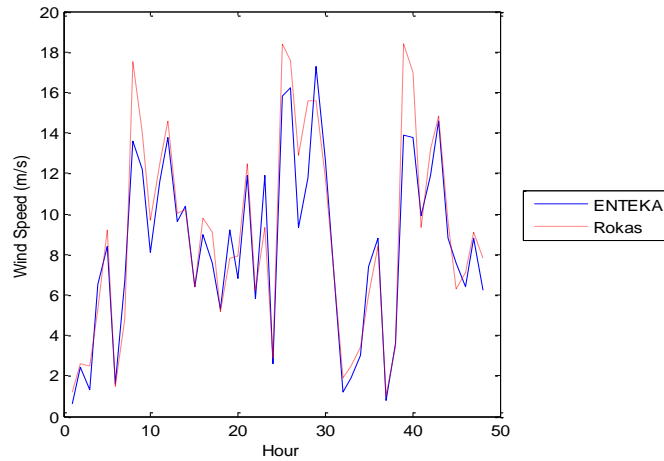


Σχήμα 7.6 Κατανομή συντελεστών συσχέτισης ταχυτήτων ανέμου

Γενικά, παρατηρούνται υψηλά επίπεδα συσχέτισης για πολλά ζεύγη περιοχών, με τα περισσότερα ζεύγη να συσχετίζονται με συντελεστές μεταξύ 0.6 και 0.7.

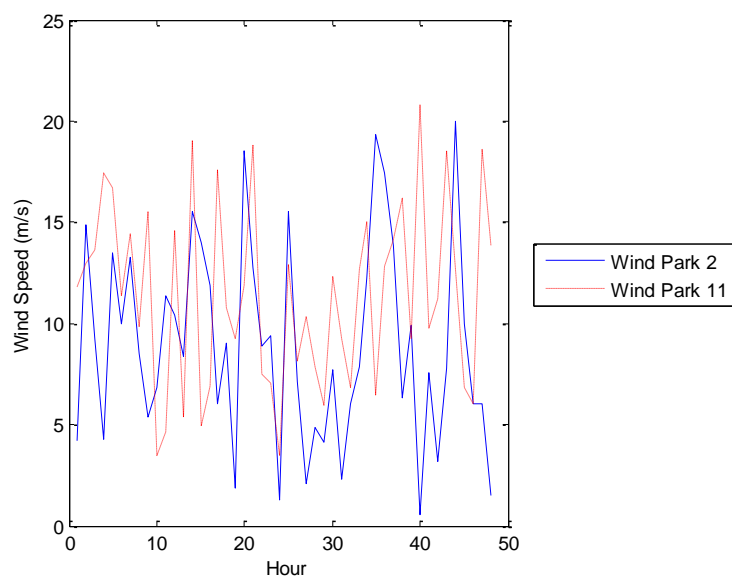
Ένα παράδειγμα θετικά συσχετισμένων Αιολικών πάρκων είναι τα πάρκα «ΕΝΤΕΚΑ» και «ΡΟΚΑΣ» στα οποία η συσχέτιση βρέθηκε ίση με $\rho=0.93$.

Τα διαγράμματα που ακολουθούν δείχνουν τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται οι ταχύτητες του ανέμου στα δύο αυτά πάρκα κατά τη διάρκεια 48 ωρών (μέσες ωριαίες τιμές):



Σχήμα 7.7 Κοινές μεταβολές συσχετισμένων Αιολικών Πάρκων

Είναι εμφανής η κοινή συμπεριφορά των μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου στις περιοχές όπου είναι εγκατεστημένα τα Αιολικά Πάρκα. Υπενθυμίζεται ο βαθμός συσχέτισης 2 μεταβλητών όπως προκύπτει από το συντελεστή του Spearman συνεπάγεται κοινή συμπεριφορά των μεταβλητών ως προς τον τρόπο με τον οποίο αυξομειώνονται οι τιμές του, ανεξαρτήτως των περιθώριων κατανομών τους. Αντίθετα, μέσω του συντελεστή συσχέτισης του Pearson διαπιστώνεται η συσχέτιση μεταξύ των πραγματικών τιμών που λαμβάνουν οι μεταβλητές. Αντίστοιχα διαγράμματα κατασκευάστηκαν και για τα Αιολικά Πάρκα που είναι εγκατεστημένα στις περιοχές 2 και 11 στα οποία οι ταχύτητες του ανέμου εμφανίζονται να είναι ανεξάρτητες:



Σχήμα 7.8 Κοινές μεταβολές ανεξάρτητων Αιολικών Πάρκων

Είναι, συνεπώς, προφανές ότι για κάθε περίπτωση συσχέτισης, υπάρχουν διαφορετικές συμπεριφορές των ταχυτήτων του ανέμου και κατα συνέπεια των παραγωγών κάθε πάρκου.

Αυτές οι διαφοροποιήσεις επηρεάζουν τις κατανομές μεγέθων του συστήματος όπως η συνολική παραγόμενη ισχύς, οι ροές ισχύος, οι τάσεις στους ζυγούς κ.α.

Γι αυτό το λόγο, προκειμένου να μοντελοποιηθούν οι ταχύτητες του ανέμου σε ένα σύνολο περιοχών, εκτός από τις περιθώριες κατανομές των ταχυτήτων, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν οι μεταξύ τους συσχετίσεις έτσι ώστε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να είναι ακριβέστερα.

7.4 Μελέτη της επίδρασης της συσχέτισης των ταχυτήτων του ανέμου στη συνολική Αιολική ισχύ που συνδέεται στο σύστημα

Στην παρούσα μελέτη, αναπτύσσονται 3 σενάρια συσχέτισης μέσω των οποίων θα αναδειχθεί η επίδραση της στοχαστικής συσχέτισης των ταχυτήτων του ανέμου στην συνολική παραγόμενη Αιολική ισχύ του συστήματος της Κρήτης.

Τα 3 σενάρια που αναπτύχθηκαν είναι τα εξής:

- Πλήρης ανεξαρτησία
- Υψηλή θετική συσχέτιση
- Μέτρια θετική συσχέτιση

Στο σενάριο της πλήρους ανεξαρτησίας όλοι οι συντελεστές συσχέτισης – εκτός από τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα συσχέτισης - θεωρήθηκαν ίσοι με 0.

