



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

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ**  
**ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διονυσία Δ. Δράκου

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014





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

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ**  
**ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διονυσία Δ. Δράκου

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....2014.

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

.....  
Παπαθανασίου Σταύρος  
Αναπ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Γεωργιλάκης Παύλος  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014

.....  
Δράκου Διονυσία

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

Copyright © Διονυσία Δράκου, 2014

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.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Με την ευκαιρία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Τράκα, για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου , οι οποίοι με στήριξαν και με ενθάρρυναν καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της μεθόδου ελεγχόμενης νησιδοποίησης, της ελεγχόμενης και μελετημένης διάσπασης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτοδιατηρούμενες νησίδες. Όταν ένα Σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση έκτακτης ανάγκης εξαιτίας κάποιων διαταραχών, εφαρμόζεται έλεγχος που το οδηγεί στην κατάσταση επιφυλακής. Αν ο έλεγχος αυτός αποτύχει να φέρει τις παραμέτρους του συστήματος σε τιμές εντός των περιορισμών τους, θα ενεργοποιηθούν προστασίες που θα δράσουν έτσι ώστε να προστατεύσουν τα στοιχεία του συστήματος από ανεπανόρθωτες ζημιές. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στη νησιδοποίηση του συστήματος που πολλές φορές παράγει νησίδες ασταθείς ή χωρίς ισορροπία φορτίου-παραγωγής. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η εσκεμμένη και ελεγχόμενη νησιδοποίηση του συστήματος ως έλεγχος εκτάκτου ανάγκης, προκειμένου να περιοριστεί η πιθανότητα ενός εκτεταμένου blackout.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι αλγορίθμων που αποσκοπούν στην ελεγχόμενη νησιδοποίηση του συστήματος.

Η πρώτη μέθοδος επικαλείται τη Μέθοδο Φασματικής Ομαδοποίησης με χρήση του μη-κανονικοποιημένου πίνακα Laplace. Έχει ως περιοριστικό παράγοντα τον συγχρονισμό των γεννητριών ο οποίος ενσωματώνεται στο πρόβλημα με τη χρήση του πίνακα προβολών, ο οποίος στην ουσία απεικονίζει ποιες γεννήτριες πρέπει να ανήκουν στην ίδια ομάδα και ποιες όχι. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι η ελάχιστη διαταραχή ροής ισχύος, καθώς είναι αυτή που μαζί με τον περιορισμό των ομάδων συγχρονισμένων γεννητριών, εξασφαλίζουν τη μεταβατική ευστάθεια των νησίδων που διαμορφώνονται, άρα και του συστήματος. Τέλος για την ομαδοποίηση των δεδομένων χρησιμοποιείται ο επαναληπτικός αλγόριθμος kmeans.

Η δεύτερη μέθοδος επικαλείται τη Μέθοδο Φασματικής Ομαδοποίησης με χρήση του κανονικοποιημένου πίνακα Laplace και έχει ως περιοριστικό παράγοντα τον συγχρονισμό των γεννητριών. Και σε αυτή τη μέθοδο η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι η ελάχιστη διαταραχή ροής ισχύος. Η διαφορά της με την προηγούμενη μέθοδο είναι ότι χρησιμοποιεί τον κανονικοποιημένο πίνακα Laplace και ότι δεν χρησιμοποιεί επαναληπτικούς αλγορίθμους για την ομαδοποίηση των δεδομένων (kmeans), αλλά τη μέθοδο της φασματικής ενσωμάτωσης με βάση τις ομάδες των συγχρονισμένων γεννητριών (coherent groups).

Η τρίτη μέθοδος αλλάζει πια υπόσταση και παρουσιάζει ένα νέο αλγόριθμο βελτιστοποίησης ο οποίος βασίζεται στο νόμο της βαρύτητας και στις αλληλεπιδράσεις των μαζών. Εδώ οι πράκτορες-άτομα αναζήτησης (agents) θεωρούνται αντικείμενα και η απόδοση τους εκτιμάται από τις μάζες τους. Τα αντικείμενα αυτά τοποθετούνται στο χώρο αναζήτησης ενός προβλήματος ή μιας συνάρτησης και είναι μάζες οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με βάση το 2<sup>ο</sup> νόμο του Νεύτωνα, έλκονται μεταξύ τους με τη βαρυτική έλξη η οποία προκαλεί μία κίνηση όλων των αντικειμένων προς αυτά που έχουν μεγαλύτερη μάζα. Οι κινήσεις των πρακτόρων υπολογίζονται με βάση τα βάρη τους, και τα βάρη τους υπολογίζονται άμεσα από την αντικειμενική συνάρτηση, σε κάθε επανάληψη η καλύτερη λύση αποθηκεύεται στη μεταβλητή gbest. Κάθε σωματίδιο καθορίζει στη συνέχεια την κίνησή του στο χώρο αναζήτησης βασιζόμενο τόσο στη δική του εμπειρία (τρέχουσα και καλύτερη θέση) όσο και στην εμπειρία των υπόλοιπων ατόμων του

πληθυσμού. Η επόμενη επανάληψη λαμβάνει χώρα αφού έχουν κινηθεί όλα τα σωματίδια. Τελικά, το σμήνος ως σύνολο θα προσεγγίσει τη βέλτιστη τιμή της συνάρτησης. Αναμένεται οι μάζες να προσελκύονται από τη βαρύτερη μάζα η οποία και θα αποτελεί μια βέλτιστη λύση στο χώρο αναζήτησης .

Οι τρεις παραπάνω μέθοδοι εφαρμόζονται στα τρία πρότυπα δίκτυα IEEE των 9, των 39 και των 118 ζυγών και μέσω των αποτελεσμάτων τους συμπεραίνεται η αποτελεσματικότητα και η αξιοπιστία της κάθε μεθόδου.

**Λέξεις κλειδιά:** ομαδοποίηση δεδομένων, αλγόριθμοι ομαδοποίησης, ηλεκτρικό δίκτυο, διαχωρισμός, νησιδοποίηση, ζυγός, διαταραχή, νησίδα, συναφείς ομάδες γεννητριών, συγχρονισμένες γεννήτριες, φασματική ενσωμάτωση, αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων, αλγόριθμος βαρυτικής αναζήτησης, αντικειμενική συνάρτηση, παραγωγή & κατανάλωση ενεργού ισχύος



## ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study the method of controlled islanding. Controlled islanding of a power system is an efficient corrective measure for limiting system blackouts after a large disturbance has occurred. It limits the occurrence and consequences of blackouts by splitting the power system into a group of smaller, islanded power systems, or islands. The essence of an islanding solution is determining a suitable set of transmission lines that need to be disconnected to create a set of electrically isolated islands. Controlled islanding can be used to cope with different power system extremes, such as un-damped oscillations, voltage collapse, cascading trips, etc.

This work proposes three different methods of algorithms for determining suitable islanding solutions.

The first method uses Un-normalized Spectral Clustering and a generation coherency constraint which can be included by modifying the solution subspace using a projection matrix. The objective function used in this controlled islanding algorithm is the minimal power-flow disruption, which improve the transitional stability of the islands, and hence the system. Finally uses the clustering algorithm kmeans in order to cluster the nodes of the system.

The second method uses Normalized Spectral Clustering and a generation coherency constraint. In this method, the objective function is the minimal power-flow disruption. The difference with the previous method is that it uses the normalized Laplacian, as a number of studies have shown that it offers superior performance compared with un-normalized Laplacian on weighted networks. This methodology directly determines an islanding solution with minimal power flow disruption for any given number of islands, while ensuring that each island contains only coherent generators. The methodology solves an associated 'eigenproblem' only once, even when multiple islands (larger than two) are to be created, and avoids iterative algorithms (e.g. k-means). These advantages significantly improve the computational efficiency and the quality of the solution, particularly when dealing with large-scale systems.

The third method is a new optimization algorithm based on the law of gravity, mass interactions and swarm behaviors in nature. Here the search agents are considered as objects and their performance is evaluated by their masses. All these objects attract each other by the gravity force, and this force causes a global movement of all objects towards the objects with heavier masses. The movements of the agents calculated based on their weights and their weights are determined directly from the objective function, in each iteration the best obtained solution so far is saved in gbest. Each particle then determines his motion, in binary search space, based both, on his own experience and the experience of the population. The next iteration takes place after all the particles have moved. Eventually, the swarm will approach the optimum value of the function.

These three methods are applied to three IEEE -9, 39- and 118-bus test systems.

**Keywords:** spectral clustering, clustering algorithms, power system, controlled islanding, power-flow disruption, generator coherency, spectral embedding, particle swarm optimization algorithm, gravitational search algorithm, objective function.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ -Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση .....	- 13 -
1.1	Γενικά .....	- 13 -
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ -Θεωρητική Εισαγωγή .....	- 15 -
2.1	Ομαδοποίηση Δεδομένων .....	- 15 -
2.2	Θεωρία Των Γράφων .....	- 18 -
2.3	Φασματική Ομαδοποίηση .....	- 20 -
2.4	Αλγόριθμος k-means.....	- 22 -
2.5	Μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (αλγόριθμος PSO) .....	- 23 -
2.6	Μέθοδος βαρυτικής αναζήτησης (GSA: Gravitational Search Algorithm).....	- 27 -
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ -Μέθοδος Φασματικής Ομαδοποίησης με χρήση πίνακα προβολών για την Εφαρμογή Ελεγχόμενης Νησιδοποίησης .....	- 31 -
3.1	Εισαγωγή.....	- 31 -
3.2	Δίκτυο 9 ζυγών.....	- 37 -
3.3	Δίκτυο 39 ζυγών.....	- 40 -
3.4	Δίκτυο 118 ζυγών.....	- 46 -
3.5	Συμπεράσματα.....	- 50 -
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ-Μέθοδος φασματικής ομαδοποίησης με περιορισμούς για την Εφαρμογή Ελεγχόμενης Νησιδοποίησης.....	- 53 -
4.1	Εισαγωγή.....	- 53 -
4.2	Δίκτυο 9 ζυγών.....	- 57 -
4.3	Δίκτυο 39 ζυγών.....	- 63 -
4.4	Δίκτυο 118 ζυγών.....	- 69 -
4.5	Συμπεράσματα.....	- 75 -
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ -Μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και βαρυτικής αναζήτησης.....	- 79 -
5.1	Εισαγωγή.....	- 79 -
5.2	Δίκτυο 9 ζυγών.....	- 84 -
5.3	Δίκτυο 39 ζυγών.....	- 89 -
5.4	Δίκτυο 118 ζυγών.....	- 96 -
5.5	Συμπεράσματα.....	- 98 -

6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ –Συμπεράσματα/Αξιολόγηση Μεθόδων .....	- 101 -
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>- 105 -</b>

# **I ΚΕΦΑΛΑΙΟ** -Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση

## **1.1 Γενικά**

Βασικός σκοπός της λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η συνεχής εξυπηρέτηση της καταναλώσεως. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή πρέπει να προσαρμόζεται συνεχώς, σε πραγματικό χρόνο, ώστε να εξισορροπεί την κατανάλωση. Η ασφαλής λειτουργία ενός συστήματος έχει μεγάλη σημασία στην ομαλή και οικονομική λειτουργία του. Όταν ένα σύστημα έχει ανεπαρκή βαθμό ασφάλειας εκτίθεται σε σοβαρές και ενίοτε καταστροφικές αστοχίες, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές οικονομικές απώλειες και κοινωνικό κόστος. Για να διασφαλιστεί ότι ένα σύστημα είναι επαρκώς αξιόπιστο και με αποδεκτή πιθανότητα ομαλής λειτουργίας σε μακροπρόθεσμο επίπεδο θα πρέπει αφενός να είναι σωστά σχεδιασμένο με μέριμνα για την ασφάλειά του, και αφετέρου να υπάρχει η δυνατότητα εποπτείας κατά τη λειτουργία του ώστε να ελέγχεται η ύπαρξη επαρκούς περιθωρίου ασφάλειας. Οι αλλαγές στη δομή των σύγχρονων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη νέων εργαλείων για την εκτίμηση και τον έλεγχο της δυναμικής ασφάλειας στα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρική Ενέργειας. Προκειμένου να περιοριστεί η πιθανότητα ενός εκτεταμένου blackout, είναι απαραίτητο να ενισχυθεί η εποπτεία και τα μέσα ελέγχου του συστήματος.

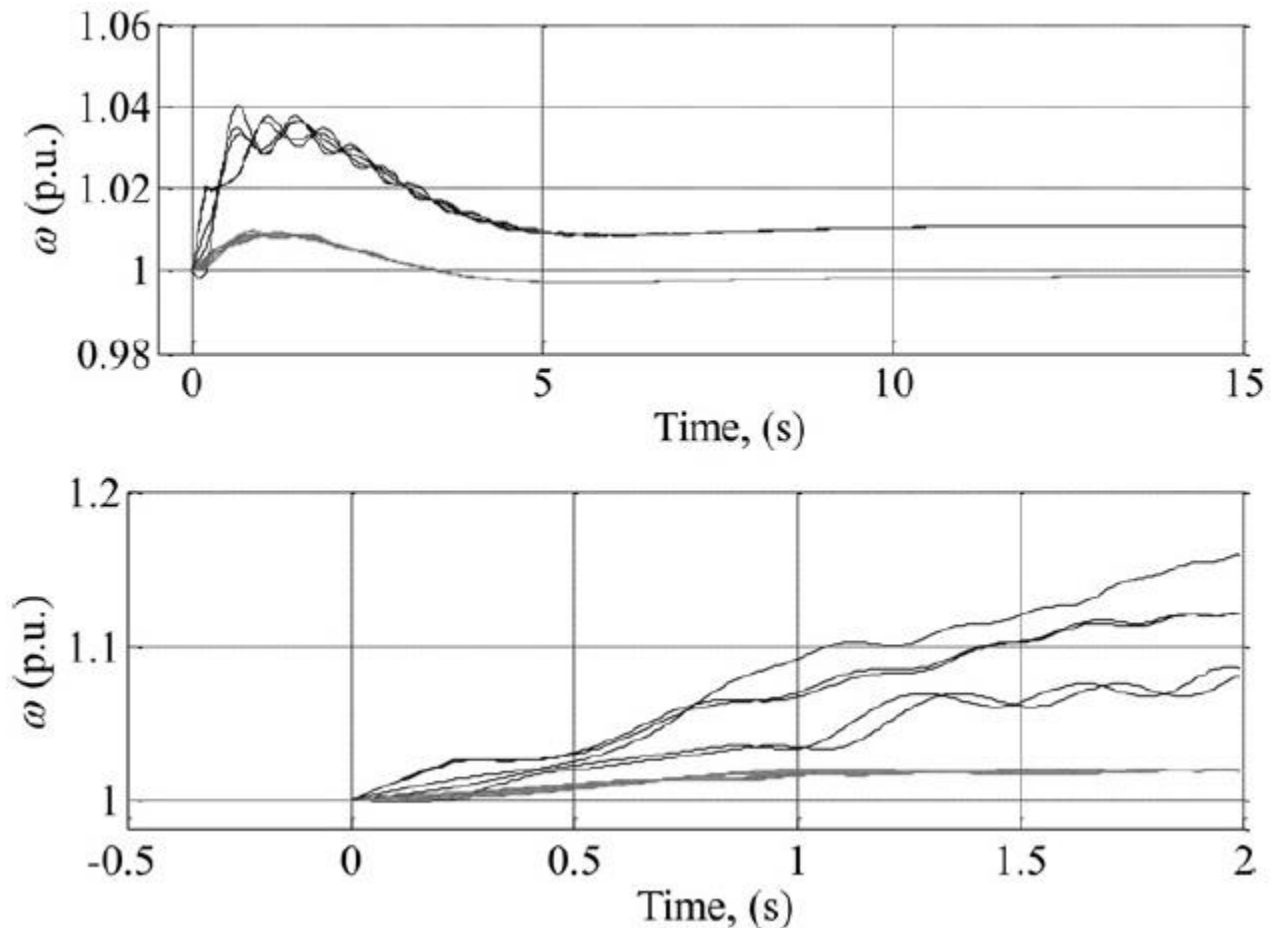
Όταν ένα Σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση έκτακτης ανάγκης εξαιτίας κάποιων διαταραχών, εφαρμόζεται έλεγχος που το οδηγεί στην κατάσταση επιφυλακής. Αν ο έλεγχος αυτός αποτύχει να φέρει τις παραμέτρους του συστήματος σε τιμές εντός των περιορισμών τους, θα ενεργοποιηθούν προστασίες που θα δράσουν έτσι ώστε να προστατεύσουν τα στοιχεία του συστήματος από ανεπανόρθωτες ζημιές. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στη νησιδοποίηση του συστήματος που πολλές φορές παράγει νησίδες ασταθείς ή χωρίς ισορροπία φορτίου-παραγωγής. Η διάσπαση του συστήματος, που καλείται και ελεγχόμενη νησιδοποίηση και θα μελετηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι πολύ διαφορετική. Έχει την έννοια ότι το κέντρο ελέγχου διασπά το δίκτυο σε αυτοδιατηρούμενες νησίδες με το να αποσυνδέει επιλεγμένες γραμμές. Ο όρος "αυτοδιατηρούμενες" σημαίνει ότι πρέπει να ικανοποιούνται κάποιες απαραίτητες προϋποθέσεις όπως η μεταβατική ευστάθεια, το ισοζύγιο παραγωγής και φορτίου και περιορισμοί μεταφοράς ισχύος. Από αυτή την οπτική η ελεγχόμενη νησιδοποίηση του συστήματος μπορεί να θεωρηθεί και ως έλεγχος εκτάκτου ανάγκης[1].

Κατά την εμφάνιση ενός σφάλματος στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι γεννήτριες του συστήματος αρχίζουν να ταλαντώνονται. Σκοπός της ομαλής λειτουργίας του δικτύου είναι όλες οι γεννήτριες να ταλαντώνονται στην ίδια συχνότητα και να έχουν την ίδια δυναμική συμπεριφορά, στην περίπτωση που αυτό δε συμβαίνει οι γεννήτριες δεν μπορούν να

συγχρονιστούν μεταξύ τους, η προστασία του δικτύου σταδιακά τις αποκόβει από το σύστημα και σταδιακά θα επέλθει η κατάρρευση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Το έκτακτο μέτρο της ελεγχόμενης νησιδοποίησης έχει ως στόχο να δημιουργήσει ομάδες γεννητριών οι οποίες μπορούν να συγχρονιστούν και να ταλαντώνονται στην ίδια συχνότητα. Με τη δημιουργία των νησίδων απομονώνονται οι ομάδες αυτές των συγχρονισμένων γεννητριών προκειμένου να μην “βλέπει” η μια την άλλη και να μην αποσυγχρονίζονται. Στο **σχήμα 1.1.1** απεικονίζονται οι ταχύτητες περιστροφής των γεννητριών του δικτύου 118 ζυγών (IEEE), μετά και πριν την εφαρμογή ελεγχόμενης νησιδοποίησης, όπου παρατηρείται ο εμφανής διαχωρισμός των ομάδων συγχρονισμένων γεννητριών[4].

Ένας ακόμα περιορισμός είναι οι νησίδες αυτές να έχουν όσο το δυνατόν περισσότερο ισορροπημένο ισοζύγιο παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος προκειμένου να αποφευχθεί η απόρριψη φορτίου ή παραγωγής.



**Σχήμα 1.1.1:** Οι ταχύτητες περιστροφής των γεννητριών του δικτύου 118 ζυγών (IEEE), μετά και πριν την εφαρμογή ελεγχόμενης νησιδοποίησης

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Θεωρητική Εισαγωγή

### 2.1 Ομαδοποίηση Δεδομένων

Στην υποενότητα αυτή περιγράφεται η τεχνική της ομαδοποίησης και οι βασικοί αλγόριθμοι ομαδοποίησης δεδομένων καθώς στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί η διαδικασία αυτή για το διαχωρισμό του δικτύου ηλεκτρικής ενέργεια σε ομάδες-νησίδες.

#### Τεχνική Ομαδοποίησης (Clustering)

Ομαδοποίηση είναι η διαδικασία δημιουργίας συνόλων που αποτελούνται από αντικείμενα, τα οποία παρουσιάζουν περισσότερες ομοιότητες μεταξύ τους σε σχέση με αυτές που παρουσιάζουν με αντικείμενα άλλων ομάδων σύμφωνα με κάποιο κριτήριο. Σκοπός είναι να προσδιοριστούν οι ομάδες που ανήκουν διάφορες ποσότητες δεδομένων, με βάση κάποια κριτήρια ομοιογένειας. Η τεχνική της ομαδοποίησης υπάγεται στην ευρύτερη κατηγορία των τεχνικών μάθησης χωρίς επίβλεψη. Η διαφορά της ομαδοποίησης δεδομένων (data clustering) από την ταξινόμηση δεδομένων (data classification) είναι ότι, στην ταξινόμηση οι ομάδες στις οποίες θα τοποθετηθούν τα δεδομένα είναι προκαθορισμένες. Αυτό σημαίνει, ότι είναι εκ των προτέρων γνωστός ο αριθμός των ομάδων, τα ονόματα και οι ταυτότητες τους. Αντίθετα, στην ομαδοποίηση δεδομένων τονίζεται ιδιαίτερα ότι οι ομάδες δεν προϋπάρχουν αλλά αποφασίζονται από τον αλγόριθμο κατά δυναμικό τρόπο. Στην ομαδοποίηση δεδομένων δηλαδή, υπάρχει ένα σύνολο δεδομένων το οποίο πρέπει να διαχειριστεί ώστε από αυτό να προκύψουν δυναμικά οι ομάδες. Σκοπός είναι να δημιουργηθούν ομάδες, που η καθεμία από αυτές θα συγκεντρώνει ομοιογενή στοιχεία. Κάθε μία από αυτές τις ομάδες διατηρεί ένα κέντρο, συνήθως το πιο κεντρικό στοιχείο της.

Η διαδικασία της ομαδοποίησης μπορεί να περιγραφεί από τα ακόλουθα βήματα:

- ✓ **Επιλογή χαρακτηριστικών γνωρισμάτων.** Ο στόχος είναι να επιλεγούν τα καταλληλότερα γνωρίσματα σύμφωνα με τα οποία πρόκειται να εφαρμοστεί η ομαδοποίηση με στόχο την επίτευξη της βέλτιστης ομοιογένειας σε κάθε ομάδα. Έτσι η προ επεξεργασία των δεδομένων πριν την εφαρμογή της ομαδοποίησης είναι ιδιαίτερα σημαντική.
- ✓ **Επιλογή αλγόριθμου ομαδοποίησης.** Σε αυτό το στάδιο γίνεται η επιλογή ενός αλγορίθμου που θα οδηγήσει σε μία καλή ομαδοποίηση ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων. Για τη επιλογή του αλγορίθμου χρησιμοποιείται το μέτρο γειτνίασης και το κριτήριο ομαδοποίησης τα οποία ορίζουν απόλυτα τον αλγόριθμο. Το μέτρο γειτνίασης αναφέρεται στην ομοιότητα δύο αντικειμένων (δηλαδή διανύσματα γνωρισμάτων). Η επιλογή των γνωρισμάτων πρέπει να γίνεται προσεκτικά ώστε η συμβολή τους να είναι ίση κατά τον υπολογισμό του μέτρου γειτνίασης και να μην υπερισχύει το ένα έναντι του άλλου. Η γειτνίαση των αντικειμένων συνήθως μετριέται με βάση μία συνάρτηση απόστασης που ορίζεται για ζεύγη αντικειμένων. Η

πιο απλή συνάρτηση απόστασης είναι η Ευκλείδεια. Το κριτήριο ομαδοποίησης εκφράζεται συνήθως βάση μιας συνάρτησης κόστους.

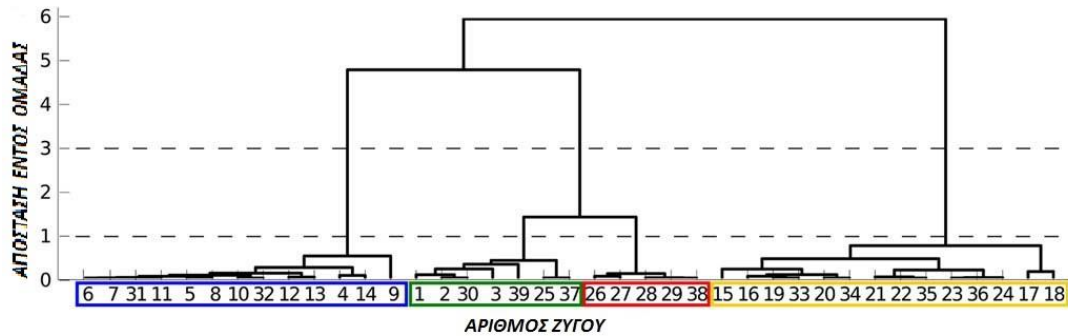
- ✓ **Επικύρωση αποτελεσμάτων.** Σε αυτή τη φάση αξιολογούνται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου ομαδοποίησης σύμφωνα με συγκεκριμένα κριτήρια ορθότητας. Η ποιότητα της ομαδοποίησης που έχει δημιουργηθεί εξαρτάται από την ομοιότητα (δηλαδή μεγάλη ομοιότητα εντός της ομάδας - μικρή ομοιότητα μεταξύ των ομάδων) και την μέθοδο υλοποίησης της ομαδοποίησης.
- ✓ **Ερμηνεία των αποτελεσμάτων.** Αποτελεί το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας, όπου θα πρέπει να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα συνδυάζοντας και άλλα στοιχεία με σκοπό την παραγωγή του εγκυρότερου αποτελέσματος.

Η διαδικασία της ομαδοποίησης είναι μία διαδικασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς καθώς αποτελεί μία τεχνική που βοηθάει σημαντικά στη λήψη αποφάσεων. Η χρήση της πραγματοποιείται στη στατιστική ανάλυση δεδομένων, στην επεξεργασία εικόνας, στην πληροφορική, στην αναγνώριση προτύπων και σε διάφορους άλλους επιστημονικούς τομείς. Για την ομαδοποίηση δεδομένων υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι και μέθοδοι οι οποίοι διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον ορισμό των συνόλων καθώς και την αποδοτικότητα εύρεσης αυτών. Η επιλογή τους εξαρτάται από τη μορφή του προβλήματος που καλείται να επιλυθεί, το είδος των δεδομένων και τον χρήστη.

Οι κύριες κατηγορίες ομαδοποίησης είναι δύο, οι διαμεριστικές και οι ιεραρχικές.

- **Ιεραρχική ομαδοποίηση:** Στην ιεραρχική ομαδοποίηση οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται δημιουργούν μία ιεραρχία μεταξύ των σημείων τα οποία πρόκειται να ομαδοποιηθούν. Συνήθως δημιουργούν ένα δενδρόγραμμα που υποδηλώνει το μέγεθος και τον αριθμό των ομάδων που δημιουργήθηκαν. Οι ιεραρχικοί αλγόριθμοι μπορούν να διαιρεθούν σε δύο επιπλέον κατηγορίες, τους συσσωρευτικούς και τους διαιρετικούς. Οι συσσωρευτικοί ξεκινάνε με  $N$  ομάδες. Σε κάθε βήμα του αλγορίθμου, το πλήθος των ομάδων μειώνεται κατά ένα συγχωνεύοντας δύο σε μία ομάδα έως φτάσουμε σε μία μοναδική που να εμπεριέχει όλα τα διανύσματα. Ένα παράδειγμα συσσωρευτικού αλγορίθμου για το πρότυπο δίκτυο IEEE 39 ζυγών παρουσιάζεται στο **σχήμα 2.1.1**. Η εξέλιξη του αλγορίθμου μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά με ένα δενδρόγραμμα ανομοιότητας. Το δενδρόγραμμα περιέχει  $N - 1$  επίπεδα με το κάθε επίπεδο να αποτελεί ένα βήμα του αλγορίθμου. Επιπλέον περιλαμβάνει και την ποσότητα ανομοιότητας μεταξύ των ομάδων που συγχωνεύονται. Οι διαιρετικοί αλγόριθμοι ακολουθούν αντίστροφη διαδικασία. Ξεκινούν από μία ομάδα η οποία εμπεριέχει όλα τα διανύσματα και σε κάθε βήμα μία ομάδα διασπάται σε δύο μέχρι να καταλήξουμε σε  $N$  ομάδες. Η πολυπλοκότητα τους είναι μεγαλύτερη από τους συσσωρευτικούς. Στην πράξη αυτό που γίνεται ότι ο αλγόριθμος σε κάθε βήμα διασπά μία ομάδα αλλά όχι κατά βέλτιστο τρόπο.





**Σχήμα 2.1.1:** Ιεραρχική ομαδοποίηση[3]

- Διαμεριστική ομαδοποίηση:** Στη διαμεριστική ομαδοποίηση οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται λειτουργούν ως εξής: αρχικά χωρίζουν τα αντικείμενα-δεδομένα σε ομάδες και στη συνέχεια έχουν ως στόχο τη βελτιστοποίηση του αποτελέσματος. Πιο συγκεκριμένα αν υπάρχει ένα σύνολο  $N$  πλήθους δεδομένων τότε κατασκευάζονται  $k$  ομάδες και στη συνέχεια ελέγχεται η δυνατότητα βελτιστοποίησης. Γνωστοί αλγόριθμοι αυτού του είδους είναι οι κεντροειδείς (centroids) αλγόριθμοι, όπου κάθε ομάδα αναπαρίσταται με το κέντρο μάζας της. Στους αλγόριθμους αυτούς το κέντρο μάζας μπορεί να είναι ένα κεντρικό διάνυσμα το οποίο δεν χρειάζεται να ανήκει πάντα στην ομάδα-σύνολο. Μόλις δημιουργηθεί ο αριθμός των ομάδων  $k$ , γίνεται η προσπάθεια βελτιστοποίησης του εξής προβλήματος: εύρεση των  $k$  κέντρων όλων των ομάδων και στη συνέχεια εισαγωγή κάθε αντικειμένου στην ομάδα με το πλησιέστερο κέντρο, με σκοπό την ελαχιστοποίηση κάποιας συνάρτησης απόστασης. Παράδειγμα κεντροειδή(centroids) αλγορίθμων είναι οι  $k$ -means και  $k$ -medoids οι οποίοι θα αναλυθούν εκτενέστερα στη συνέχεια της εργασίας καθώς θα χρησιμοποιηθούν για το διαχωρισμό-ομαδοποίηση του δικτύου σε νησίδες.

### Φασματική ομαδοποίηση

Η φασματική ομαδοποίηση (*spectral clustering*) είναι μια σχετικά πιο νέα τεχνική ομαδοποίησης η οποία σαν είσοδο του αλγορίθμου έχει έναν συμμετρικό πίνακα με στοιχεία τις εγγύτητες (*similarities*) μεταξύ των σημείων που πρόκειται να ομαδοποιηθούν και τον αριθμό των ομάδων που πρέπει να προκύψουν. Ένας τρόπος με τον οποίο συνήθως αναπαρίσταται διαισθητικά η φασματική ομαδοποίηση είναι η χρήση γράφων. Σε αυτήν την αναπαράσταση, κατασκευάζεται ο γράφος ομοιότητας(similarity graph) τα σημεία τα οποία πρόκειται να ομαδοποιηθούν αναπαρίστανται σαν τις κορυφές (*vertices*) του γράφου ενώ οι μεταξύ τους εγγύτητες με τις ακμές (*edges*) αυτού. Οι ακμές εμφανίζονται με βάρη, οι τιμές των οποίων αναπαριστούν τις αντίστοιχες τιμές εγγύτητας μεταξύ των δύο σημείων τα οποία ενώνει η αντίστοιχη ακμή. Το πρόβλημα της ομαδοποίησης τώρα επικεντρώνεται στο να βρεθεί ένας διαχωρισμός του γράφου σε ομάδες έτσι ώστε: οι ακμές μεταξύ κόμβων διαφορετικών ομάδων να έχουν μικρά βάρη (κάτι το οποίο

σημαίνει ότι οι κόμβοι είναι ανόμοιοι μεταξύ τους) ,ενώ οι ακμές μεταξύ κόμβων της ίδιας ομάδας να έχουν υψηλά βάρη (κάτι το οποίο σημαίνει ότι οι κόμβοι είναι όμοιοι μεταξύ τους)[5].

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητη η εισαγωγή στη θεωρία των γράφων, προκειμένου η φασματική ομαδοποίηση να γίνει πιο κατανοητή και να πραγματοποιηθεί περαιτέρω ανάλυση αυτής.

Συνοπτικά αναφέρεται ότι και άλλες μέθοδοι ομαδοποίησης που διαφέρουν από τις κλασσικές ομαδοποιήσεις δεδομένων, όπως η ασαφής ομαδοποίηση(Fuzzy clustering) .

Στην ασαφή ομαδοποίηση, σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους ομαδοποίησης όπου κάθε πρότυπο ανήκει σε μία μόνο ομάδα (hard clustering), κάθε δεδομένο ανήκει σε όλες τις ομάδες σε κάποιο βαθμό. Κάθε αντικείμενο έχει τη δυνατότητα να ανήκει σε δύο ή και παραπάνω ομάδες και ορίζεται μία συνάρτηση συμμετοχής η οποία υποδηλώνει το βαθμό συμμετοχής κάθε αντικειμένου σε κάθε ομάδα. Όσο πιο κοντά στο ένα είναι ο βαθμός συμμετοχής ενός στοιχείου σε μια ομάδα, τόσο πιο μεγάλη πιθανότητα είναι η πιθανότητα συμμετοχή αυτού του αντικειμένου στη συγκεκριμένη ομάδα. Αντίθετα, όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι ο βαθμός συμμετοχής, μειώνεται η πιθανότητα για τη συμμετοχή του.

## 2.2 Θεωρία Των Γράφων

Η θεωρία των γράφων είναι ένα πεδίο των μαθηματικών με εφαρμογές σε μία πληθώρα επιστημονικών πεδίων.

- Γράφος θα μπορούσε να ορισθεί η οπτική αναπαράσταση των σχέσεων που αναπτύσσουν ορισμένες ποσότητες ή αντικείμενα, σχεδιασμένα σύμφωνα με ένα σύνολο αξόνων. Ένας γράφος  $G = (V, E)$  αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων (vertices ή nodes)  $V = \{u_1, \dots, u_n\}$  και ένα σύνολο ακμών (edges)  $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ .
- Κάθε ακμή θα μπορούσε να ορισθεί ως ένα μη διατεταγμένο ζεύγος δύο κόμβων  $E \subseteq V \times V$ .
- $n = |V|$ , συμβολίζουμε το πλήθος των κορυφών
- $m = |E|$ , συμβολίζουμε το πλήθος των πλευρών-ακμών
- $e = (i, j) \in E$ , συμβολίζουμε μία πλευρά, όπου  $i$  και  $j$  ο κόμβοι που ενώνονται με την ακμή  $e_{ij}$
- Ένας γράφος  $G = (V, E)$  μπορεί εναλλακτικά να αναπαρασταθεί από έναν πίνακα γειτνίασης (adjacency matrix)  $W = (w_{ij})_{i,j=1,\dots,n}$ . Ο πίνακας αυτός έχει μέγεθος  $n \times n$  και κάθε στοιχείο του πίνακα  $w_{ij}$  ορίζεται ως

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & , \text{αν } (i, j) \in E \\ 0 & , \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

- Ένας γράφος μπορεί να έχει συσχετισμένο με κάθε ακμή του ένα συντελεστή βάρους, στην περίπτωση αυτή ο πίνακας γειτνίασης δε θα αποτελείται από μονάδες στα σημεία των κόμβων που είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους αλλά από αντίστοιχα βάρη (weighted graph).