Όσον αφορά το σενάριο της υψηλής θετικής συσχέτισης, παράχθηκαν ομοιόμορφα 276 συντελεστές συσχέτισης στο διάστημα $[0.96,1]$ – ο συνολικός αριθμός των συντελεστών συσχέτισης είναι 576, εκ των οποίων οι 24 είναι ίσοι με 1 (διαγώνια στοιχεία) ενώ οι υπόλοιποι 552 έχουν ανα δύο ίσες τιμές.

Με τον ίδιο τρόπο παράχθηκαν οι συντελεστές συσχέτισης για το σενάριο της μέτριας θετικής συσχέτισης στο διάστημα $[0.4,0.6]$.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων είναι ο πίνακας συσχέτισης να είναι θετικά ημιορισμένος. Στις περισσότερες περιπτώσεις όπου ένας πίνακας συσχέτισης αποτελείται από μεγάλο σχετικά αριθμό στοιχείων (στην περίπτωση που μελετάται ο πίνακας αποτελείται από $24 \times 24 = 576$ στοιχεία), υπάρχουν κάποιες αρνητικές ιδιοτιμές, κάτι το οποίο καθιστά το συγκεκριμένο πίνακα μη θετικά ημιορισμένο.

Γι αυτό το λόγο, όπου χρειάστηκε, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Φασματικής Ανάλυσης (Spectral Decomposition Method) που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο για τη μετατροπή ενός τετραγωνικού πίνακα σε έναν “σχεδόν” ισοδύναμο θετικά ορισμένο.

Οι μεταβλητές εισόδου για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων είναι οι ταχύτητες ανέμου και οι απαραίτητες πληροφορίες με τις οποίες τροφοδοτήθηκε το λογισμικό είναι:

- Οι περιθώριες κατανομές (κατανομές Weibull με παραμέτρους που δόθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο)
- Οι συσχετίσεις (για κάθε σενάριο δημιουργήθηκε ο αντίστοιχος πίνακας συσχέτισης)

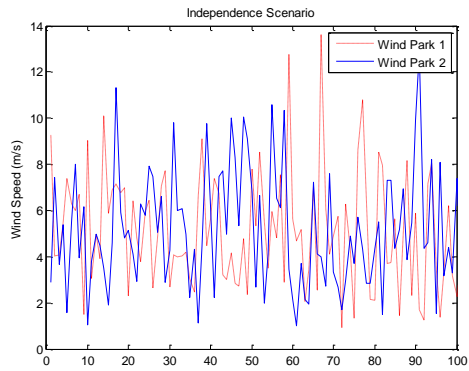
Η copula με την οποία συνδέθηκαν οι μεταβλητές είναι η Normal Copula λόγω της χρήσης του πίνακα συσχέτισης ως δομή συσχέτισης.

7.4.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

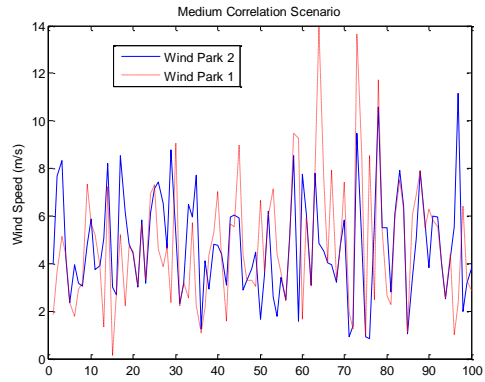
Τροφοδοτώντας το UNICORN με τις παραπάνω πληροφορίες και αλλάζοντας τον πίνακα συσχέτισης για κάθε ένα από τα 3 σενάρια, προέκυψαν 3 sets των 10000 δειγμάτων για:

- Τις ταχύτητες ταχύτητες του ανέμου
- Την αιολική παραγωγή κάθε πάρκου
- Τη συνολική παραγόμενη Αιολική ισχύ του συστήματος

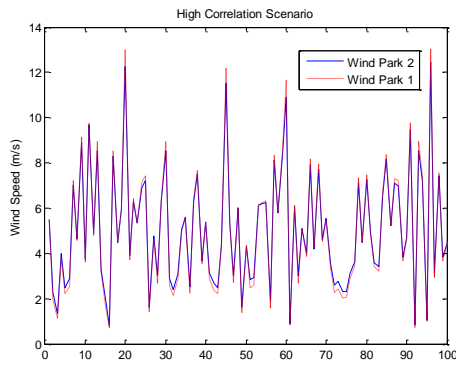
Ενδεικτικά παρατίθεται τα διαγράμματα για 100 διαδοχικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου στις περιοχές 1 και 2 για τα 3 σενάρια συσχέτισης:



Σχήμα 7.9 Μεταβολές ταχ. ανέμου- Σενάριο 1

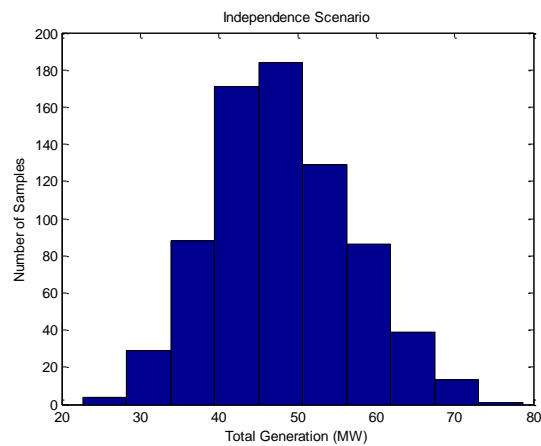


Σχήμα 7.10 Μεταβολές ταχ. ανέμου- Σενάριο 2

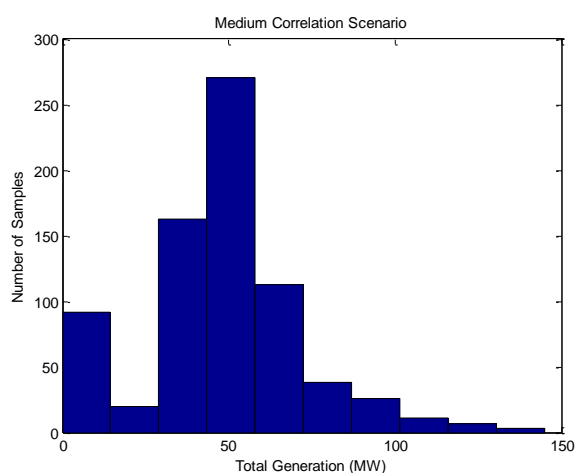


Σχήμα 7.11 Μεταβολές ταχ. ανέμου- Σενάριο 3

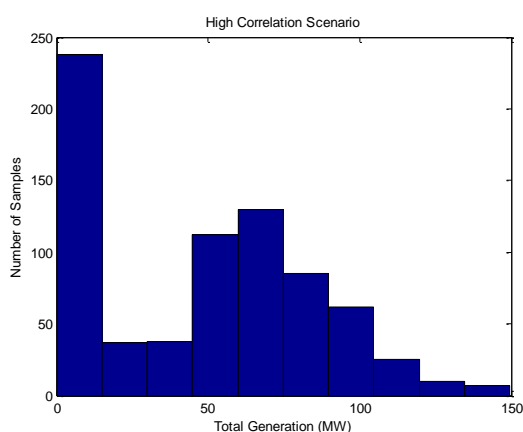
Οι κατανομές που προέκυψαν για τη συνολική παραγόμενη ισχύ είναι οι εξής:



Σχήμα 7.12 Κατανομή συνολικής Αιολικής Παραγωγής – Σενάριο 1



Σχήμα 7.13 Κατανομή συνολικής Αιολικής Παραγωγής – Σενάριο 2



Σχήμα 7.14 Κατανομή συνολικής Αιολικής Παραγωγής – Σενάριο 3

Στην περίπτωση της πλήρους ανεξαρτησίας παρατηρείται μια τάση προσέγγισης της κανονικής κατανομής, κάτι το οποίο είναι αποτέλεσμα του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στις άλλες δύο περιπτώσεις, όπου οι μεταλητές είναι συσχετισμένες, παρατηρείται «απομάκρυνση» από το μοντέλο της κανονικής κατανομής, καθώς η συνθήκη ανεξαρτησίας του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος δεν πληρείται.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει, επίσης, ότι η αύξηση του βαθμού συσχέτισης συνεπάγεται διεύρυνση των ορίων της συνολικής παραγόμενης ισχύος.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις της συνολικής παραγωγής για τις 3 περιπτώσεις συσχέτισης:

	Independence Scenario	Medium Correlation Scenario	High Correlation Scenario
Mean (MW)	48.05	48.05	48.05
Standard Deviation (MW)	8.88	24.4	37.17

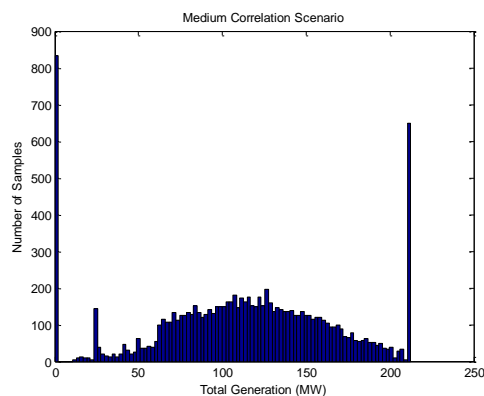
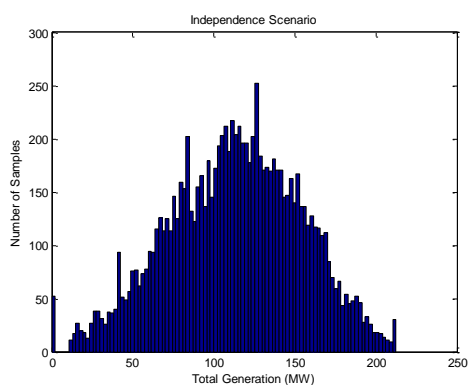
Πίνακας 7.5 Μέσες τιμές και αποκλίσεις συνολικής παραγωγής για 3 σενάρια συσχέτισης

Όπως ήταν αναμενόμενο, η μέση τιμή της παραγόμενης ισχύος παραμένει σταθερή καθώς επηρεάζεται μόνο από τις περιθώριες κατανομές των επιμέρους παραγωγών, οι οποίες παρέμειναν σταθερές κατά την υλοποίηση των 3 σεναρίων συσχέτισης. Συνεπώς, οι μεταβολές των συσχετίσεων δεν έχουν επίδραση στη μέση τιμή του αθροίσματος των παραγωγών των Αιολικών πάρκων. Αντιθέτως, παρατηρείται αύξηση της τυπικής απόκλισης καθώς αυξάνεται ο βαθμός συσχέτισης, κάτι που είχε προκύψει και από τα διαγράμματα κατανομών.

7.4.2 Σύγκριση με τα αποτελέσματα της μελέτης του Κεφαλαίου 6

Στο κεφάλαιο 6 έγινε μια αντίστοιχη μελέτη εξετάζοντας τη συνολική αιολική παραγωγή ενός Stochastic Plant αποτελείται από 3 επιμέρους Αιολικά Πάρκα.

Τα συγκριτικά αποτελέσματα για τη συνολική ισχύ θεωρώντας ανεξαρτησία και μεσαία συσχέτιση ήταν τα εξής:



Σχήμα 7.15 Κατανομή παραγωγής- 26 ζυγοί-Indep.

Σχήμα 7.16 Κατανομή παραγωγής- 26 ζυγοί-High Corr.

Δηλαδή, τα όρια της συνολικής παραγόμενης ισχύος παρέμειναν τα ίδια (μεταξύ μηδέν και ονομαστικής ισχύος) ενώ παρατηρήθηκε αύξηση των πιθανοτήτων να λάβει τις 2 ακραίες τιμές.

Στην περίπτωση της Κρήτης που μελετήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, παρατηρήθηκε διεύρυνση των ορίων μέσα στα οποία αναμένεται να κυμανθεί η Αιολική ισχύς. Οι maximum τιμές που έδωσαν τα 3 σενάρια συσχέτισης είναι:

	<i>Independence Scenario</i>	<i>Medium Correlation Scenario</i>	<i>High Correlation Scenario</i>
Μέγιστη Αιολική ισχύς	75.45 MW	145.41 MW	146.38 MW (ονομαστική)

Πίνακας 7.6 Μέγιστη Αιολική ισχύς για 3 σενάρια συσχέτισης

Το γεγονός ότι στην περίπτωση της Κρήτης υπήρχε διεύρυνση των ορίων της Συνολικής παραγωγής οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι σ'αυτή την περίπτωση η συνολική ισχύς προέρχεται από 24 εγκαταστάσεις.