- Ως απόσταση δύο κόμβων ορίζεται το συντομότερο μονοπάτι που υπάρχει ανάμεσα τους. Ένα μονοπάτι είναι απλό όταν περνάει ακριβώς μία φορά από κάθε κόμβο ενώ κυκλικό, ονομάζεται όταν έχει ως αρχή και τέλος τον ίδιο κόμβο.
- Μη κατευθυνόμενος γράφος(undirected graph) είναι ο γράφος για τον οποίο για κάθε ακμή του  $e$  ισχύει  $w_{ij} = w_{ji}$ , όπου  $i, j \in V$ .  
Οι κορυφές  $i$  και  $j$  λέγονται άκρα της  $(i, j)$   
Οι κορυφές  $i$  και  $j$  λέγονται γείτονες αν υπάρχει η  $(i, j)$   
Αν η κορυφή  $i$  έχει  $d$  γείτονες τότε λέμε πως έχει βαθμό  $d$
- Σε έναν **κατευθυνόμενο γράφο** (directed graph) τα  $(u_i, v_j)$  και  $(v_j, u_i)$  δεν είναι ισοδύναμα. Στην κατευθυνόμενη πλέον πλευρά  $(u_i, v_j)$  η κορυφή  $u_i$  λέγεται πηγή(origin) και η  $v_j$  προορισμός (destination) .
- Σε έναν **γράφο με βάρη**(weighted graph) θεωρούμε μία συνάρτηση βάρους  $w : E \rightarrow \mathfrak{R}$ . Το  $w$  μπορεί να μοντελοποιεί βάρος, απόσταση, μήκος, χρόνο, κόστος, χωρητικότητα κ.α. (γενικά επιτρέπονται και αρνητικά βάρη) [11] .

Στα παρακάτω θεωρούμε ότι ο γράφος  $G$  που θα χρησιμοποιηθεί είναι γράφος με βάρη, και κάθε πλευρά του έχει ένα βάρος το οποίο δεν έχει αρνητική τιμή δηλαδή  $w_{ij} \geq 0$ . Ο πίνακας γειτνίασης με βάρη (adjacency matrix) ή αλλιώς πίνακας βαρών (ή ομοιότητας) ορίζεται ο πίνακας  $W = (w_{ij})_{i,j=1,\dots,n}$ , όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Αν  $w_{ij} = 0$  τότε σημαίνει ότι οι κορυφές  $i$  και  $j$  δεν συνδέονται μεταξύ τους μέσω κάποιας ακμής. Επίσης, επειδή θεωρήσαμε ότι ο γράφος που χρησιμοποιούμε είναι μη κατευθυνόμενος (undirected graph) θα πρέπει να ισχύει ότι  $w_{ij} = w_{ji}$ .

- Ο **βαθμός (degree)** μιας κορυφής  $v_i \in V$  ορίζεται ως εξής:

$$d_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το παραπάνω άθροισμα αναφέρεται στις κορυφές που είναι γειτονικές με την κορυφή  $i$  καθώς για τις κορυφές που δεν είναι γειτονικές η ποσότητα  $w_{ij}$  είναι μηδενική.

Στη συνέχεια μπορεί να οριστεί ο πίνακας βαθμών  $D$  (**degree matrix**) ο οποίος είναι ένας διαγώνιος πίνακας και έχει ως στοιχεία της διαγωνίου του τα μεγέθη  $d_1, \dots, d_n$ .

Θεωρούμε ένα υποσύνολο  $A$  του συνόλου  $V$  των κορυφών του γράφου  $A \subset V$ . Για συντομία συμβολίζεται με  $i \in A$  όταν θέλουμε να αναπαραστήσουμε το σύνολο των κορυφών για τις οποίες ισχύει ότι  $\{i | i \in A\}$  (αυτή η συντόμευση χρησιμοποιείται κυρίως όταν χρησιμοποιούνται άθροισμα).

Έτσι για δύο υποσύνολα του συνόλου των κορυφών του γράφου  $V$  ορίζεται το εξής άθροισμα:

$$W(A, B) = \sum_{i \in A, j \in B} w_{ij}$$

Επιπλέον αναφέρονται δύο τρόποι ορισμού του **μεγέθους (size)** ενός υποσυνόλου  $A \subset V$ . Σύμφωνα με τον πρώτο ορισμό, το μέγεθος του υποσυνόλου  $A$  ισούται με τον αριθμό των κορυφών τις οποίες αυτό περιλαμβάνει και συμβολίζεται  $|A|$  : αριθμός κορυφών του υποσυνόλου  $A$ .

Σύμφωνα με τον δεύτερο ορισμό το μέγεθος του υποσυνόλου  $A$  είναι το άθροισμα από όλα τα βάρη των πλευρών που καταλήγουν στις κορυφές που ανήκουν στο  $A$ . Το μέγεθος του  $A$  συμβολίζεται με  $vol(A)$  υπολογίζεται ως εξής[3]

$$vol(A) = \sum_{i \in A} d_i$$

### 2.3 Φασματική Ομαδοποίηση

Η μέθοδος της Φασματικής ομαδοποίησης ( Spectral Clustering) χρησιμοποιεί το φάσμα του πίνακα ομοιότητας των σημείων, δηλαδή αντλεί πληροφορία από τα ιδιοδιανύσματα και τις ιδιοτιμές των πινάκων ομοιότητας. Η φασματική ομαδοποίηση αποτελεί μία προσέγγιση της διαμέρισης γράφου (graph partitioning). Η διαμέριση γράφου υλοποιείται με το διαχωρισμό του γράφου με τέτοιο τρόπο ώστε οι ακμές μεταξύ διαφορετικών ομάδων να έχουν μικρό βάρος ενώ οι ακμές μεταξύ σημείων της ίδιας ομάδας να έχουν μεγάλο βάρος. Στη φασματική ομαδοποίηση χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι οι οποίοι βασίζονται στα ιδιοδιανύσματα των πινάκων *Laplace* και τις βασικές ιδιότητες τους. Παρακάτω περιγράφονται σύντομα οι έννοιες των ιδιοδιανυσμάτων και των ιδιοτιμών καθώς και οι βασικές ειδικότητες των πινάκων *Laplace*.

#### **Ιδιοδιανύσματα και Ιδιοτιμές**

Σε έναν γραμμικό μετασχηματισμό, που αναπαρίσταται μέσω ενός τετραγωνικού πίνακα  $A$ , ένα μη μηδενικό διάνυσμα  $x$  ορίζεται ως ιδιοδιάνυσμα του  $A$  αν ικανοποιεί την εξίσωση  $Ax = \lambda x$  όπου  $\lambda$  είναι ένα βαθμωτό μέγεθος που καλείται ιδιοτιμή του  $A$  και αντιστοιχεί στο διάνυσμα  $x$ . Δεδομένου ότι υπάρχει ο αντίστροφος πίνακας του  $A$ , μπορούμε να υπολογίσουμε τις ιδιοτιμές του επιλύοντας της παρακάτω εξίσωση  $\det(A - \lambda I) = 0$ , όπου  $I$  είναι ο ταυτοτικός πίνακας. Τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές είναι γραμμικά ανεξάρτητα, δηλαδή, σε ένα  $n$ -διάστατο χώρο ο γραμμικός μετασχηματισμός του  $A$  δεν μπορεί να έχει παραπάνω από  $n$  ιδιοδιανύσματα με διαφορετικές ιδιοτιμές. Η πολλαπλότητα μιας ιδιοτιμής είναι ο αριθμός των γραμμικά ανεξάρτητων ιδιοδιανυσμάτων που έχουν την ίδια ιδιοτιμή. Ένα ιδιοδιάνυσμα ενός γράφου  $G$  ορίζεται ως ένα ιδιοδιάνυσμα του πίνακα ομοιότητας του γράφου ή ως ένα ιδιοδιάνυσμα του πίνακα *Laplace* του γράφου αυτού.

## Πίνακας Laplace

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στην φασματική ομαδοποίηση βασίζονται στα ιδιοδιανύσματα των πινάκων *Laplace*, που ουσιαστικά αποτελούν ένα συνδυασμό των πινάκων βαθμών  $D$  και των πινάκων ομοιότητας  $W$ .

**Ο μη-κανονικοποιημένος πίνακας Laplace** προκύπτει ως εξής :

$$L = D - W$$

δηλαδή

$$[L]_{ij} = \begin{cases} d_i & \text{αν } i = j \\ -w_{ij} & \text{αν } i \neq j \text{ και } e_{ij} \in E \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Δοθέντος του γράφου  $G$  και του πίνακα Laplace με ιδιοτιμές  $\lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_{n-1}$  ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες:

- Ο πίνακας  $L$  είναι συμμετρικός και πάντα θετικά ημιορισμένος ( δηλαδή, όλες οι ιδιοτιμές του είναι πραγματικές με θετικές ή ίσες με μηδέν τιμές).
- Ο αριθμός των φορών που εμφανίζεται η ιδιοτιμή  $0$  ισούται με τον αριθμό των συνδεδεμένων συνιστωσών του γράφου. Ο γράφος  $G$  είναι συνδεδεμένος αν δύο οποιεσδήποτε κορυφές του μπορούν να συνδεθούν μέσω ενός μονοπατιού όπου όλοι οι ενδιάμεσοι σταθμοί ανήκουν και αυτοί στον  $G$ .
- Η ιδιοτιμή  $\lambda_i$  είναι μεγαλύτερη από το  $0$  αν και μόνο αν ο γράφος  $G$  είναι συνδεδεμένος
- Η μικρότερη ιδιοτιμή του είναι η μηδενική

**Ο κανονικοποιημένος πίνακας Laplace** ορίζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους:

$$L_{sym} = D^{-1/2} L D^{-1/2} = I - D^{-1/2} W D^{-1/2}$$

$$L_{rw} = D^{-1} L = I - D^{-1} W$$

δηλαδή

$$[L_N]_{ij} = \begin{cases} d_i & \text{αν } i = j \\ -w_{ij} / \sqrt{d_i d_j} & \text{αν } i \neq j \text{ και } e_{ij} \in E \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Δοθέντος γράφου  $G$  και του πίνακα Laplace ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες:

- Οι  $Lsym, Lrw$  είναι πάντα θετικά ημιορισμένοι και έχουν  $n$  πραγματικές, μη αρνητικές ιδιοτιμές
- Ο αριθμός των φορών που εμφανίζεται η ιδιοτιμή 0 στους  $Lsym, Lrw$  είναι ίσος με τον αριθμό των συνδεδεμένων συνιστωσών του γράφου [12].

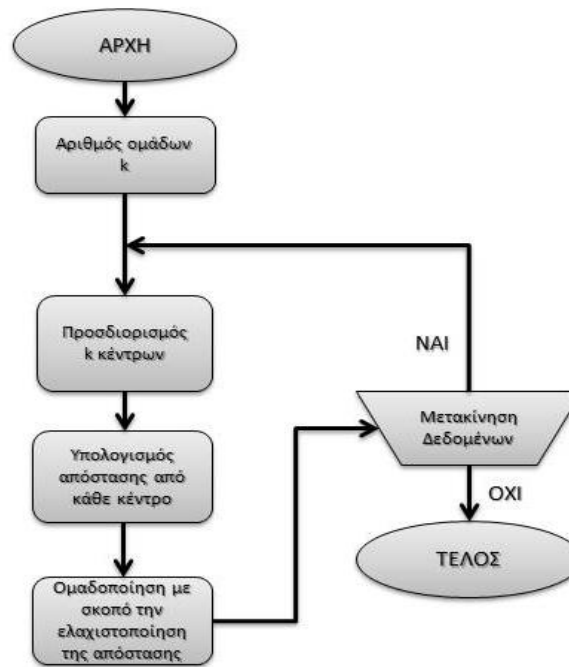
## 2.4 Αλγόριθμος k-means

Ο διαμεριστικός αλγόριθμος k-means είναι ένας από τους πιο απλούς και δημοφιλέστερους αλγορίθμους ομαδοποίησης λόγω της απλότητας τους και της γραμμικής πολυπλοκότητας του. Για την υλοποίηση ομαδοποίησης ενός συνόλου δεδομένων με τη χρήση του αλγορίθμου αυτού απαιτείται να είναι καθορισμένος εκ των προτέρων ο αριθμός  $k$  των ομάδων που πρόκειται να δημιουργηθούν. Η κύρια ιδέα του αλγορίθμου είναι η εξής: αρχικά προσδιορίζονται  $k$  κεντροειδή (centroids), ένα για κάθε ομάδα (cluster). Η επιλογή των κεντροειδών πρέπει να είναι επιδέξια καθώς για διαφορετικές αρχικές θέσεις των κεντροειδών έχουμε διαφορετικά αποτελέσματα. Έτσι συχνά επιλέγονται τα κεντροειδή να απέχουν μεταξύ τους όσο το δυνατόν περισσότερο. Στη συνέχεια, κάθε στοιχείο από το σύνολο των δεδομένων, συσχετίζεται με το κοντινότερο σε αυτό κεντροειδές. Ουσιαστικά ο αλγόριθμος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, τη συνάρτηση τετραγωνικού λάθους η οποία ορίζεται

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad \text{όπου } \|x_i^{(j)} - c_j\| \text{ ένα μέτρο απόστασης που χρησιμοποιείται για να}$$

μετρά την απόσταση μεταξύ κάθε στοιχείου και του κέντρου κάθε ομάδας. Επιπλέον σαν μέτρο απόστασης μεταξύ των στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Ευκλείδεια απόσταση ή άλλα δημοφιλή μέτρα απόστασης. Δηλαδή σε κάθε βήμα το στοιχείο  $x$  θα μπαίνει στην ομάδα  $i$ , εάν η Ευκλείδεια απόσταση του από το centroid της  $i$  ομάδας είναι η μικρότερη σε σχέση με όλες τις άλλες αποστάσεις του από τα centroids των άλλων ομάδων. Έτσι προκύπτει μια πρώτη πρόχειρη ομαδοποίηση. Αμέσως μετά επιλέγονται ξανά  $k$  νέα centroids και ακολουθείται πάλι η διαδικασία ανάθεσης κάθε στοιχείου στο πλησιέστερο σε αυτό centroid. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να σταματήσει η μετακίνηση δεδομένων, όπου τερματίζει ο αλγόριθμος και έχουμε την τελική ομαδοποίηση των δεδομένων σε  $k$  ομάδες (clusters).

Στο **σχήμα 2.4.1** φαίνονται τα βήματα του αλγόριθμου k-means:



**Σχήμα 2.4.1:** Διάγραμμα ροής αλγόριθμου k-means

Ο αλγόριθμος k-means αν και είναι από τους πιο δημοφιλείς αλγόριθμους ομαδοποίησης παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο τρόπος με τον οποίο επιλέγονται τα αρχικά centroids δεν είναι σαφώς καθορισμένος, ενώ συχνά επιλέγονται με τυχαίο τρόπο, και επειδή ο τελικός διαχωρισμός των δεδομένων σε ομάδες εξαρτάται από την επιλογή των αρχικών κεντροειδών, πολλές φορές δεν προκύπτει βέλτιστη ομαδοποίηση δεδομένων. Ο αριθμός των ομάδων που πρόκειται να δημιουργηθούν πρέπει να δίνεται ως είσοδος του αλγορίθμου, γεγονός που αποτελεί ένα ακόμα βασικό μειονέκτημα του. Επιπλέον, πολύ συχνά τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το μέτρο της απόστασης το οποίο θα εφαρμοστεί [13].

## **2.5 Μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (αλγόριθμος PSO)**

Το 1995 αναπτύχθηκε μια στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης από τους Kennedy και Eberhart, η μέθοδος σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization-PSO). Η ανάπτυξη της PSO βασίζεται στην παρατήρηση της συμπεριφοράς ατόμων σμήνους, όπως για παράδειγμα ένα σμήνος πουλιών ή ψαριών. Στην αναζήτησή τους για τροφή από το ένα μέρος στο άλλο, πάντα υπάρχει κάποιος

μέλος του σμήνους που έχει μεγαλύτερη ικανότητα στο να εντοπίσει την τροφή. Καθώς υπάρχει αλληλεπίδραση και μετάδοση πληροφορίας μεταξύ των ατόμων του σμήνους, το σμήνος τελικά θα μετακινηθεί προς την περιοχή όπου υπάρχει τροφή. Στη μέθοδο της PSO υπάρχει ένας αριθμός ατόμων (particles) τα οποία τοποθετούνται στο χώρο αναζήτησης ενός προβλήματος ή μιας συνάρτησης και υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στην τρέχουσα θέση. Κάθε σωματίδιο καθορίζει στη συνέχεια την κίνησή του στο χώρο αναζήτησης βασιζόμενο τόσο στη δική του εμπειρία (τρέχουσα και καλύτερη θέση) όσο και στην εμπειρία των υπόλοιπων ατόμων πληθυσμού. Η επόμενη επανάληψη λαμβάνει χώρα αφού έχουν κινηθεί όλα τα σωματίδια. Τελικά, το σμήνος ως σύνολο θα προσεγγίσει τη βέλτιστη τιμή της συνάρτησης.

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα που συνοψίζονται παρακάτω:

Χρησιμοποιεί πιθανοκρατικούς και όχι ντετερμινιστικούς κανόνες μετάβασης και έτσι είναι ένα είδος στοχαστικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης ο οποίος μπορεί να ψάχνει λύση σε μία πολύπλοκη περιοχή. Αυτό προσδίδει στην PSO μεγαλύτερη ευελιξία από τις συμβατικές μεθόδους.

- Χρησιμοποιεί έναν πληθυσμό ο οποίος ψάχνει για τη λύση. Επομένως η αναζήτηση της λύσης από μία ομάδα ατόμων προσφέρει μεγαλύτερο εύρος από την αναζήτηση της λύσης από ένα μοναδικό σημείο και καθιστά τη μέθοδο λιγότερο ευαίσθητη στο να εγκλωβίζεται σε τοπικά ελάχιστα.
- Μπορεί να εφαρμοστεί σε μη παραγωγίσιμα προβλήματα διότι δεν χρησιμοποιείται η ευαισθησία της συνάρτησης (function sensitivity-gradient).
- Διαθέτει ένα πλήθος παραμέτρων οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να εφαρμόζεται σε ποικίλα προβλήματα. Είναι προφανές ότι η επιλογή των παραμέτρων είναι εξαιρετικής σημασίας τόσο για την ταχύτητα όσο και για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.
- Αντίθετα από τους γενετικούς και τους άλλους ευρετικούς αλγορίθμους, η PSO διαθέτει την ευελιξία να ελέγχει την ισορροπία ανάμεσα στην ολική και την τοπική εξερεύνηση του εξεταζόμενου χώρου. Έτσι ξεπερνάει το πρόβλημα της πρόωρης σύγκλισης και διευρύνεται η ικανότητα αναζήτησης της λύσης [10].

Όπως προαναφέρθηκε, η PSO αποσκοπεί στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, δηλαδή στη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, διεξάγοντας μια στοχαστική αναζήτηση βασισμένη σε έναν πληθυσμό. Ο πληθυσμός αποτελείται από τα άτομα (particles), το κάθε ένα από τα οποία αποτελεί μια πιθανή λύση (candidate solution) και αναπαρίσταται από ένα διάνυσμα  $d$  διαστάσεων, όπου  $d$  ο αριθμός των παραμέτρων που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Δηλαδή το  $k$ -οστό άτομο έχει την εξής μορφή:

$$x_k^{(t)} = [x_{k,1}^{(t)}, x_{k,2}^{(t)}, \dots, x_{k,d}^{(t)}]$$

Ο πληθυσμός αρχικοποιείται κατά τυχαίο τρόπο, αλλά έτσι ώστε να ισχύουν οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας στους οποίους υπόκειται το πρόβλημα, και τα άτομα κινούνται ελεύθερα εντός του πολυδιάστατου χώρου αναζήτησης με κάποια ταχύτητα (velocity) η οποία μαθηματικά έχει την ίδια ακριβώς μορφή με τα άτομα.



Η αρχική θέση και η ταχύτητα του ατόμου  $i$  δίνονται από τους τύπους:

$$x_i^{(0)} = x_{min} + rand(x_{max} - x_{min}) \quad \text{με} \quad x_i^{(t)} = [x_{i,1}^{(t)}, x_{i,2}^{(t)}, \dots, x_{i,d}^{(t)}]$$

$$u_i^{(0)} = x_{min} + \frac{rand(x_{max} - x_{min})}{\Delta t} \quad \text{με} \quad u_i^{(t)} = [u_{i,1}^{(t)}, u_{i,2}^{(t)}, \dots, u_{i,d}^{(t)}]$$

Όπου  $x_{min}, x_{max}$  τα διανύσματα των ανώτερων και κατώτερων τιμών αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων τα άτομα διορθώνουν τόσο την ταχύτητά τους όσο και τη θέση τους (position) βασιζόμενα στη βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει το κάθε ένα από αυτά (τοπικό βέλτιστο,  $pbest_i$ ) αλλά και στη βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει ο συνολικός πληθυσμός (ολικό βέλτιστο,  $gbest_i$ ) μέχρι εκείνη τη στιγμή. Αυτό συμβαίνει με σκοπό να βρεθούν όλα τα άτομα στην περιοχή της βέλτιστης λύσης όπου θα γίνει μία πιο λεπτομερής εξέταση με σκοπό να επιτευχθεί με ακρίβεια η καλύτερη δυνατή λύση

$$pbest_i = (pbest_{i,1}, pbest_{i,2}, \dots, pbest_{i,d})$$

$$gbest = (pbest_1, pbest_2, \dots, pbest_d)$$

Παρακάτω παρουσιάζεται η σχέση σύμφωνα με την οποία κάθε άτομο ανανεώνει την ταχύτητα του σε κάθε επανάληψη:

$$u_i^{(t+1)} = \omega u_i^{(t)} + c_1 rand_1(pbest_i - x_i^{(t)}) + c_2 rand_2(gbest - x_i^{(t)})$$

Οι  $c_1$  και  $c_2$  είναι συντελεστές βαρύτητας ενώ οι  $rand_1$  και  $rand_2$  λαμβάνουν τυχαίες τιμές στο διάστημα  $[0,1]$  προσδίδοντας στον αλγόριθμο στοχαστικό χαρακτήρα. Πιο συγκεκριμένα, η  $c_1$  ονομάζεται εμπειρική παράμετρος διότι συμβάλλει στην καινούργια ταχύτητα σύμφωνα με την εμπειρία του ατόμου, δηλαδή τη βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει το ίδιο, ενώ η  $c_2$  ονομάζεται κοινωνική παράμετρος επειδή καθορίζει την καινούργια ταχύτητα βασιζόμενο στη συμπεριφορά ολόκληρου του πληθυσμού, δηλαδή στη βέλτιστη λύση που έχει επιτευχθεί από το συνολικό πληθυσμό. Η παράμετρος  $\omega$  ονομάζεται βάρος αδράνειας (inertia weight) και ελέγχει το αντίκτυπο που έχουν οι προηγούμενες ταχύτητες στις τρέχουσες. Όσον αφορά τα πρώτα στάδια της αναζήτησης είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται μεγάλες τιμές του  $\omega$  ενώ όταν πρόκειται για τις τελευταίες επαναλήψεις όπου ο αλγόριθμος έχει ήδη προσεγγίσει την περιοχή της βέλτιστης λύσης, είναι αποδοτικότερο να χρησιμοποιούνται μικρές τιμές του  $\omega$  έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη και πιο λεπτομερής τοπική αναζήτηση. Έτσι το  $\omega$  παρουσιάζεται να μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\omega = (\omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iterations}) \times iterations$$

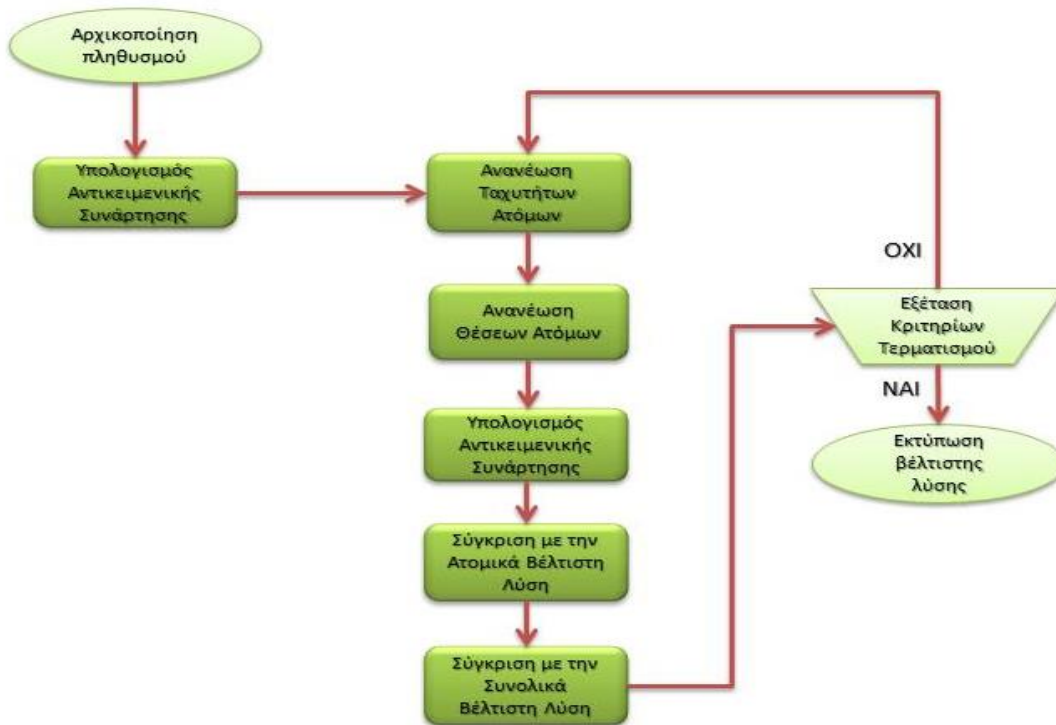
όπου  $iterations$  ο συνολικός αριθμός των επαναλήψεων και  $\omega_{max}, \omega_{min}$  η μέγιστη και η ελάχιστη αντίστοιχα τιμή που έχουμε ορίσει. Σε άλλες μελέτες το  $\omega$  παρουσιάζεται να μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση  $\omega_{new} = \alpha \omega_{old}$ , όπου  $\alpha$  μια σταθερά μικρότερη της μονάδας αλλά πολύ

κοντά σε αυτήν, ενώ πολλές φορές, για λόγους απλοποίησης, το  $\omega$  θεωρείται σταθερό και ίσο με τη μονάδα.

Στη συνέχεια ανανεώνεται η θέση του κάθε ατόμου σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + u_i^{(t+1)}$$

δηλαδή η καινούργια θέση του ατόμου προκύπτει από την πρόσθεση της καινούργιας ταχύτητας και της παλιάς του θέσης. Έπειτα αφού υπολογιστεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος, ανανεώνονται τα  $\vec{p}_{best,i}$  και  $\vec{g}_{best}$  στην περίπτωση που το άτομο ή ο πληθυσμός αντίστοιχα έχει επιτύχει κάποια καλύτερη λύση. Μετά από αυτό το βήμα εξετάζεται αν ικανοποιούνται οι συνθήκες τερματισμού. Αν αυτές ικανοποιούνται ο αλγόριθμος τερματίζεται ενώ αν όχι, αυτός προχωράει στην επόμενη επαναληπτική διαδικασία[23]. Τα βήματα του αλγορίθμου συνοψίζονται στο **σχήμα 2.5.1**.



**Σχήμα 2.5.1:** Διάγραμμα ροής PSO

## 2.6 Μέθοδος βαρυτικής αναζήτησης (GSA: Gravitational Search Algorithm)

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή του PSO αλγορίθμου τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης οι οποίες βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα. Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί ένας νέος αλγόριθμος βελτιστοποίησης ο οποίος βασίζεται στο νόμο της βαρύτητας και στις αλληλεπιδράσεις των μαζών. Εδώ οι πράκτορες-άτομα αναζήτησης (agents) είναι μάζες οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με βάση το 2<sup>ο</sup> νόμο του Νεύτωνα "Κάθε σωματίδιο στο σύμπαν έλκει κάθε άλλο σωματίδιο με μια δύναμη που είναι ευθέως ανάλογη με το γινόμενο των μαζών τους και αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης τους", και τους νόμους της κίνησης [9].

### Η βαρύτητα

Βαρύτητα είναι η τάση των μαζών να έλκει η μία την άλλη και κατά συνέπεια να επιταχύνει η μια προς την άλλη. Η βαρύτητα δρα ανάμεσα σε δύο χωριστά σώματα χωρίς τίποτα να μεσολαβεί και χωρίς καμία καθυστέρηση. Η βαρυτική δύναμη που ασκείται από ένα σώμα  $j$  σε ένα σώμα  $i$  και δίνεται από τον τύπο

$$F_{ij} = G \frac{M_{aj}M_{pi}}{R^2}, \text{ όπου } G \text{ η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας, } M_{aj} \text{ είναι η ενεργός βαρυτική μάζα}$$

(το βαρυτικό πεδίο ενός αντικείμενου με χαμηλή ενεργό βαρυτική μάζα είναι αδύναμο σε σχέση με αυτό με τη μεγαλύτερη) και  $M_{pi}$  είναι η παθητική βαρυτική μάζα (η βαρυτική δύναμη που δέχεται ένα αντικείμενο με χαμηλή παθητική βαρυτική μάζα είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή που δέχεται το σώμα με μεγαλύτερη παθητική βαρυτική μάζα) και  $R$  η απόστασή τους. Η επιτάχυνση  $a$  που αναπτύσσει ένα σώμα μάζας αδρανειακής  $M_{ii}$  (μετρά την αντίσταση ενός σώματος στο να αλλάξει την κατάσταση της κίνησης του όταν σε αυτό ασκείται κάποια δύναμη, όσο μεγαλύτερη τόσο πιο αργά αυτό κινείται) όταν σε αυτό ασκείται μία βαρυτική δύναμη  $F_{ij}$ , δίνεται από τον τύπο  $a_i = \frac{F_{ij}}{M_{ii}}$ .

### Αλγόριθμος βαρυτικής αναζήτησης (GSA)

Στον αλγόριθμο αυτό οι πράκτορες θεωρούνται αντικείμενα και η απόδοσή τους εκτιμάται από τις μάζες τους. Όλα αυτά τα αντικείμενα έλκονται μεταξύ τους με τη βαρυτική έλξη η οποία προκαλεί μία κίνηση όλων των αντικειμένων προς αυτά που έχουν μεγαλύτερη μάζα. Οι μεγάλες μάζες, που αποτελούν καλές λύσεις, κινούνται πιο αργά από τις μικρότερες, αυτό εγγυάται την ικανότητα εκμετάλλευσης του αλγορίθμου. Στον αλγόριθμο βαρυτικής αναζήτησης (GSA), κάθε μάζα (πράκτορας) έχει τέσσερα χαρακτηριστικά: θέση, αδρανειακή μάζα, ενεργό βαρυτική μάζα, και παθητική βαρυτική μάζα. Η θέση της μάζας αντιστοιχεί σε μια λύση του προβλήματος, και οι βαρυτικές και αδρανειακές μάζες της προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας μια αντικειμενική συνάρτηση. Δηλαδή κάθε μάζα αντιπροσωπεύει μία λύση και ο αλγόριθμος πλοηγείται από την κατάλληλη προσαρμογή των βαρυτικών και αδρανειακών μαζών. Με την πάροδο του χρόνου,

αναμένουμε οι μάζες να προσελκύονται από τη βαρύτερη μάζα η οποία και θα αποτελεί μια βέλτιστη λύση στο χώρο αναζήτησης .

Ο αλγόριθμος βαρυτικής αναζήτησης θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ένα απομονωμένο σύστημα των μαζών οι οποίες υπακούν το νόμο της βαρύτητας και το νόμο της κίνησης (η τρέχουσα ταχύτητα της κάθε μάζας είναι ίση με το άθροισμα του κλάσματος της προηγούμενης ταχύτητας της και της διακύμανσης της ταχύτητας. Διακύμανση της ταχύτητας ή επιτάχυνση της μάζας είναι ίση με τη δύναμη που ασκείται στο σύστημα διαιρούμενη με τη μάζα αδρανείας).

Θεωρούμε τώρα ένα σύστημα με  $N$  πράκτορες (μάζες). Η θέση του  $i$  πράκτορα δίνεται από τη σχέση  $X_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n)$  με  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $d$  είναι η διάσταση.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η βαρυτική έλξη από τον πράκτορα  $j$  στον πράκτορα  $i$ , σε καθορισμένη

$$\text{χρονική στιγμή } t, \quad F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t))$$

όπου  $M_{aj}$  η ενεργός βαρυτική δύναμη του πράκτορα  $j$ ,  $M_{pi}$  η παθητική βαρυτική δύναμη του πράκτορα  $i$ ,  $\varepsilon$  μία μικρή σταθερά και  $R_{ij} = \|X_i(t), X_j(t)\|_2$  η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των πρακτόρων  $j$  και  $i$ .

Για να δώσουμε στοχαστικό χαρακτήρα στον αλγόριθμο μας υποθέτουμε ότι η συνολική δύναμη που ασκείται σε έναν πράκτορα  $i$ , σε μία διάσταση  $d$  είναι ένα τυχαία σταθμισμένο άθροισμα των  $d$ -οστών στοιχείων των δυνάμεων που ασκούνται από άλλους παράγοντες  $F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_j F_{ij}^d(t)$ , όπου  $rand_j \in [0, 1]$ .