Στην περίπτωση του κεφαλαίου 6, η έξοδος προερχόταν από 3 εγκαταστάσεις, κάτι το οποίο πιθανοτικά-στατιστικά σημαίνει ότι ακόμα και στην περίπτωση της πλήρους ανεξαρτησίας οι πιθανότητες οι 3 εγκαταστάσεις να λάβουν ταυτόχρονα τις ονομαστικές τους ισχύεις είναι αυξημένες. Οι αντίστοιχες πιθανότητες για την περίπτωση μεγαλύτερου αριθμού εγκαταστάσεων, όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα είναι ελάχιστες και συγκεκριμένα στην περίπτωση των 24 Αιολικών πάρκων είναι μηδενικές.

7.5 Μελέτη της επίδρασης της συσχέτισης του συνολικού φορτίου με τις Αιολικές Παραγωγές

Στις προηγούμενες παραγράφους εξετάστηκε η ευαισθησία της Αιολικής Παραγωγής στα διάφορα μοντέλα συσχέτισης.

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η σχέση μεταξύ του φορτίου του συστήματος και των Αιολικών Παραγωγών και η επίδρασή της στη διαχείριση του συστήματος.

Για την ανάδειξη της παραπάνω επίδρασης αναπτύχθηκαν 2 σενάρια:

- Ανεξαρτησία μεταξύ του φορτίου του συστήματος και των Αιολικών Παραγωγών
- Αρνητική συσχέτιση μεταξύ του φορτίου του συστήματος και των Αιολικών Παραγωγών

Σημειώνεται ότι η συσχέτιση μεταξύ φορτίου και Αιολικών παραγωγών έχει ως αφετηρία τη συσχέτιση μεταξύ ταχυτήτων ανέμου και φορτίου, η οποία έχει ανάλογα αποτελέσματα στη συσχέτιση φορτίου-αιολικών παραγωγών.

Το δεύτερο σενάριο συσχέτισης αποτελεί την πιο ακραία περίπτωση όσον αφορά την ασφαλή διαχείριση του συστήματος, σε συνδυασμό με την πλήρη συσχέτιση των παραγωγών των Αιολικών Πάρκων.

Η ροή φορτίου για τα 2 σενάρια επιλύθηκε με τη μέθοδο Monte Carlo και τα δείγματα παράχθηκαν μέσω του λογισμικού UNICORN. Η μοντελοποίηση της συσχέτισης έγινε οργανώνοντας τις μεταβλητές (συνολικό φορτίο και ταχύτητες ανέμου) σε μια δομή δέντρου (TREE) και χρησιμοποιώντας την κανονική copula.

Για την υλοποίηση των 2 σεναρίων, οι περιθώριες κατανομές των φορτίων και των παραγωγών διατηρήθηκαν σταθερές. Οι αναμενόμενες τιμές του φορτίου και για τα 2 σενάρια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

% %	Bus No	-Expected Values for Load- MW	Mvar
	1	16.6600	9.2180
	2	8.6700	4.7970
	3	10.6420	5.8880
	4	10.8120	5.9820
	5	16.0140	8.8600
	6	6.3240	3.4990
	7	12.2400	6.7720
	8	14.8920	8.2390
	9	10.3020	5.7000
	10	13.0560	7.2240
	11	8.4390	4.6690
	12	3.5190	1.9470
	13	3.0600	1.6930
	14	7.4460	4.1200
	15	2.5500	1.4110
	16	16.6600	9.2180
	17	16.6600	9.2180
	18	10.6420	5.8880
	19	10.6420	5.8880
	20	10.8120	5.9820
	21	16.0140	8.8600
	22	16.0140	8.8600
	23	6.3240	3.4990
	24	8.4390	4.6690
	25	3.5190	1.9470

Πίνακας 7.7 Ανανόμενες τιμές φορτίων

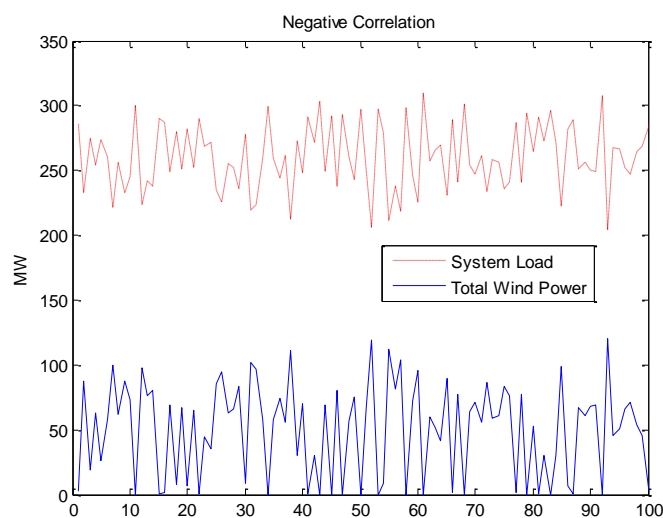
Οι αναμενόμενες τιμές των Αιολικών Παραγωγών όπως προέκυψαν μετά την προσομοίωση ήταν οι εξής:

	<i>Μέση τιμή παραγωγής (MW)</i>		<i>Μέση τιμή παραγωγής (MW)</i>
<i>Αιολικό Πάρκο 1</i>	1.548	<i>Αιολικό Πάρκο 13</i>	1.7
<i>Αιολικό Πάρκο 2</i>	1.46	<i>Αιολικό Πάρκο 14</i>	1.298
<i>Αιολικό Πάρκο 3</i>	2.36	<i>Αιολικό Πάρκο 15</i>	2.252
<i>Αιολικό Πάρκο 4</i>	1.56	<i>Αιολικό Πάρκο 16</i>	2.67
<i>Αιολικό Πάρκο 5</i>	1.36	<i>Αιολικό Πάρκο 17</i>	0.94
<i>Αιολικό Πάρκο 6</i>	1.51	<i>Αιολικό Πάρκο 18</i>	2.49
<i>Αιολικό Πάρκο 7</i>	4.8	<i>Αιολικό Πάρκο 19</i>	0.3
<i>Αιολικό Πάρκο 8</i>	3.01	<i>Αιολικό Πάρκο 20</i>	1.54
<i>Αιολικό Πάρκο 9</i>	1.43	<i>Αιολικό Πάρκο 21</i>	2.59
<i>Αιολικό Πάρκο 10</i>	0.5	<i>Αιολικό Πάρκο 22</i>	3.27
<i>Αιολικό Πάρκο 11</i>	3.32	<i>Αιολικό Πάρκο 23</i>	0.85
<i>Αιολικό Πάρκο 12</i>	1.13	<i>Αιολικό Πάρκο 24</i>	1.858