Από το νόμο της κίνησης, η επιτάχυνση του πράκτορα  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ , στη διάσταση  $d$  είναι:

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)}$$

Επιπλέον, η επόμενη ταχύτητα ενός παράγοντα θεωρείται ως ένα κλάσμα της τρέχουσας ταχύτητας προστιθέμενο στην επιτάχυνση του. Ως εκ τούτου, η θέση του και η ταχύτητα του μπορεί να υπολογιστεί ως εξής

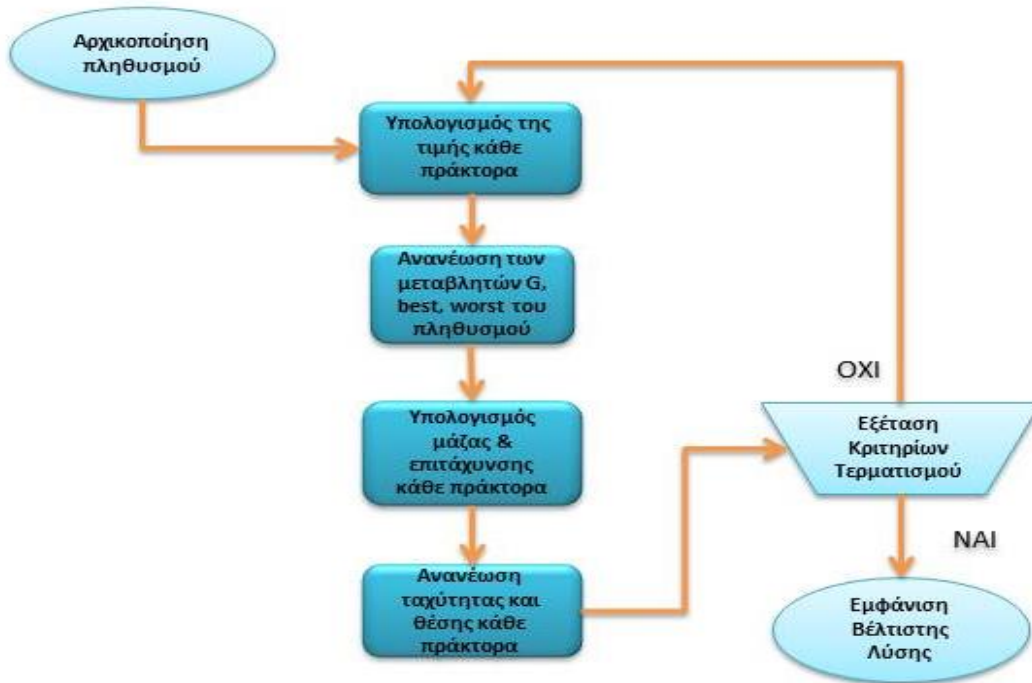
$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \text{ και } x_i^d(t+1) = v_i^d(t+1) + x_i^d(t), \text{ } rand_j \in [0, 1].$$

Υποθέτοντας την ισότητα της βαρυτικής μάζας με τη μάζα αδράνειας, οι τιμές των μαζών υπολογίζονται  $M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)}$ , όπου  $m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)}$ , όπου  $fit_i(t)$  η τιμή καταλληλότητας του πράκτορα  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$  και για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης ισχύουν:

$$best(t) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t)$$

Στο παρακάτω **σχήμα 2.6.1** φαίνονται τα βήματα του αλγορίθμου βαρυτικής αναζήτησης (GSA)



**Σχήμα 2.6.1:** Διάγραμμα ροής GSA



# 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Μέθοδος Φασματικής Ομαδοποίησης με χρήση πίνακα προβολών για την Εφαρμογή Ελεγχόμενης Νησιδοποίησης

## 3.1 Εισαγωγή

Η φασματική ομαδοποίηση χρησιμοποιείται προκειμένου να βρεθεί η κατάλληλη λύση νησιδοποίησης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία μιας μεγάλου εύρους διακοπή ρεύματος (blackout), από ανεξέλεγκτες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται σε αυτό τον αλγόριθμο είναι η ελάχιστη διαταραχή ροής ισχύος (power-flow disruption) και ο μόνος περιορισμός που εφαρμόζεται έχει να κάνει με το συγχρονισμό των γεννητριών.

Όσον αφορά την αντικειμενική συνάρτηση που θα χρησιμοποιηθεί οι επιλογές είναι δύο:

Η ελάχιστη διαταραχή ροής ισχύος (minimal power-flow disruption), που είναι στην ουσία το αριθμητικό άθροισμα της ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή που αποσυνδέεται, εκφράζεται από τον τύπο:

$$\min_{V_1, V_2 \subset V} \left( \sum_{i \in V_1, j \in V_2} |P_{ij}| \right)$$

και η ελάχιστη ανισορροπία ισχύος (minimal power imbalance), που είναι στην ουσία το αλγεβρικό άθροισμα της ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή που αποσυνδέεται (λαμβάνοντας υπόψη την κατεύθυνση της ροής ισχύος) και εκφράζεται από τον τύπο

$$\min_{V_1, V_2 \subset V} \left( \left| \sum_{i \in V_1, j \in V_2} P_{ij} \right| \right)$$

όπου  $P_{ij}$  η τιμή της ενεργού ισχύος στη γραμμή μεταφοράς μεταξύ του κόμβου  $i$  και  $j$ .

Η χρήση της ελάχιστης διαταραχής ροής ισχύος (minimal power-flow disruption) ως αντικειμενική συνάρτηση δημιουργεί νησίδες με ελάχιστη τροποποίηση στο μοτίβο ροής ισχύος, σε σχέση με την κατάσταση προ διαταραχής. Αυτή η ιδιότητα της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιώνει την μεταβατική ευστάθεια των νησιών, μειώνει την πιθανότητα υπερφόρτωσης των γραμμών μεταφοράς εντός της νησίδας, και διευκολύνει την ενδεχόμενη επανένταξη της νησίδας στο υπόλοιπο σύστημα.

Η χρήση της ελάχιστης ανισορροπία ισχύος (minimal power imbalance) ως αντικειμενική συνάρτηση δημιουργεί νησιά με παρόμοιο επίπεδο φορτίου και παραγωγής ενεργού ισχύος, δηλαδή, μια καλή ισορροπία φορτίου-παραγωγής. Αυτή η ιδιότητα της αντικειμενικής συνάρτησης ελαχιστοποιεί τον όγκο φορτίου που πρέπει να απορριφθεί μετά από διάσπαση του συστήματος. Στον αλγόριθμο που ακολουθεί επιλέγεται ως αντικειμενική συνάρτηση η ελάχιστη διαταραχή ροής ισχύος (minimal power-flow disruption) διότι, για να διασφαλιστεί η σταθερότητα μετά το διαχωρισμό ενός δικτύου σε νησίδες, πρωταρχικό μέλημα πρέπει να είναι η μεταβατική ευστάθεια και όχι η εξισορρόπηση φορτίου-παραγωγής. Ένα νησί με αρνητικό περιθώριο σταθερότητας και καλή ισορροπία του φορτίου-παραγωγής θα καταρρεύσει ενώ ένα νησί με θετικό περιθώριο σταθερότητας και κακή ισορροπία του φορτίου-παραγωγής μπορεί να σταθεροποιηθεί μέσω της απόρριψης φορτίου.

Τα βήματα του αλγορίθμου (όπως αναπαρίστανται και στο **σχήμα 3.1.1**) είναι τα εξής:

**1.** Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την εύρεση των συναφών ομάδων των γεννητριών (coherent groups). Οι ανεξέλεγκτες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις μπορούν να προκαλέσουν αποσυγχρονισμό των γεννητριών, στην περίπτωση αυτή για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα των νησιών θα πρέπει αυτά να περιλαμβάνουν συγχρονισμένες γεννήτριες μεταξύ τους. Με την εύρεση των συναφών ομάδων των γεννητριών ο αλγόριθμος καθορίζει ποιες γεννήτριες πρέπει να ανήκουν στην ίδια νησίδα και ποιες όχι. Στην εφαρμογή του αλγορίθμου το βήμα αυτό παραλείπεται και οι ομάδες των γεννητριών (coherent groups) για κάθε δίκτυο θεωρούνται δεδομένες σύμφωνα με την αναφορά [2].

**2.** Με τη χρήση των δεδομένων ροής ισχύος για κάθε δίκτυο, κατασκευάζεται ο στατικός γράφος  $G_S$  ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου και τα βάρη των ακμών του καθορίζονται ως η απόλυτη τιμή της ανταλλαγής ενεργού ισχύος μεταξύ των κόμβων  $i$  και  $j$ . Οι κόμβοι στη συνέχεια ομαδοποιούνται με την εφαρμογή μιας περιοριστικής φασματικής ομαδοποίησης όπως θα αναλυθεί παρακάτω και βρίσκεται η λύση της νησιδοποίησης που εξασφαλίζει την ελάχιστη διαταραχή ροής ισχύος. Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να διαχωρίσει μέχρι δύο νησιά, οπότε στην περίπτωση που θέλουμε τη δημιουργία τριών νησιών, αν δηλαδή έχουμε τρεις συναφείς ομάδες γεννητριών (coherent generator groups), αναγκαστικά εφαρμόζεται η μέθοδος αναδρομικής διχοτόμησης (recursive bisection) έτσι ώστε σταδιακά να καθοριστούν τα τρία νησιά. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη συγχώνευση των συναφών ομάδων των γεννητριών έτσι ώστε να δημιουργηθούν δύο ομάδες και στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αλγόριθμος έτσι ώστε να προκύψουν δύο νησίδες. Απομονώνεται από το δίκτυο η νησίδα που περιλαμβάνει την αυτούσια συναφή ομάδα γεννητριών, αφαιρούνται οι κόμβοι και οι γραμμές του δικτύου που ανήκουν σε αυτή τη νησίδα και επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος για το υπόλοιπο κομμάτι του δικτύου με συναφείς τώρα ομάδες αυτές που είχαν συγχωνευτεί προηγουμένως. Η αναδρομική αυτή διχοτόμηση επαναλαμβάνεται ανάλογα με τον αριθμό των συναφών ομάδων γεννητριών που διατίθενται.



Πιο αναλυτικά τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής:

i. Κατασκευάζεται ο στατικός γράφος  $G_S$  ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου και τα βάρη των ακμών του καθορίζονται ως  $(P_{ij} + P_{ji})/2$ , ο πίνακας γειτνίασης  $W = [w_{ij}]$ , όπου

$$w_{ij} = w_{ji} = \begin{cases} \frac{|P_{ij}| + |P_{ji}|}{2} & \text{αν } e_{ij} \in E \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

ο διαγώνιος πίνακας βαθμών  $D = [d_i]$  και υπολογίζεται και ο μη κανονικοποιημένος πίνακας Laplace  $L_S = D - W$ .

ii. Για να εφαρμοστεί η φασματική ομαδοποίηση με βάση τον περιορισμό του συγχρονισμού των γεννητριών (coherent groups) θα κατασκευάσουμε τον πίνακα προβολών (projection matrix)  $U$ , με τη χρήση του οποίου μεταβάλλεται το υποσύνολο των λύσεων. Ο πίνακας προβολών στην ουσία εκφράζει το ποιες γεννήτριες πρέπει να είναι στην ίδια ομάδα και ποιες όχι, με βάση πάντα τις ομάδες συγχρονισμένων γεννητριών. Ο πίνακας  $U$  ορίζεται ως εξής:

$$U = \begin{pmatrix} 1_{11} & a_{12} & v_{1 \times (n-m)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1_{n1} & a_{n2} & v_{n \times (n-m)} \end{pmatrix}$$

έχει διαστάσεις  $n \times (n - m + 2)$  πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το υποσύνολο των λύσεων προβάλλεται από ένα  $n$ -διάστατο χώρο σε έναν χώρο διαστάσεων  $n - m + 2$ , όπου  $n$  ο αριθμός των κόμβων του δικτύου και  $m = m_1 + m_2$  όπου  $m_1$ : ο αριθμός των κόμβων της μιας ομάδας γεννητριών και  $m_2$ : ο αριθμός των κόμβων του δεύτερου.

Όσον αφορά την κατασκευή του πίνακα πραγματοποιούνται τα εξής:

- ✓ Η πρώτη στήλη του πίνακα είναι ένα κάθετο διάνυσμα μήκους  $n$ , το μήκος του δηλαδή είναι στην ουσία ο αριθμός των κόμβων του δικτύου
- ✓ Η δεύτερη στήλη του πίνακα αποτελείται από τα στοιχεία  $a_{i2}$  (για  $i = 1, \dots, n$ ), τα οποία στοιχεία ισούνται με 1 αν ο κόμβος  $i$  είναι κόμβος γεννήτριας και ανήκει στη πρώτη ομάδα γεννητριών, με -1 αν ο κόμβος  $i$  είναι κόμβος γεννήτριας και ανήκει στη δεύτερη ομάδα γεννητριών, διαφορετικά ισούται με 0.
- ✓ Η τρίτη στήλη του projection matrix αποτελείται στην ουσία από οριζόντια διανύσματα  $v_{i \times (n-m)}$  μήκους  $n - m$ . Τα διανύσματα αυτά αποτελούνται από μηδενικά αν ο κόμβος  $i$  είναι κόμβος γεννήτριας και ανήκει σε μία από τις δύο συναφείς ομάδες γεννητριών, διαφορετικά το κάθε διάνυσμα  $v_{i \times (n-m)}$  αποτελεί την  $k$  γραμμή του μοναδιαίου πίνακα με διαστάσεις  $(n - m) \times (n - m)$  όπου ο μετρητής  $k$ , του οποίου αρχικά η τιμή είναι μοναδιαία, αυξάνεται κατά μία μονάδα κάθε φορά που ο κόμβος  $i$  δεν είναι κόμβος γεννήτριας και δεν ανήκει σε κάποια συναφή ομάδα γεννητριών.

- iii. Αν ο αριθμός των συναφών ομάδων των γεννητριών που διατίθενται για κάθε δίκτυο είναι  $\beta$ , συγχωνεύονται έτσι ώστε να είναι μια αυτούσια και οι υπόλοιπες μαζί και υπολογίζονται τα δύο ιδιοδιανύσματα ( $\vartheta_1$  και  $\vartheta_2$ ) που αντιστοιχούν στις δύο μικρότερες ιδιοτιμές, που ικανοποιούν τη γενικευμένη εξίσωση  $U^T L_S U * \vartheta = \lambda * U^T U * \vartheta$ , όπου  $\vartheta$  το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή  $\lambda$ .
- iv. Κατασκευάζεται ο πίνακας  $J \in \mathcal{R}^{n \times 2}$  που έχει ως στήλες τα διανύσματα  $U\vartheta_1$  και  $U\vartheta_2$ . Θεωρούμε το δείκτη  $y_i \in \mathcal{R}^2$ , ο οποίος δείχνει τις σειρές του πίνακα  $J$ .
- v. Με τη χρήση του αλγορίθμου kmeans, ομαδοποιούνται οι κόμβοι  $y_i \in \mathcal{R}^2$  στις ομάδες  $V_1$  και  $V_2$ .
- vi. Στην περίπτωση που ο αριθμός των συναφών ομάδων είναι πάνω από δύο, απομονώνεται η νησίδα που αντιστοιχεί στην αυτούσια συναφή ομάδα (και όχι στις συγχωνευμένες), αφαιρούνται οι κόμβοι και οι κλάδοι της από το δίκτυο και πραγματοποιούνται και πάλι τα βήματα  $i - v$  με την επόμενη αυτούσια ομάδα και αυτές που απομένουν να είναι συγχωνευμένες σε μία ομάδα. Κάθε φορά αφαιρείτε από το σύνολο των συγχωνευμένων ομάδων, μία αυτούσια ομάδα και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία έως ότου να εξεταστούν όλες οι συναφείς ομάδες. Η τελική λύση είναι το σύνολο των νησίδων που έχουν αφαιρεθεί σταδιακά και αντιστοιχούν σε αυτούσιες συναφείς ομάδες γεννητριών.

Κλείνοντας το εισαγωγικό μέρος αναφέρεται ότι αφού εφαρμοστεί ο αλγόριθμος σε κάθε επιμέρους δίκτυο, θα αξιολογηθεί η ποιότητα της προτεινόμενης λύσης νησιδοποίησης (cutset), έτσι ώστε να αξιολογηθεί και η απόδοση του αλγορίθμου. Αυτό μπορεί να γίνει βρίσκοντας την αναλογία ανάμεσα στα μεγέθη **'cut'** και **'volume'** του κάθε νησιού.

Το μέγεθος **'cut'** ενός νησιού το οποίο αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο κόμβων  $V_k$ , είναι το άθροισμα των βαρών των κλάδων μεταξύ των κόμβων που ανήκουν στο σύνολο  $V_k$  και αυτών που δεν ανήκουν στο σύνολο  $V_k$ . Μιλάμε για τους κλάδους δηλαδή που ενώνουν το σύνολο  $V_k$  με το συμπληρωματικό του  $\overline{V_k}$  και ορίζεται από τη σχέση

$$cut(V_k, \overline{V_k}) = \sum_{v_i \in V_k, v_j \in \overline{V_k}} w_{ij}$$

και μετρά τη συνδεσιμότητα ενός νησιού και στην προκειμένη περίπτωση ανταποκρίνεται στη διαταραχή της ροής ισχύος αν το νησί  $V_k$  είναι αποσυνδεδεμένο από το υπόλοιπο σύστημα.

Το μέγεθος **'volume'** ενός νησιού με σύνολο κόμβων  $V_k$ , είναι το άθροισμα των διαγώνιων στοιχείων (weighted degrees) του διαγώνιου πίνακα βαθμών ( $D$ ):

$$vol(V_k) = \sum_{v_i \in V_k} d_i$$

και αναπαριστά την εσωτερική ροή ισχύος ενός νησιού μαζί με τη ροή ισχύος στα όρια του. Μπορεί τώρα να καθοριστεί η ποιότητα ενός νησιού από το μέγεθος  $\phi_k$  που ορίζεται από τον τύπο:

$$\phi_k = 1 - \frac{cut(V_k, \overline{V_k})}{vol(V_k)}$$

Η ποσότητα  $\phi_k$  κυμαίνεται από το μηδέν έως το ένα και στην ουσία μετρά τη συνδεσιμότητα ενός νησιού σχετικά με το μέγεθος του. Όσον αφορά την ομαδοποίηση, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος  $\phi_k$  ενός νησιού τόσο καλύτερο αυτό το νησί θεωρείται, καθώς υψηλή τιμή του  $\phi_k$  για ένα νησί δείχνει χαμηλή διαταραχή ροής ισχύος και μεγάλη εσωτερική ροή ισχύος.

Η ποιότητα μιας λύσης νησιδοποίησης ορίζεται ως η χειρότερη ποιότητα των νησιών που δημιουργεί δηλαδή

$$\min_{k=1,2,\dots,r} (\phi(V_k))$$

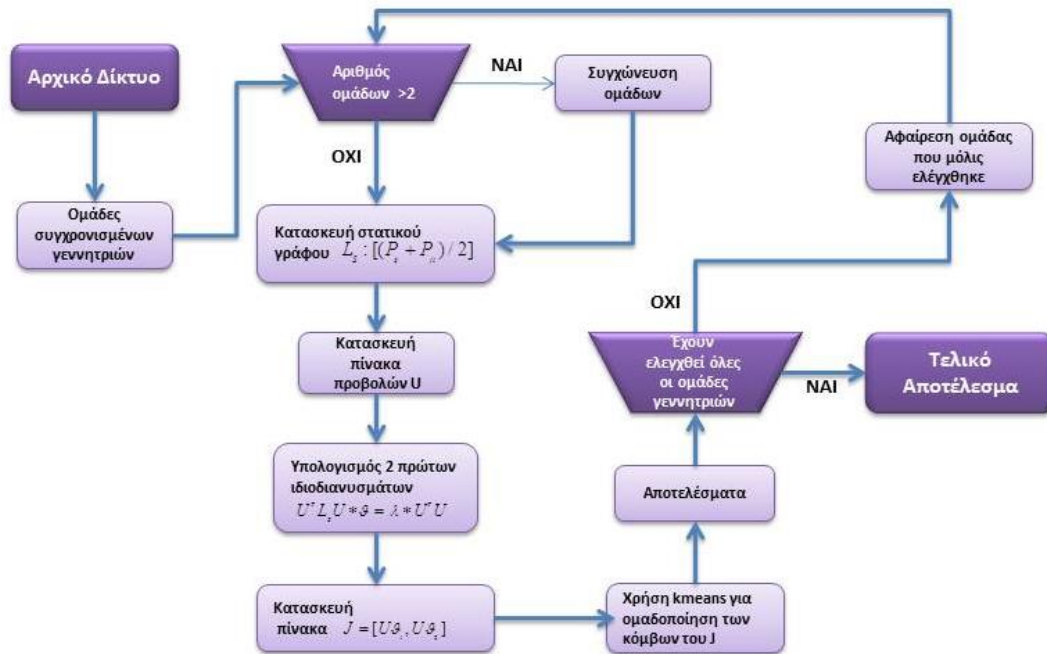
Οπότε η αντικειμενική συνάρτηση της νησιδοποίησης θα είναι:

$$\max_{V_1, \dots, V_r} \min_{k=1,2,\dots,r} (\phi(V_k))$$

δηλαδή να βρεθεί ο  $r$  διαμελισμός που μεγιστοποιεί τη χειρότερη ποιότητα ανάμεσα στα νησιά του. Επιπλέον κάθε νησί πρέπει να περιέχει μόνο συγχρονισμένες γεννήτριες (coherent generators)  $V_{GNi} \subset V_i$ .

Ο συνδυασμός των δύο τελευταίων σχέσεων  $\max_{V_1, \dots, V_r} \min_{k=1,2,\dots,r} (\phi(V_k))$  και  $V_{GNi} \subset V_i$  μειώνει την πιθανότητα της υπερφόρτωσης των ζυγών στα νησιά που προκύπτουν και αυξάνει την πιθανότητα του γεγονότος οι γεννήτριες σε κάθε νησί να είναι συγχρονισμένες.

Το πρόβλημα αυτό σχετίζεται με τις Λαπλασιανές ιδιοτιμές που αποτελούν στην ουσία βασικό παράγοντα των συνδέσεων μεταξύ των νησιών στη φασματική ομαδοποίηση αλλά και στην ελαχιστοποίηση της ροής ενεργού ισχύος.



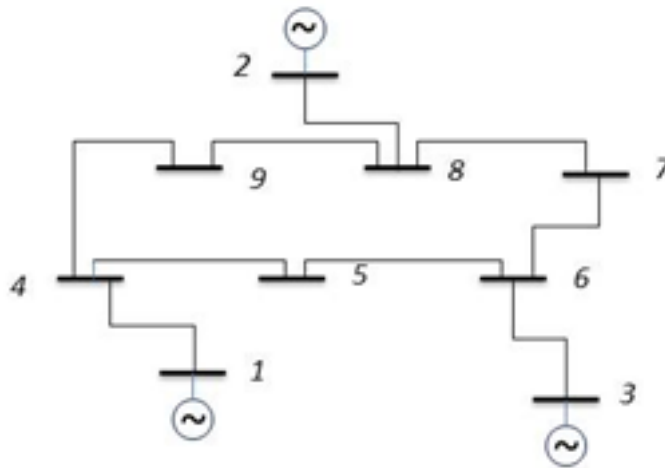
**Σχήμα 3.1.1:** Διάγραμμα ροής Φασματικής Ομαδοποίησης με χρήση πίνακα προβολών

Ο αλγόριθμος αυτός θα εφαρμοστεί, όπως παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες πάνω στα ακόλουθα τρία πρότυπα δίκτυα της IEEE:

- 1) δίκτυο 9 ζυγών το οποίο αποτελείται από 3 γεννήτριες, 6 φορτία και 9 γραμμές μεταφοράς
- 2) δίκτυο 39 ζυγών το οποίο αποτελείται από 10 γεννήτριες, 29 φορτία και 46 γραμμές μεταφοράς
- 3) δίκτυο 118 ζυγών το οποίο αποτελείται από 54 γεννήτριες, 65 φορτία και 186 γραμμές μεταφοράς

### 3.2 Δίκτυο 9 ζυγών

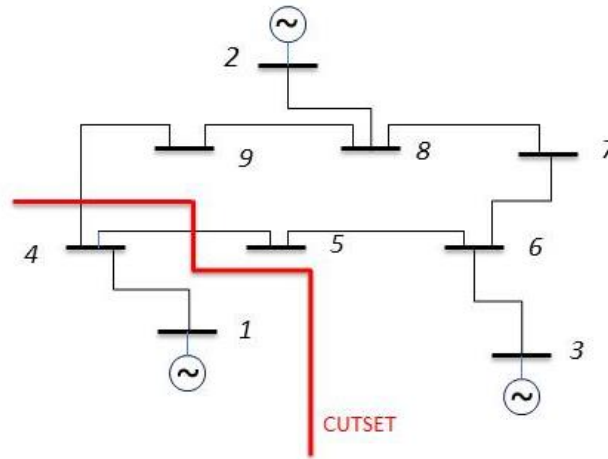
Το δίκτυο αυτό των 9 ζυγών φαίνεται στο **σχήμα 3.2.1**, διαθέτει 3 ζυγούς γεννητριών, 6 ζυγούς φορτίων 9 γραμμές μεταφοράς και γνωρίζουμε ήδη τις ομάδες συγχρονισμένων γεννητριών που αποτελούνται από τους ζυγούς γεννητριών {1} και {2,3}.



**Σχήμα 3.2.1:** Τοπολογία δικτύου 9 ζυγών

Μέσω του matpower εισάγονται τα στοιχεία του δικτύου αυτού στον αλγόριθμο και μετά ακολουθούν τα βήματα που αναλύθηκαν παραπάνω:

- i.* Κατασκευάζεται ο στατικός γράφος  $GS$  ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου και τα βάρη των ακμών του καθορίζονται ως  $(P_{ij} + P_{ji})/2$ .
- ii.* Κατασκευάζεται ο πίνακας προβολών (projection matrix)  $U$  με βάση τις δεδομένες ομάδες συγχρονισμένων γεννητριών (coherent groups) με τον τρόπο που αναλύθηκε στην εισαγωγή.
- iii.* Υπολογίζονται τα πρώτα δύο ιδιοδιανύσματα  $\vartheta_1$  και  $\vartheta_2$  που αντιστοιχούν στις δύο μικρότερες ιδιοτιμές, που ικανοποιούν τη γενικευμένη εξίσωση  $U^T L_S U * \vartheta = \lambda * U^T U * \vartheta$ .
- iv.* Κατασκευάζεται ο πίνακας  $J \in \mathcal{R}^{n \times 2}$  που έχει ως στήλες τα διανύσματα  $U\vartheta_1$  και  $U\vartheta_2$ .
- v.* Με τη χρήση του αλγορίθμου kmeans, ομαδοποιούνται οι κόμβοι  $y_i \in \mathcal{R}^2$  στις ομάδες  $V_1 = \{1,4\}$  και  $V_2 = \{2,3,5,6,7,8,9\}$  οι οποίες φαίνονται στο **σχήμα 3.2.2**.



**Σχήμα 3.2.2:** Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση για το δίκτυο 9 ζυγών με χρήση του πίνακα προβολών

Στον παρακάτω **πίνακα 3.2.1** φαίνονται οι γραμμές του δικτύου που θα ανοίξουν (cutset), προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ελεγχόμενη νησιδοποίηση, και η ροή ισχύος που κάθε μία από αυτές τις γραμμές έχει. Στον **πίνακα 3.2.2** παρουσιάζονται τα νησιά που δημιουργούνται με τους κόμβους που περιέχει το καθένα νησί και οι τιμές της παραγωγής και της κατανάλωσης ενεργού ισχύος  $P(MW)$ , σε κάθε νησί.

**Πίνακας 3.2.1:** Αποσυνδεδεμένες γραμμές για το δίκτυο των 9 ζυγών

A/A Αποσυνδεδεμένης Γραμμής (cutset)	Κόμβος $i$	Κόμβος $j$	Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)
1	4	5	30.64148
2	9	4	41.09327

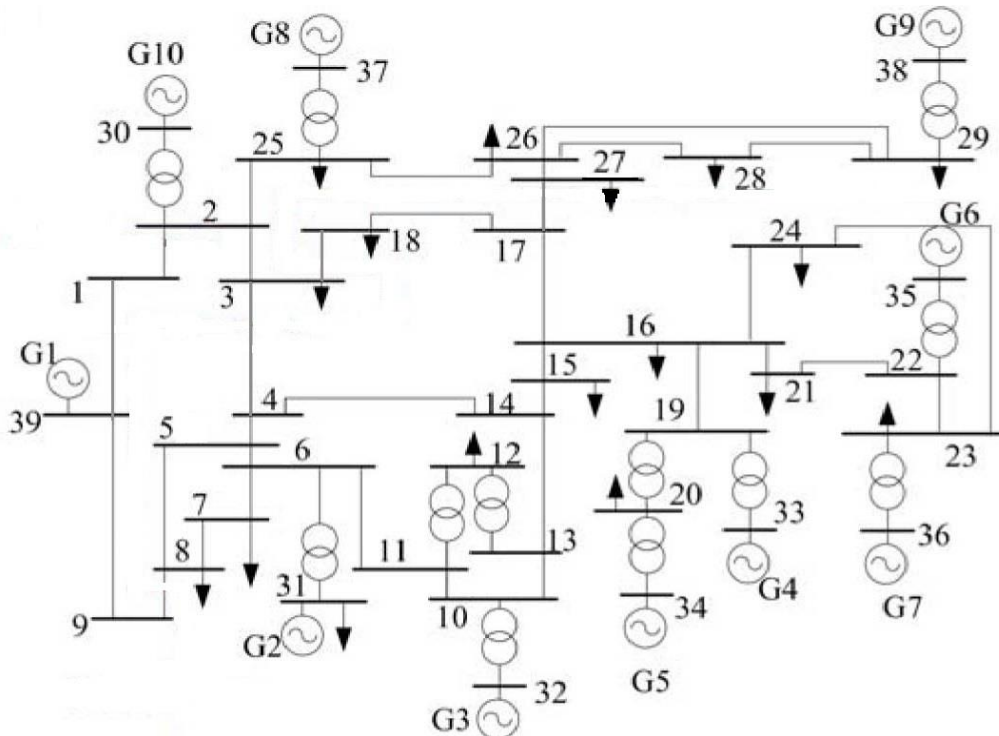
**Πίνακας 3.2.2:** Στοιχεία Νησίδων για το δίκτυο 9 ζυγών

Νησίδες	Παραγωγή Ενεργού Ισχύος $P(MW)$	Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος $P(MW)$	Απόλυτη Τιμή Διαφοράς Παραγωγής & Κατανάλωσης
$V_1 = \{1,4\}$	71.95	0	71.95
$V_2 = \{2,3,5,6,7,8,9\}$	248	315	67



### 3.3 Δίκτυο 39 ζυγών

Το δίκτυο αυτό των 39 ζυγών φαίνεται στο **σχήμα 3.3.1**, διαθέτει 10 ζυγούς γεννητριών, 29 ζυγούς φορτίων και 46 γραμμές μεταφοράς. Τα coherent groups σε αυτό το δίκτυο είναι τρία και συντελούνται από τους εξής ζυγούς γεννητριών το καθένα {39} {37,38,30} και {31,32,33,34,35,36}.



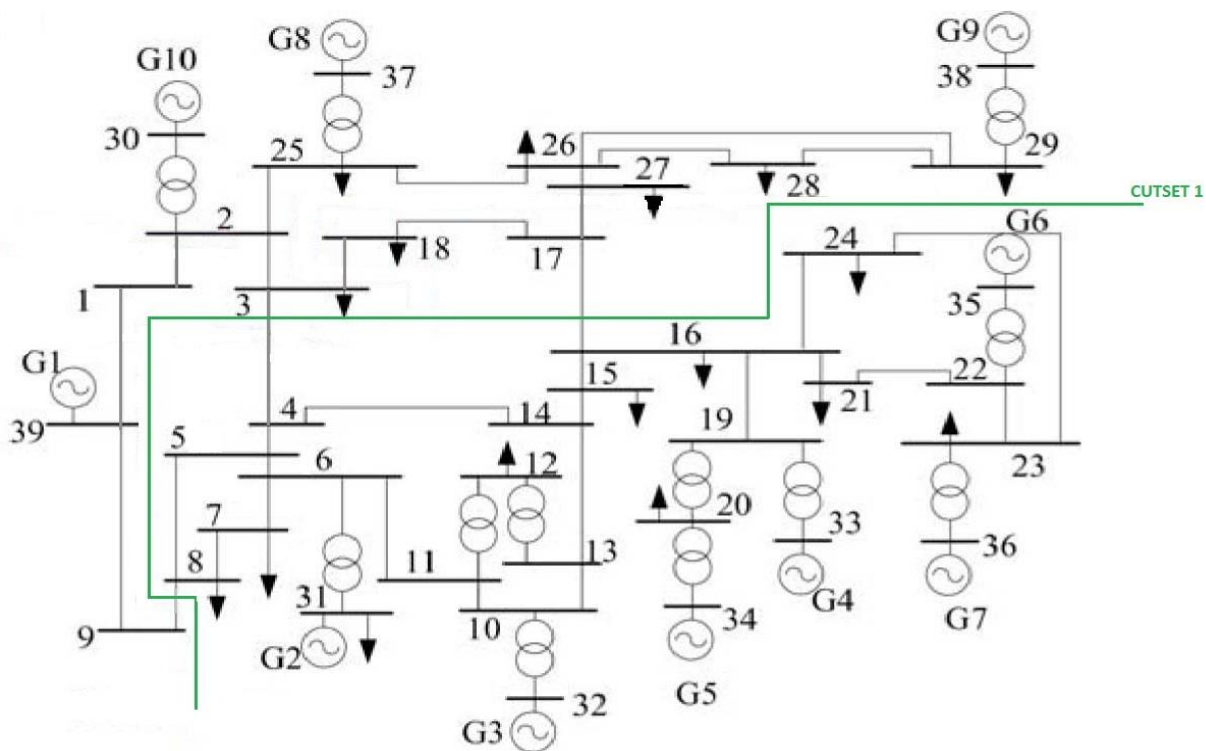
**Σχήμα 3.3.1:** Τοπολογία δικτύου 39 ζυγών

Όπως αναφέρθηκε ο αλγόριθμος αυτός έχει τη δυνατότητα να χωρίσει το διατιθέμενο δίκτυο σε έως και δύο νησιά. Εδώ έχουμε τρεις συναφείς ομάδες γεννητριών επομένως ο επιθυμητός αριθμός νησιών θα είναι τρία. Για να επιτευχθεί αυτό, συγχωνεύονται οι δύο ομάδες γεννητριών, από τις τρεις που διατίθενται, οπότε προκύπτουν τα εξής coherent groups {31,32,33,34,35,36} και {37,38,30,39}. Εν συνεχεία μέσω του matpower εισάγονται τα στοιχεία του δικτύου αυτού, στον αλγόριθμο και μετά ακολουθούν τα εξής ίδια βήματα που εκτελέστηκαν και στο προηγούμενο δίκτυο:

- i. Κατασκευάζεται ο στατικός γράφος  $G_s$  ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου.