Πίνακας 7.8 Αναμενόμενες τιμές των παραγωγών των Αιολικών Πάρκων

Η μόνη αλλαγή που πραγματοποιήθηκε για την παραγωγή των δειγμάτων μέσω προσομοίωσης ήταν ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ του συνολικού φορτίου και των ταχυτήτων του ανέμου στις 24 περιοχές όπου είναι εγκατεστημένα τα Αιολικά Πάρκα.

Παρακάτω φαίνονται 100 διαδοχικές μεταβολές του συνολικού φορτίου του συστήματος συγκριτικά με τις μεταβολές της συνολικής Αιολικής Παραγωγής για τα 2 σενάρια συσχέτισης:

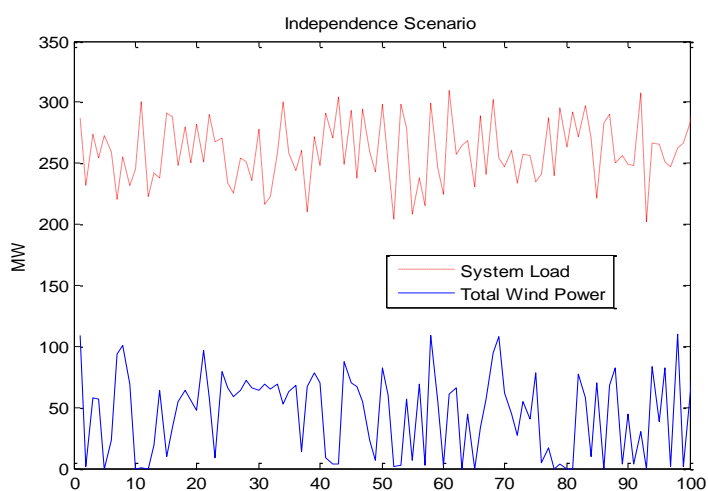


Σχήμα 7.17 Μεταβολές φορτίου-Αιολ.Παραγωγής-Αρνητική Συσχέτιση

Είναι εμφανές ότι μικρή ζήτηση φορτίου αντιστοιχεί σε μεγάλη παραγωγή και αντιστρόφως.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν πολλές ακραίες καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το σύστημα. Για παράδειγμα, όταν η συνολική ζήτηση φορτίου είναι 300 MW, η διαθέσιμη αιολική ισχύς είναι σχεδόν μηδενική.

Το αντίστοιχο στιγμιότυπο θεωρώντας ότι η συνολική παραγωγή των Αιολικών πάρκων είναι ανεξάρτητη του ζητούμενου φορτίου είναι το εξής:



Σχήμα 7.18 Μεταβολές φορτίου-Αιολ.Παραγωγής-Ανεξαρτησία

Παρατηρούμε ότι ακραίες συμπεριφορές όπως αυτή που περιγράφηκε παραπάνω παρατηρούνται και στην περίπτωση της πλήρους ανεξαρτησίας αλλά σε μικρότερη κλίμακα και με μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης. Γι αυτό το λόγο, η αποδοχή της πλήρους ανεξαρτησίας δεν προβλέπει με ακρίβεια όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ακραίων συμπεριφορών ζήτησης φορτίου και Αιολικής Παραγωγής.

7.5.1 Αποτελέσματα για ροές ισχύος

Επιλύοντας ροές φορτίου μέσω της μεθόδου Monte Carlo παρατηρούνται διαφορές όσον αφορά τις αναμενόμενες συμπεριφορές των ροών ισχύος στις γραμμές του συστήματος.

Ενδεικτικά, εξετάζονται οι ροές ισχύος στις γραμμές 1-27 και 10-40. Οι μέσες τιμές που προέκυψαν για τις ροές ισχύος στις παραπάνω γραμμές είναι οι εξής:

	Σενάριο 1 (αρνητική συσχέτιση)	Σενάριο 2 (ανεξαρτησία)
Μέση τιμή ροής ισχύος – Γραμμή 1-27	16.372 MW	16.09 MW
Μέση τιμή ροής ισχύος – Γραμμή 10-40	9.78 MW	8.4 MW

Πίνακας 7.9 Αναμενόμενες μέσες τιμές ροών ισχύος για 2 σενάρια συσχέτισης

Οι αντίστοιχες τιμές για τις τυπικές αποκλίσεις είναι οι ακόλουθες:

	Σενάριο 1 (αρνητική συσχέτιση)	Σενάριο 2 (ανεξαρτησία)
Τυπική απόκλιση ροής ισχύος – Γραμμή 1-27	1.5 MW	1.006 MW
Τυπική απόκλιση ροής ισχύος – Γραμμή 10-40	4.53 MW	2.49 MW

Πίνακας 7.10 Τυπικές αποκλίσεις ροών ισχύος για 2 σενάρια συσχέτισης

Χρησιμοποιώντας τη “3-sigma formula”:

$$-3\sigma + \mu \leq \chi \leq 3\sigma + \mu$$

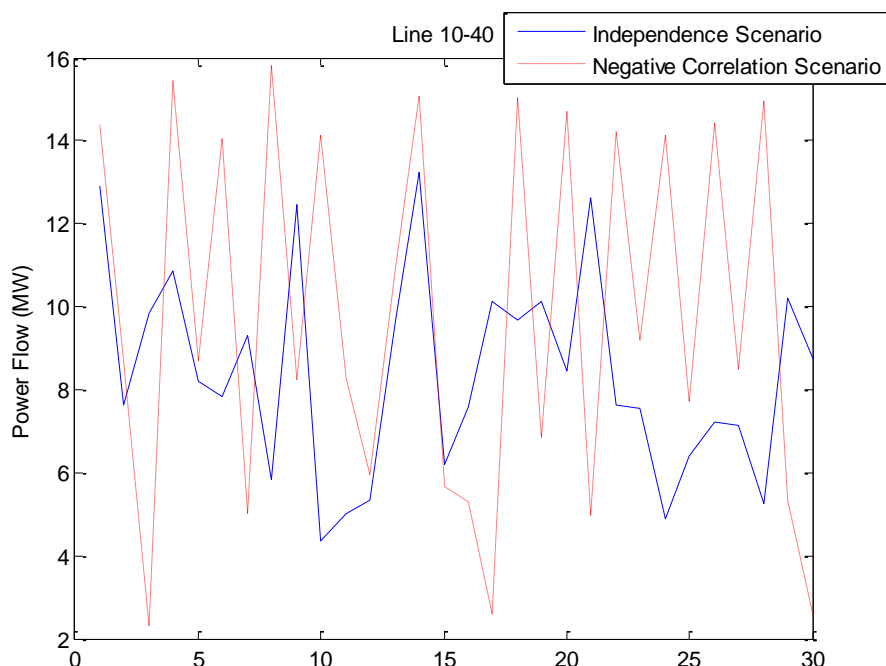
οι ροές ισχύος αναμένεται κατά να κυμαίνονται μέσα στα όρια:

	Σενάριο 1 (αρνητική συσχέτιση)	Σενάριο 2 (ανεξαρτησία)
Ροή ισχύος – Γραμμή 1-27	[11.87 MW, 20.88 MW]	[13.08 MW, 19.11 MW]
Ροή ισχύος – Γραμμή 10-40	[-3.8MW, 23.27 MW]	[0.92 MW, 15.88 MW]

Πίνακας 7.11 Όρια εμπιστοσύνης ροών ισχύος

Όπως ήταν αναμενόμενο, επιβεβαιώθηκε η θεωρία ότι ακραία σενάρια συσχέτισης προβλέπουν τιμές μεγαλύτερες από τα όρια που προκύπτουν θεωρώντας ανεξάρτητες μεταβλητές.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται 30 διαδοχικές μεταβολές της ροής ισχύος στη γραμμή 10-40:



Σχήμα 7.19 Μεταβολές Ροές ισχύος για τα 2 σενάρια συσχέτισης

Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα των πραγματικών μεταβολών της ροής ισχύος, στην περίπτωση της πλήρους αρνητικής συσχέτισης παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις, κάτι το οποίο είχε προκύψει και από την πιθανοτική προσέγγιση της 3-s formula.

7.5.2 Αποτελέσματα για απώλειες

Όσον αφορά τις απώλειες της συγκεκριμένης γραμμής, η αναμενόμενη τιμή τους για τα 2 σενάρια φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

	Σενάριο1 (αρνητική συσχέτιση)	Σενάριο 2 (ανεξαρτησία)
Αναμενόμενη τιμή απωλειών (γραμμή 10-40)	0.0257 MW	0.0206 MW

Πίνακας 7.12 Αναμενόμενες τιμές απωλειών στη γραμμή 10-40

Τα αποτελέσματα για τις συνολικές απώλειες του συστήματος είναι:

	<i>Σενάριο1 (αρνητική συσχέτιση)</i>	<i>Σενάριο 2 (ανεξαρτησία)</i>
Αναμενόμενη τιμή απωλειών (συνολικές)	13.58 MW	11.73 MW

Πίνακας 7.13 Αναμενόμενες τιμές συνολικών απωλειών

Η τυπική απόκλιση των απωλειών για τα 2 σενάρια είναι:

	<i>Σενάριο1 (αρνητική συσχέτιση)</i>	<i>Σενάριο 2 (ανεξαρτησία)</i>
Τυπική απόκλιση απωλειών (συνολικές)	3.08 MW	2.97 MW

Πίνακας 7.14 Τυπική απόκλιση συνολικών απωλειών

Παρατηρούμε ότι το σενάριο ακραίας συσχέτισης αύξησε τις συνολικές απώλειες του συστήματος και τη διακύμανση του συγκεκριμένου μεγέθους, κάτι το οποίο οφείλεται στη διεύρυνση των τιμών των ροών ισχύος στις γραμμές.

7.5.3 Αποτελέσματα για τις τάσεις των ζυγών

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, και στην περίπτωση των τάσεων παρατηρήθηκε μεγαλύτερη διακύμανση στην περίπτωση της πλήρους ανεξαρτησίας.

Εξετάζοντας την τάση στο ζυγό 60 (όπου είναι συνδεδεμένο ένα από τα Αιολικά Πάρκα) ,βάσει της αναμενόμενης τιμής και της τυπικής της απόκλισης, αναμένεται να κυμανθεί μεταξύ των τιμών:

	<i>Σενάριο1 (αρνητική συσχέτιση)</i>	<i>Σενάριο 2 (ανεξαρτησία)</i>
Τάση ζυγού 13	[0.9487,1.0013]	[0.9669,0.9902]

Πίνακας 7.15 Όρια εμπιστοσύνης για την τάση του ζυγού 60

Δηλαδή το όριο της τιμής 0.9902 που προκύπτει από το σενάριο της ανεξαρτησίας ξεπερνάται στην περίπτωση του πρώτου σεναρίου.

Εξετάζοντας τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς του συστήματος, τα ανώτατα όρια που δίνει το σενάριο της αρνητικής συσχέτισης είναι αυξημένα σε σχέση με τα αντίστοιχα του σεναρίου ανεξαρτησίας.

Δηλαδή, χρησιμοποιώντας τις ίδιες κατανομές για τα φορτία και τις παραγωγές του συστήματος και αλλάζοντας μόνο το βαθμό συσχέτισής τους, προέκυψαν διαφοροποιημένα αποτελέσματα όσον αφορά τη συμπεριφορά των τάσεων.

Το σενάριο της αρνητικής συσχέτισης μπορεί να προβλέψει πιθανή υπέρβαση τάσης έτσι ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα διαχείρισης του συστήματος λαμβάνοντας υπόψιν τις χειρότερες δυνατές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το σύστημα.

8

Συζήτηση

Κύριος στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη μεθόδων ανάλυσης της Αβεβαιότητας των ΣΗΕ με έμφαση στα ΣΗΕ με έντονη διείσδυση Αιολικής Ενέργειας και η μελέτη της επίδρασης της στοχαστικής συσχέτισης στη διαχείριση τέτοιου τύπου ΣΗΕ.