- ii. Για να εφαρμοστεί η φασματική ομαδοποίηση με βάση τον περιορισμό του συγχρονισμού των γεννητριών (coherent groups) θα κατασκευάζεται ο πίνακας προβολών (projection matrix)  $U$ , με τη χρήση του οποίου μεταβάλλεται το υποσύνολο των λύσεων.
- iii. Υπολογίζονται τα πρώτα δύο ιδιοδιανύσματα  $\vartheta_1$  και  $\vartheta_2$  που αντιστοιχούν στις δύο μικρότερες ιδιοτιμές, που ικανοποιούν τη γενικευμένη εξίσωση  $U^T L_S U * \vartheta = \lambda * U^T U * \vartheta$ .
- iv. Κατασκευάζεται ο πίνακας  $J \in \mathcal{R}^{n \times 2}$  που έχει ως στήλες τα διανύσματα  $U\vartheta_1$  και  $U\vartheta_2$ .
- v. Με τη χρήση του αλγορίθμου kmeans, ομαδοποιούνται οι κόμβοι  $y_i \in \mathcal{R}^2$  στις ομάδες  $V_1 = \{4,5,6,7,8,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,31,32,33,34,35,36\}$  και  $V_2 = \{1,2,3,9,25,26,27,28,29,30,37,38,39\}$  οι οποίες φαίνονται στο **σχήμα 3.3.2**.



**Σχήμα 3.3.2:** Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση για το δίκτυο 39 ζυγών μετά την 1<sup>η</sup> εφαρμογή του αλγορίθμου

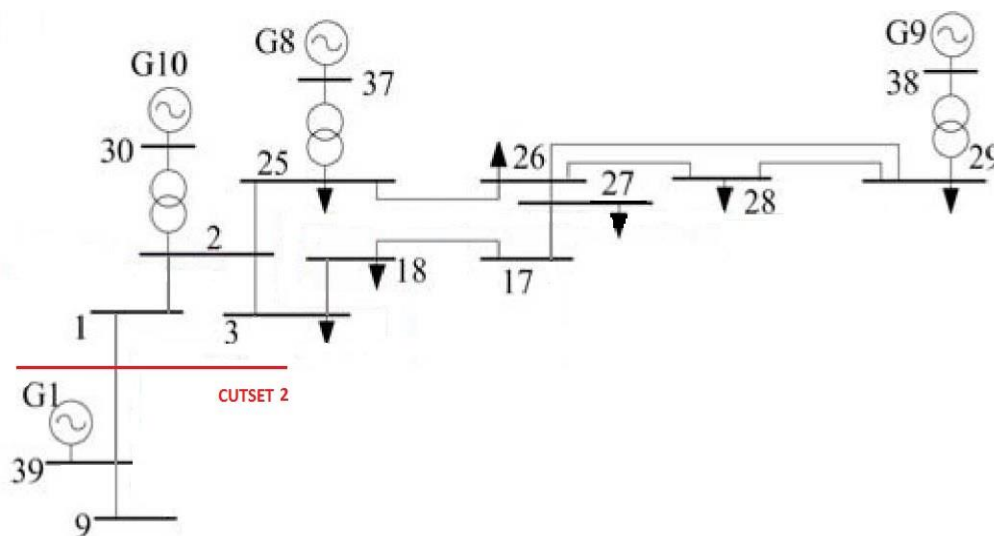
Στον παρακάτω **πίνακα 3.3.1** φαίνονται οι γραμμές του δικτύου που θα αποσυνδεθούν (cutset 1), προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ελεγχόμενη νησιδοποίηση, και η ροή ισχύος που κάθε μία από αυτές τις γραμμές έχει.

**Πίνακας 3.3.1:** Αποσυνδεδεμένες γραμμές για το δίκτυο των 39 ζυγών(1<sup>η</sup> επανάληψη)

Α/Α Αποσυνδεδεμένης Γραμμής (cutset)	Κόμβος $i$	Κόμβος $j$	Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)
1	3	4	37.23575
2	3	18	40.76873
3	8	9	34.64554
4	17	27	24.63264

Στο σημείο αυτό θα εφαρμοστεί η μέθοδος αναδρομικής διχοτόμησης (recursive bisection). Θα εκτελεστεί και πάλι ο αλγόριθμος αφού πρώτα αφαιρεθούν από το δίκτυο προς εξέταση, οι κόμβοι που ανήκουν στο νησί που αντιστοιχεί στο σωστή ομάδα συγχρονισμένων γεννητριών, εδώ δηλαδή θα αφαιρεθεί ολόκληρο το νησί  $V_1$  που αντιστοιχεί στην ομάδα συγχρονισμένων γεννητριών {31,32,33,34,35,36}. Οι ομάδες συγχρονισμένων γεννητριών που απομένουν είναι οι ομάδες των κόμβων {37,38,30} και {39}, εκτελούνται και πάλι τα βήματα  $i - v$  με τον ίδιο τρόπο και την ίδια σειρά που περιγράφονται παραπάνω.

Τα νησιά που θα προκύψουν μετά τη δεύτερη επανάληψη είναι οι ομάδες  $V_1 = \{9,39\}$  και  $V_2 = \{1,2,3,25,30,37,26,28,27,29,38\}$  οι οποίες φαίνονται στο **σχήμα 3.3.3**.



**Σχήμα 3.3.3:** Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση για το δίκτυο 39 ζυγών μετά την 1<sup>η</sup> εφαρμογή του αλγορίθμου

Στον παρακάτω **πίνακα 3.3.2** φαίνονται οι γραμμές του δικτύου που θα αποσυνδεθούν στην 2<sup>η</sup> επανάληψη (cutset 2), προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ελεγχόμενη νησιδοποίηση, και η ροή ισχύος που κάθε μία από αυτές τις γραμμές έχει

**Πίνακας 3.3.2:** Αποσυνδεδεμένες γραμμές για το δίκτυο των 39 ζυγών (2<sup>η</sup> επανάληψη)

<b>A/A Αποσυνδεδεμένης Γραμμής (cutset)</b>	<b>Κόμβος i</b>	<b>Κόμβος j</b>	<b>Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)</b>
<b>1</b>	1	39	76.06695

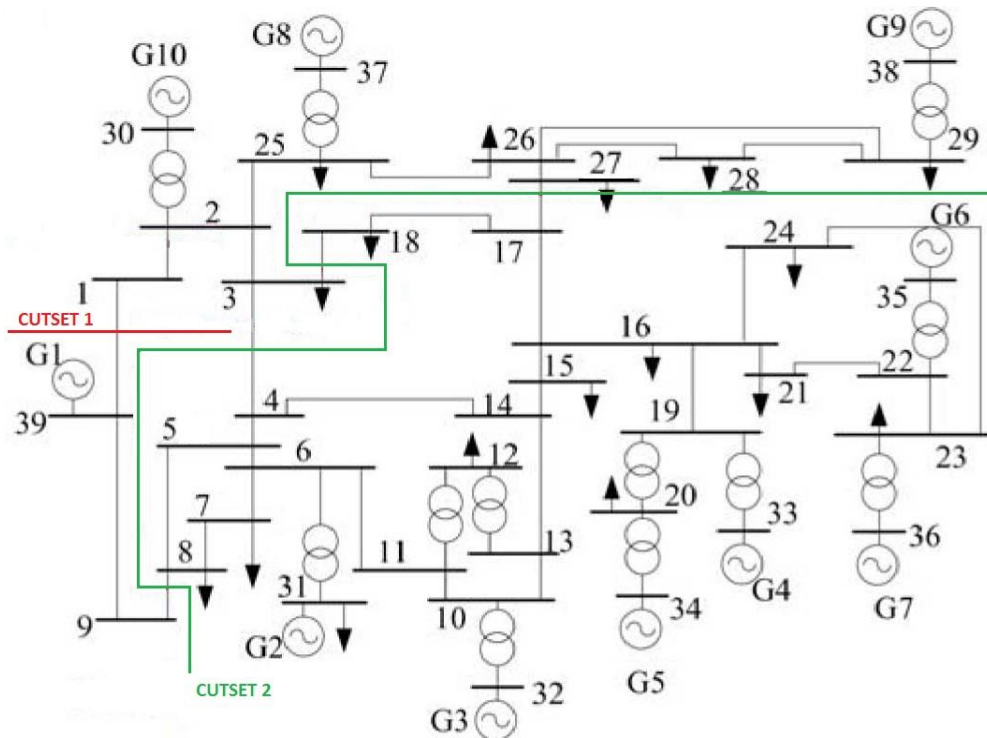
Είναι προφανές ότι προστίθενται με τον αριθμό των γραμμών που θα ανοίξουν στην πρώτη επανάληψη έτσι ώστε να έχουμε τη δημιουργία των τριών νησιών  $V_1=\{9,39\}$ ,  $V_2=\{1,2,3,25,30,37,26,28,27,29,38\}$  και  $V_3=\{4,5,6,7,8,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22, 23, 24,31,32,33,34,35,36\}$ , όπως φαίνεται και στο **σχήμα 3.3.4** όπου παρουσιάζεται το τελικό δίκτυο με τους διαχωρισμούς να είναι εμφανείς (cutset 1 και cutset 2). Ο συνολικός αριθμός των γραμμών(5) που θα αποσυνδεθούν και τα χαρακτηριστικά αυτών παρουσιάζονται στον **πίνακα 3.3.3**. Στον **πίνακα 3.3.4**, παρουσιάζονται τα νησιά που δημιουργούνται με τους κόμβους που περιέχει το καθένα νησί και οι τιμές της παραγωγής και της κατανάλωσης ενεργού ισχύος P(MW), σε κάθε νησί.

**Πίνακας 3.3.3:** Σύνολο αποσυνδεδεμένων γραμμών για το δίκτυο 39 ζυγών

<b>A/A Αποσυνδεδεμένης Γραμμής (cutset)</b>	<b>Κόμβος i</b>	<b>Κόμβος j</b>	<b>Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)</b>
<b>1</b>	1	39	76.06695
<b>2</b>	3	4	37.23575
<b>3</b>	3	18	40.76873
<b>4</b>	8	9	34.64554
<b>5</b>	17	27	24.63264

**Πίνακας 3.3.4:** Στοιχεία Νησίδων για το δίκτυο 39 ζυγών

<b>Νησίδες</b>	<b>Παραγωγή Ενεργού Ισχύος P(MW)</b>	<b>Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος P(MW)</b>	<b>Απόλυτη Τιμή Διαφοράς Παραγωγής &amp; Κατανάλωσης</b>
$V_1=\{9,39\}$	1000	1110.5	110.5
$V_2=\{1,2,3,25, 30,37,26,28,27,29,38\}$	1620	1553.1	66.9
$V_3$ $=\{4,5,6,7,8,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21, 22, 23,24, 31,32, 33,34,35,36\}$	3677.87	3590.63	87.24



**Σχήμα 3.3.4:** Προβολή των διακοπόμενων συνδέσεων για το δίκτυο 39 ζυγών μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την ποιότητα των νησιών που δημιουργούνται θα υπολογίσουμε τα μεγέθη 'cut' και 'volume' και το μέγεθος  $\phi_k$  για κάθε νησί.

**Για την νησίδα  $V_1$ :**

$$cut(V_1, \bar{V}_1) = \sum_{v_i \in V_1, v_j \in \bar{V}_1} w_{ij} = 110.71 MW$$

$$vol(V_1) = \sum_{v_i \in V_1} d_i = 166.66 MW$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_1 = 1 - \frac{cut(V_1, \bar{V}_1)}{vol(V_1)} = 0.982$$

**Για την νησίδα  $V_2$ :**

$$cut(V_2, \bar{V}_2) = \sum_{v_i \in V_2, v_j \in \bar{V}_2} w_{ij} = 178.7 MW$$

$$vol(V_2) = \sum_{v_i \in V_2} d_i = 6898.07 MW$$

οπότε προκύπτει  $\phi_2 = 1 - \frac{cut(V_2, \bar{V}_2)}{vol(V_2)} = 0.97$

**Για την νησίδα  $V_3$ :**

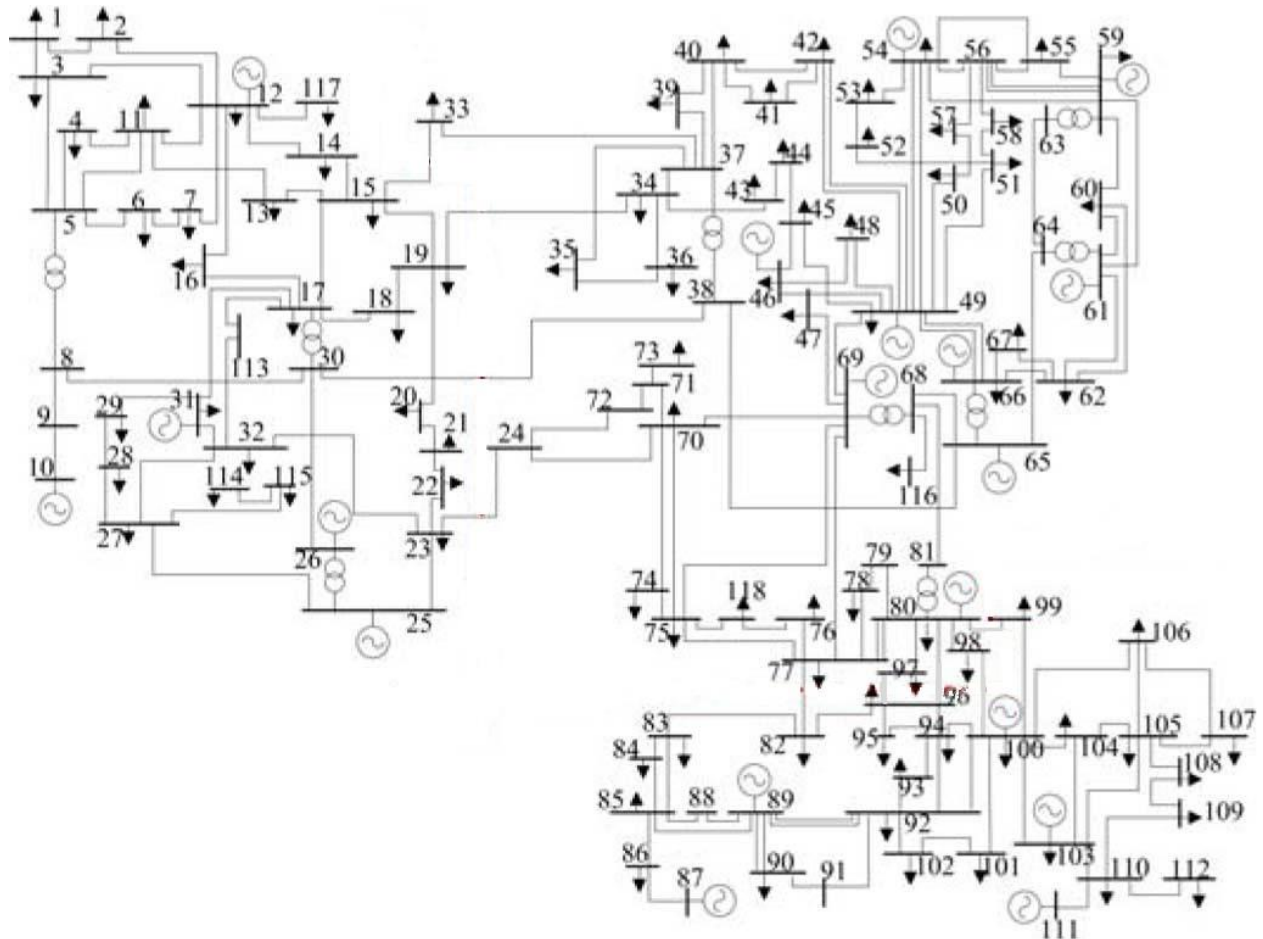
$$cut(V_3, \bar{V}_3) = \sum_{v_i \in V_3, v_j \in \bar{V}_3} w_{ij} = 137.28 MW, \text{ ενώ}$$

$$vol(V_3) = \sum_{v_i \in V_3} d_i = 19574.82 MW$$

οπότε προκύπτει  $\phi_3 = 1 - \frac{cut(V_3, \bar{V}_3)}{vol(V_3)} = 0.988$

### 3.4 Δίκτυο 118 ζυγών

Το δίκτυο των 118 ζυγών φαίνεται στο **σχήμα 3.4.1**, διαθέτει 54 ζυγούς γεννητριών, 65 ζυγούς φορτίων και 186 γραμμές μεταφοράς. Οι ομάδες συγχρονισμένων γεννητριών αυτού του δικτύου είναι τρεις και συντελούνται από τους εξής ζυγούς γεννητριών το καθένα {10,12,25,26,31}, {46,49,54,59,61,65,66,9,80} και {87,89,100,103,111}.