Η μοντελοποίηση χωρίστηκε σε 2 μέρη: τη μοντελοποίηση των περιθώριων κατανομών των μεταβλητών και τη μοντελοποίηση της μεταξύ τους συσχέτισης.

Για τη μοντελοποίηση της συσχέτισης, αποδείχθηκε ότι όταν δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες για την αλληλεπίδραση των μεταβλητών του συστήματος, η υπόθεση της ανεξαρτησίας οδηγεί σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

Παρουσιάστηκαν δομές οργάνωσης της συσχέτισης (Trees και Vines) οι οποίες σε συνδυασμό με τις συναρτήσεις σύζευξης (Copulas) μοντελοποιούν τη στοχαστική συσχέτιση σε συστήματα έντονης αβεβαιότητας.

Μέσω των εφαρμογών των 2 τελευταίων κεφαλαίων προέκυψε ότι μελετώντας ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας με έντονη αβεβαιότητα αγνοώντας τις αλληλεπιδράσεις των μεταβλητών και λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις περιθώριες κατανομές τους οδηγούμαστε σε μη ακριβή αποτελέσματα.

Συγκεκριμένα, από τη μελέτη του Δικτύου της Κρήτης, πραγματοποιώντας προσομοιώσεις για διάφορα σενάρια συσχέτισης μεταξύ των ταχυτήτων του ανέμου στις περιοχές των Αιολικών Πάρκων, προέκυψαν διαφορετικές κατανομές για τη Συνολική Αιολική παραγωγή του συστήματος. Αύξηση της συσχέτισης οδήγησε σε ακραίες συμπεριφορές της κατανομής της συνολικής παραγωγής, δηλαδή παρατηρήθηκε διεύρυνση των ορίων μέσα στα οποία κυμάνθηκαν οι τιμές της.

Το σενάριο πλήρους ανεξαρτησίας προέβλεψε μηδενικές πιθανότητες η συνολική παραγωγή να είναι μηδενική ή μέγιστη, κάτι το οποίο ανετράπη στα σενάρια της μεσαίας και υψηλής συσχέτισης. Επιπλέον, στην περίπτωση της πλήρους ανεξαρτησίας η κατανομή

της συνολικής παραγωγής προσέγγισε την κανονική κατανομή, κάτι το οποίο είναι αποτέλεσμα του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος.

Για το δίκτυο της Κρήτης αναπτύχθηκαν , επίσης, 2 σενάρια συσχέτισης μεταξύ του συνολικού φορτίου και της συνολικής Αιολικής Παραγωγής: σενάριο πλήρους ανεξαρτησίας και σενάριο πλήρους αρνητικής συσχέτισης. Είναι σαφές ότι, ενώ στην περίπτωση της συσχέτισης των ταχυτήτων του ανέμου, η θετική συσχέτιση ήταν το ακραίο σενάριο, στην περίπτωση της συσχέτισης φορτίου-αιολικής παραγωγής, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη διακύμανση της διαφοράς Load – Generation, η αρνητική συσχέτιση λαμβάνεται ως το ακραίο σενάριο συσχέτισης.

Επιλύοντας μεγάλο πλήθος ροών φορτίου για τα δείγματα που παρήχθησαν για τα 2 σενάρια προέκυψαν οι κατανομές των τάσεων των ζυγών και των ροών ισχύος στις γραμμές του δικτύου. Παρατηρήθηκε μια τάση τα παραπάνω μεγέθη να παρουσιάζουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην περίπτωση της αρνητικής συσχέτισης, κάτι το οποίο επιβεβαιώνει ότι το συγκεκριμένο σενάριο είναι το worst-case scenario της συγκεκριμένης μελέτης.

Επίσης, οι συνολικές απώλειες του συστήματος παρουσίασαν μεγαλύτερη αναμενόμενη τιμή για το σενάριο της αρνητικής συσχέτισης και μεγαλύτερη τυπική απόκλιση.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι πραγματοποιώντας μια μελέτη έχοντας αγνοήσει ενδεχόμενες συσχετίσεις μεταξύ των εισόδων του συστήματος είναι πιθανό να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις σχετικά με σημαντικά μεγέθη του συστήματος όπως οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών.

Εκτός από το δίκτυο της Κρήτης μελετήθηκε ένα απλούστερο δίκτυο 26 ζυγών με μεγάλη συμμετοχή μονάδων Αιολικής παραγωγής, οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε 2 ζυγούς του συστήματος. Στο ζυγό 21 είναι συνδεδεμένο ένα Αιολικό πάρκο ενώ στο ζυγό 19 είναι συνδεδεμένο ένα Stochastic Generation Plant (SGP) που αποτελείται από 3 Αιολικά πάρκα.

Μελετώντας την ευαισθησία του SGP ως προς τις συσχετίσεις μεταξύ των ταχυτήτων του ανέμου στις 3 περιοχές που το απαρτίζουν αποδείχθηκε ότι αύξηση της συσχέτισης οδηγεί σε διαφορετική κατανομή της συνολικής παραγόμενης ισχύος αυξάνοντας τις πιθανότητες να λάβει μηδενική και μέγιστη τιμή. Επιπλέον, η υψηλή συσχέτιση είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερα όρια εμπιστοσύνης για την τάση του συγκεκριμένου ζυγού αλλά και για τις ροές ισχύος στις γραμμές που περιλαμβάνουν το ζυγό αυτό.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι η ασφαλέστερη διαχείριση του συστήματος απαιτεί, λόγω έλλειψης στοιχείων, να υιοθετηθεί το σενάριο της απόλυτης συσχέτισης.

Με αυτό τον τρόπο, μειώθηκε η αβεβαιότητα του συστήματος και το ενδιαφέρον στράφηκε στην μοντελοποίηση της συσχέτισης των Αιολικών παραγωγών που συνδέονται στους ζυγούς 19 και 21 του συστήματος.

Πλέον, έχοντας να αντιμετωπίσουμε τη συσχέτιση δύο μεταβλητών λήφθηκε υπόψιν και η περίπτωση της αρνητικής συσχέτισης. Αναπτύσσοντας διάφορα σενάρια θετικής και αρνητικής συσχέτισης και διατηρώντας σταθερές τις περιθώριες κατανομές όλων των μεταβλητών του συστήματος πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις μέσω του UNICORN από τις οποίες προέκυψαν δείγματα που περιγράφουν τον τρόπο μεταβολής των Αιολικών παραγωγών. Επιλύοντας τη ροή φορτίου για όλα τα sets τιμών προέκυψε ότι παρόλο που οι περιθώριες κατανομές των φορτίων και των παραγωγών διατηρήθηκαν σταθερές, υπήρξε διαφοροποίηση στις κατανομές των τάσεων και των ροών ισχύος του δικτύου.

Συνεπώς, έχοντας θεωρήσει ότι η παραγωγή του ζυγού 19 ακολουθεί την πιο ακραία δυνατή κατανομή, τα αποτελέσματα από την μελέτη της συσχέτισης των παραγωγών των ζυγών 19 και 21 καθιστούν αναγκαίο τον καθορισμό της συγκεκριμένης συσχέτισης. Ένα ρεαλιστικό σενάριο είναι η θεώρηση ότι οι 2 παραγωγές συνδέονται με μεσαία θετική συσχέτιση. Όπως φάνηκε από την επίλυση της Ροής φορτίου, για το συγκεκριμένο σενάριο συσχέτισης παρατηρούνται μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις συγκριτικά με τα σενάρια της ανεξαρτησίας και της αρνητικής συσχέτισης. Παρεμφερή αποτελέσματα προέκυψαν και για το σενάριο της πλήρους θετικής συσχέτισης.

Η υπόθεση της πλήρους συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών του Stochastic Plant 19 και της μεσαίας συσχέτισης των αιολικών παραγωγών 19 και 21 θεωρήθηκε ένα ασφαλές και ταυτόχρονα ρεαλιστικό μοντέλο αλληλεπίδρασης των στοχαστικών εισόδων του συγκεκριμένου ΣΗΕ.

Υιοθετώντας το συγκεκριμένο σενάριο, επιλύθηκε η ροή φορτίου με τη Στοχαστική μέθοδο και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με εκείνα της μεθόδου Monte Carlo. Παρατηρήθηκε σημαντική ταύτιση των 2 μεθόδων όσον αφορά τις αναμενόμενες τιμές των τάσεων και των ροών ισχύος ενώ στην περίπτωση των τυπικών αποκλίσεων, από τη Στοχαστική ροή φορτίου προέκυψαν μεγαλύτερες τιμές, κάτι που την καθιστά λιγότερο ακριβή συγκριτικά με τη Monte Carlo. Ωστόσο, αποτελεί αποτελεσματικό τρόπο για γρήγορες εκτιμήσεις των ορίων μέσα στα οποία αναμένεται να κυμανθούν τα μεγέθη του συστήματος (τάσεις, ροές

ισχύος, απώλειες) και μπορεί να εφαρμοστεί κυρίως σε μακροπρόθεσμες μελέτες ρών φορτίου.

Ένα σημαντικό θέμα το οποίο θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας είναι η ανάλυση ευστάθειας τάσης ενός ΣΗΕ με έντονη αβεβαιότητα. Μελετώντας τις συσχετίσεις σε ΣΗΕ με έντονη διείσδυση Αιολικής Ενέργειας ή υιοθετώντας ακραία σενάρια συσχέτισης, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας ως μια εργαλεία στην ανάλυση της ευστάθειας ενός συστήματος.

Επίσης, δεδομένου ότι η παρούσα μελέτη βασίσθηκε κατά κύριο λόγο στη στοχαστικότητα της Αιολικής παραγωγής, αντίστοιχη μελέτη θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε ΣΗΕ με εξίσου έντονη στοχαστικότητα φορτίου. Σε αυτή την περίπτωση, η έντονη αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης του φορτίου θα απαιτούσε ανάπτυξη μοντέλων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των φορτίων, συμπεριλαμβάνοντας στη μελέτη παράγοντες που συνδέονται με την εποχή, τη συμπεριφορά των καταναλωτών και άλλους.

Βιβλιογραφία

- [1] Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., D'haeseleer W., Belmans R. , "Distributed Generation: Definition, benefits and issues", WORKING PAPER SERIES n°2003-8, August 2003
- [2] M.Sobierajski, Wroclaw, "A Method of Stochastic Load Flow Calculation", Archiv für Elektrotechnik 60 (1978) 37-40
- [3] Georgios Papaefthymiou, "Integration of Stochastic Generation in Power Systems",,, Dissertation at Delft University of Technology, 2007
- [4] Ντατσοπούλου Διονυσία, "Διδιάστατες Copulas με έμφαση στα ασφαλιστικά προβλήματα", Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μαθηματικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ιούνιος 2005
- [5] P. Chen, Student Member, IEEE, Z. Chen, Senior Member, IEEE, and B. Bak-Jensen, Member, IEEE, "Probabilistic Load Flow: a Review", DRPT2008 6-9 April 2008 Nanjing China
- [6] Malvin H. Kalos, Paula A. Whitlock "Monte Carlo Methods: Basics (Vol1)", (Contributor) / Paperback / Published 1986
- [7] Athanasios Papoulis, "Πιθανότητες, Τυχαίες Μεταβλητές και Στοχαστικές Διαδικασίες", Εκδόσεις Τζιόλα Θεσσαλονίκη, 3η Έκδοση, 1994.
- [8] Riccardo Rebonato, Peter Jackel, "The most general methodology to create a valid correlation matrix for risk management and option pricing purposes", Quantitative Research Centre of the NatWest Group
- [9] K.Kinsner, A.Serwin,M.Sobierajski , "Practical Aspects of Stochastic Load Flow Calculations", Archiv für Elektrotechnik 60 (1978) 283-288
- [10] Ελισάβετ Βορέαδη, "Πιθανοτική προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ", Ιούλιος 2009

[11] George Papaefthymiou, *Member, IEEE*, and Dorota Kurowicka, *IEEE*, “Using Copulas for Modeling Stochastic Dependence in Power System Uncertainty Analysis”, *TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 24, NO. 1, FEBRUARY 2009

[12] TOSHIO INOUE, HIROYUKI MORI, SHIN-ICHI IWAMOTO and YASUO TAMURA, “Redundant Measurement Selection Using Stochastic Load Flow”, *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 103, No. 1, 1983

[13] Β. Παπαδιάς, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας: Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας (Τόμος 1), “ Αθήνα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985