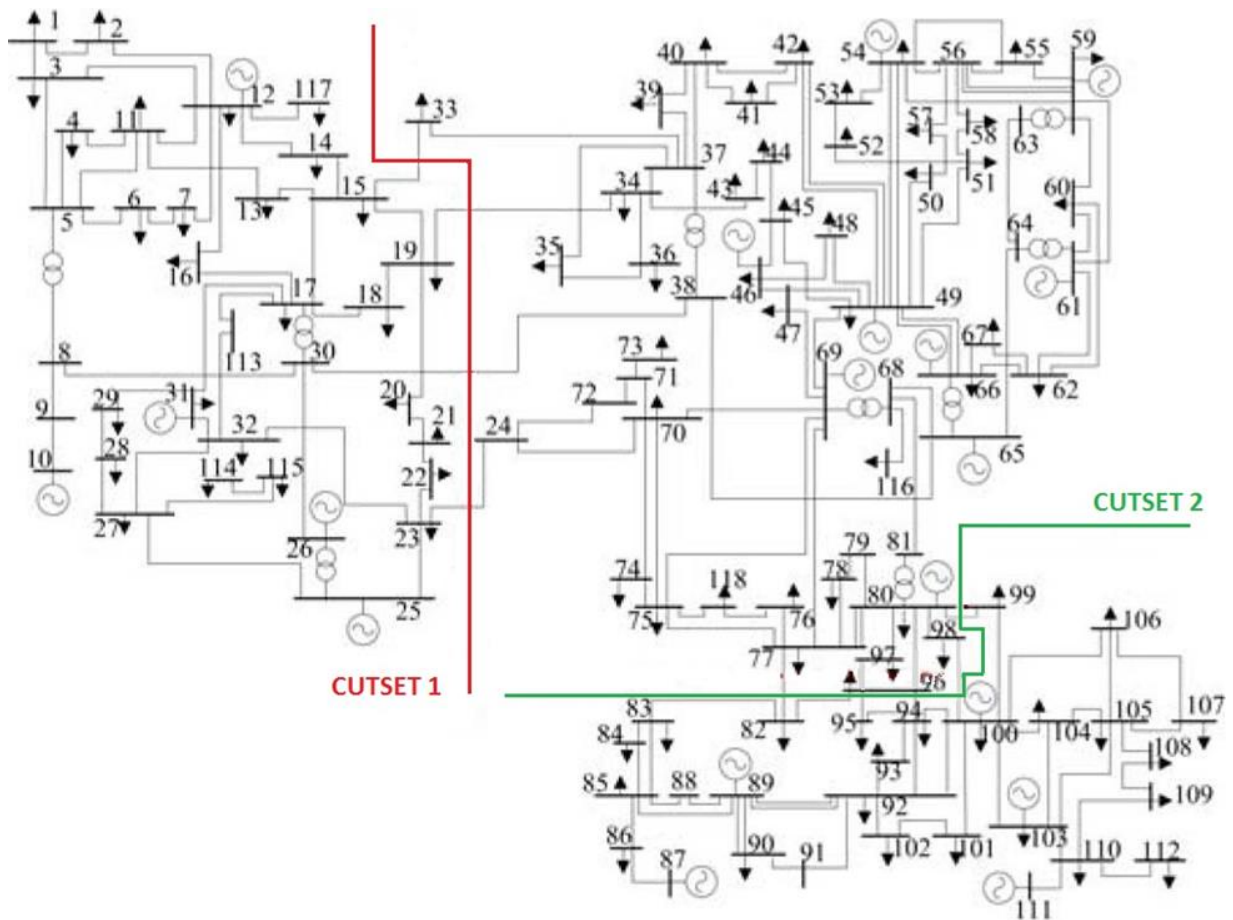


**Σχήμα 3.4.1:** Τοπολογία δικτύου 118 ζυγών

Αφού οι ομάδες συγχρονισμένων γεννητριών είναι τρεις, ο επιθυμητός αριθμός νησιών που θα δημιουργηθούν μετά τη νησιδοποίηση θα είναι τρία. Συγχωνεύονται δύο συστάδες γεννητριών και πάλι, οπότε προκύπτουν οι εξής ομάδες συγχρονισμένων γεννητριών {87,89,100,103,111,10,12,25,26,31} και {46,49,54,59,61,65,66,69,80}.

Εν συνεχεία μέσω του matpower εισάγονται τα στοιχεία του δικτύου αυτού, στον αλγόριθμο και μετά ακολουθούν τα εξής ίδια βήματα που αναλύσαμε και στα προηγούμενα δίκτυα:

- i.* Κατασκευάζεται ο στατικός γράφος  $G_S$  ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου.
- ii.* Για να εφαρμοστεί η φασματική ομαδοποίηση με βάση τον περιορισμό του συγχρονισμού των γεννητριών (coherent groups) θα κατασκευάζεται ο πίνακας προβολών (projection matrix)  $U$ , με τη χρήση του οποίου μεταβάλλεται το υποσύνολο των λύσεων.
- iii.* Υπολογίζονται τα πρώτα δύο ιδιοδιανύσματα  $\vartheta_1$  και  $\vartheta_2$  που αντιστοιχούν στις δύο μικρότερες ιδιοτιμές, που ικανοποιούν τη γενικευμένη εξίσωση  $U^T L_S U * \vartheta = \lambda * U^T U * \vartheta$ .
- iv.* Κατασκευάζεται ο πίνακας  $J \in \mathcal{R}^{n \times 2}$  που έχει ως στήλες τα διανύσματα  $U\vartheta_1$  και  $U\vartheta_2$ .
- v.* Με τη χρήση του αλγορίθμου kmeans ,ομαδοποιούνται οι κόμβοι  $y_i \in R^2$  στις  $V_1=\{13, 14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,25,26,27,28,29,30,31,32,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95, 99,100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111,112,113,114,115,117\}$  και  $V_2=\{24,33,34,35, 36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67, 68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,96,97,98,116,118\}$  οι οποίες φαίνονται στο **σχήμα 3.4.2.**



**Σχήμα 3.4.2:** Προβολή των διακοπόμενων συνδέσεων για το δίκτυο 118 ζυγών μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, ενώ κανονικά θα έπρεπε να καταγράψει τη δημιουργία δύο νησίδων, διότι όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο αλγόριθμος αυτός έχει τη δυνατότητα δημιουργίας δύο νησίδων και όχι παραπάνω, καταγράφει τη δημιουργία τριών νησίδων. Αυτό συμβαίνει διότι σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα του αλγορίθμου οι δύο ακραίες νησίδες του σχήματος 2.4.2, αποτελούν μία νησίδα. Σύμφωνα όμως με την τοπολογία του δικτύου οι δύο αυτές νησίδες δεν έχουν καμία σύνδεση μεταξύ τους, με αποτέλεσμα όπως καταγράφεται και στο διάγραμμα, να αποτελούν στην ουσία δύο ανεξάρτητες μεταξύ τους νησίδες. Έχοντας τις τρεις αυτές νησίδες οι οποίες ικανοποιούν τα coherent groups των γεννητριών δε θα εκτελεστεί δεύτερη επανάληψη που κανονικά θα έπρεπε για τη δημιουργία τριών νησίδων και τελικώς οι νησίδες που προκύπτουν είναι  $V_1=\{82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,99,100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111,112\}$ ,  $V_2=\{24,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,96,97,98,116,118\}$  και  $V_3=\{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,25,26,27,28,29,30,31,32,113,114,115,117\}$ .



Στον παρακάτω **πίνακα 3.4.1** φαίνονται οι γραμμές του δικτύου που θα αποσυνδεθούν, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ελεγχόμενη νησιδοποίηση στο δίκτυο των 118 ζυγών, και η ροή ισχύος κάθε μίας από αυτές τις γραμμές. Στον **πίνακα 3.4.2** παρουσιάζονται τα νησιά που δημιουργούνται με τους κόμβους που περιέχει το καθένα νησί και οι τιμές της παραγωγής και της κατανάλωσης ενεργού ισχύος P(MW), σε κάθε νησί.

**Πίνακας 3.4.1:** Αποσυνδεδεμένες γραμμές για το δίκτυο 118 ζυγών

<b>Α/Α Αποσυνδεδεμένης Γραμμής (cutset)</b>	<b>Κόμβος <i>i</i></b>	<b>Κόμβος <i>j</i></b>	<b>Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)</b>
<b>1</b>	23	24	8.26778
<b>2</b>	15	33	7.29396
<b>3</b>	19	34	3.61919
<b>4</b>	30	38	62.22117
<b>5</b>	77	82	3.09608
<b>6</b>	82	96	9.95380
<b>7</b>	94	96	19.72375
<b>8</b>	80	99	19.45787
<b>9</b>	95	96	1.41561
<b>10</b>	98	100	5.26637

**Πίνακας 3.4.2:** Στοιχεία Νησίδων για το δίκτυο 118 ζυγών

<b>Νησίδες</b>	<b>Παραγωγή Ενεργού Ισχύος P(MW)</b>	<b>Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος P(MW)</b>	<b>Απόλυτη Τιμή Διαφοράς Παραγωγής &amp; Κατανάλωσης</b>
$V_1$ ={82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,99,100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111,112}	939	908	31
$V_2$ ={24,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,96,97,98,116,118}	2359.86	2371	11.14
$V_3$ ={1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,25,26,27,28,29,30,31,32,113,114,115,117}	1076	963	113

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την ποιότητα των νησιών που δημιουργούνται θα υπολογίσουμε τα μεγέθη 'cut' και 'volume' και το μέγεθος  $\phi_k$  για κάθε νησί.

**Για την νησίδα  $V_1$ :**

$$cut(V_1, \overline{V_1}) = \sum_{v_i \in V_1, v_j \in \overline{V_1}} w_{ij} = 58.91 \text{ MW},$$

$$vol(V_1) = \sum_{v_i \in V_1} d_i = 3202.1 \text{ MW}$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_1 = 1 - \frac{cut(V_1, \overline{V_1})}{vol(V_1)} = 0.988$$

**Για την νησίδα  $V_2$ :**

$$cut(V_2, \overline{V_2}) = \sum_{v_i \in V_2, v_j \in \overline{V_2}} w_{ij} = 140.32 \text{ MW, ενώ}$$

$$vol(V_2) = \sum_{v_i \in V_2} d_i = 7809.8 \text{ MW}$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_2 = 1 - \frac{cut(V_2, \overline{V_2})}{vol(V_2)} = 0.982$$

**Για την νησίδα  $V_3$ :**

$$cut(V_3, \overline{V_3}) = \sum_{v_i \in V_3, v_j \in \overline{V_3}} w_{ij} = 81.4 \text{ MW, ενώ}$$

$$vol(V_3) = \sum_{v_i \in V_3} d_i = 6940.4 \text{ MW}$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_3 = 1 - \frac{cut(V_3, \overline{V_3})}{vol(V_3)} = 0.982$$

**3.5 Συμπεράσματα**

Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόστηκε η μέθοδος περιοριστικής φασματικής ομαδοποίησης με χρήση του πίνακα προβολών για την εφαρμογή ελεγχόμενης νησιδοποίησης πάνω σε τρία δίκτυα. Ο πυρήνας αυτής της μεθόδου είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελάχιστη διαταραχή ροής ισχύος (minimal power-flow disruption). Με την χρήση του πίνακα προβολών εισάγεται ο περιορισμός της δημιουργίας ομάδων συναφών γεννητριών. Με τη χρήση της ελάχιστης διαταραχής ροής ισχύος ως αντικειμενικής συνάρτησης, πετυχαίνεται βελτιωμένη μεταβατική ευστάθεια των νησιών που δημιουργούνται, μειώνεται η πολυπλοκότητα του προβλήματος βελτιστοποίησης και δημιουργείται ένας αλγόριθμος υπολογιστικά εφικτός και αποδοτικός. Η ενσωμάτωση του περιοριστικού παράγοντα για τις

συγχρονισμένες γεννήτριες, εμποδίζει τη δημιουργία νησιών που περιέχουν μη συγχρονισμένες γεννήτριες ή απομονωμένα φορτία.

Μετά τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος αυτός είναι υπολογιστικά αποδοτικός και ενδείκνυται για εφαρμογή σε πραγματικούς χρόνους, όπως παρουσιάζεται στον **πίνακα 3.5.1**, αλλά και για εφαρμογή σε μεγάλα δίκτυα μεταφοράς. Ελέγχεται το ισοζύγιο παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος σε κάθε νησίδα αλλά δεν ελέγχεται το ισοζύγιο άεργου ισχύος καθώς γίνεται η παραδοχή ότι η ροή αυτής, μπορεί να αντισταθμιστεί με την έγχυση άεργου ισχύος από πυκνωτικές συστοιχίες.

**Πίνακας 3.5.1:** Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμου για όλα τα δίκτυα

<b>Δίκτυο</b>	<b>Χρόνος εκτέλεσης 1ης επανάληψης αλγορίθμου(seconds)</b>	<b>Χρόνος εκτέλεσης 2ης επανάληψης αλγορίθμου(seconds)</b>
<b>9 ζυγών</b>	≈1.15	-
<b>39 ζυγών</b>	≈1.31	≈0.54
<b>118 ζυγών</b>	≈1.58	-

Στον παρακάτω **πίνακα 3.5.2** φαίνονται τα μεγέθη **'cut'**, **'volume'** και  **$\phi$**  που αντιστοιχούν στις νησίδες του κάθε δικτύου

**Πίνακας 3.5.2:** Μεγέθη αξιολόγησης νησίδων

<b>Δίκτυο</b>	<b>Νησίδες</b>	<b>cut(MW)</b>	<b>vol(MW)</b>	<b><math>\phi</math></b>
<b>9 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	71.74	215.64	0.67
	<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	71.74	1059.22	0.93
<b>39 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	110.71	166.66	0.98
	<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	178.7	6898.07	0.97
	<b>3<sup>η</sup> νησίδα</b>	137.28	19574.82	0.98
<b>118 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	58.91	3202.1	0.988
	<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	140.32	7809.8	0.982
	<b>3<sup>η</sup> νησίδα</b>	81.4	6940.4	0.982

Τα αποτελέσματα της ελεγχόμενης νησιδοποίησης που προτείνονται με αυτή τη μέθοδο είναι αρκετά ικανοποιητικά. Υπακούουν στον περιορισμό, κάθε νησίδα να έχει συγχρονισμένες μεταξύ τους γεννήτριες και με βάση μέγεθος  $\phi$ , που εκφράζει τη συνδεσιμότητα κάθε νησίδας σχετικά με το μέγεθος της, παρατηρείται ότι οι νησίδες που προκύπτουν είναι στην πλειοψηφία τους πολύ καλής ποιότητας καθώς είναι “μη ισχυρά” συνδεδεμένες με το υπόλοιπο δίκτυο. Ένα βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής εντοπίζεται στην αδυναμία δημιουργίας άνω των δύο νησίδων, το οποίο αντιμετωπίζεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω με τη μέθοδο της αναδρομικής διχοτόμησης (recursive bisection).

# 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-Μέθοδος φασματικής ομαδοποίησης με περιορισμούς για την Εφαρμογή Ελεγχόμενης Νησιδοποίησης.

## 4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκε και αναλύθηκε ο αλγόριθμος φασματικής ομαδοποίησης με χρήση του πίνακα προβολών. Το βασικό του μειονέκτημα όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι ότι μπορεί να προτείνει λύση νησιδοποίησης μόνο όταν ο αριθμός των νησιών είναι δύο, σε κάθε άλλη περίπτωση που ο αριθμός των νησιών είναι μεγαλύτερος του δύο, επικαλείται η διαδικασία της αναδρομικής διχοτόμησης (recursive bisection). Η αναδρομική διχοτόμηση ωστόσο αποτελεί μια υπολογιστικά απαιτητική τεχνική που πολλές φορές μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της λύσης, επιπλέον προσθέτει χρονική καθυστέρηση στην εύρεση μιας λύσης νησιδοποίησης. Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται μια νέα μεθοδολογία που βασίζεται στην περιοριστική φασματική ομαδοποίηση και είναι υπολογιστικά πιο αποδοτική. Η μεθοδολογία αυτή, που είναι στην ουσία ελεγχόμενη νησιδοποίηση με τη μέθοδο της περιοριστικής φασματικής ομαδοποίησης, καθορίζει απευθείας μια λύση νησιδοποίησης με την ελάχιστη διαταραχή ροής ισχύος (power-flow disruption), για οποιοδήποτε αριθμό νησιών, ενώ παράλληλα διασφαλίζει ότι κάθε νησί περιέχει μόνο συγχρονισμένες γεννήτριες. Με τη μέθοδο αυτή λύνεται ένα πρόβλημα ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων μόνο μία φορά ακόμα και αν χρειάζεται να δημιουργηθούν άνω των δύο νησιών, κάτι το οποίο έπρεπε να επαναληφθεί στον προηγούμενο αλγόριθμο, έτσι αποφεύγεται η χρήση επαναληπτικών αλγορίθμων π.χ. kmeans. Το πλεονέκτημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, ιδίως όταν έχουμε να χειριστούμε μεγάλα δίκτυα.

Θα εξετάσουμε τη μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιώντας και πάλι τα τρία πρότυπα δίκτυα της IEEE. Η ροή των βημάτων που θα ακολουθηθεί σε κάθε περίπτωση είναι η εξής και παρουσιάζεται στο **σχήμα 4.1.1**:

- i.* Κατασκευάζεται ο στατικός γράφος  $G_S$  ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου και τα βάρη των ακμών του καθορίζονται ως  $(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2$ . Υπολογίζονται ο πίνακας γειτνίασης  $W$  και ο διαγώνιος πίνακας βαθμών  $D$ .
- ii.* Με τη χρήση του πίνακα γειτνίασης  $W$  κατασκευάζεται ο κανονικοποιημένος πίνακας Laplace  $L_N$  και υπολογίζονται τα  $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_r$  ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις μικρότερες  $r$  ιδιοτιμές του. Ο αριθμός  $r$  είναι ο αριθμός των νησιών που πρέπει να δημιουργηθούν, δηλαδή ο αριθμός

των ομάδων συγχρονισμένων γεννητριών. Ο κανονικοποιημένος πίνακας Laplace  $L_N$  ενός γράφου  $G_S$  είναι ένας πίνακας  $n \times n$  (όπου  $n$  ο αριθμός των κόμβων) και υπολογίζεται

$$\text{ως εξής: } [L_N]_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{αν } i = j \\ -w_{ij} / \sqrt{d_i d_j} & \text{αν } i \neq j \text{ και } e_{ij} \in E \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

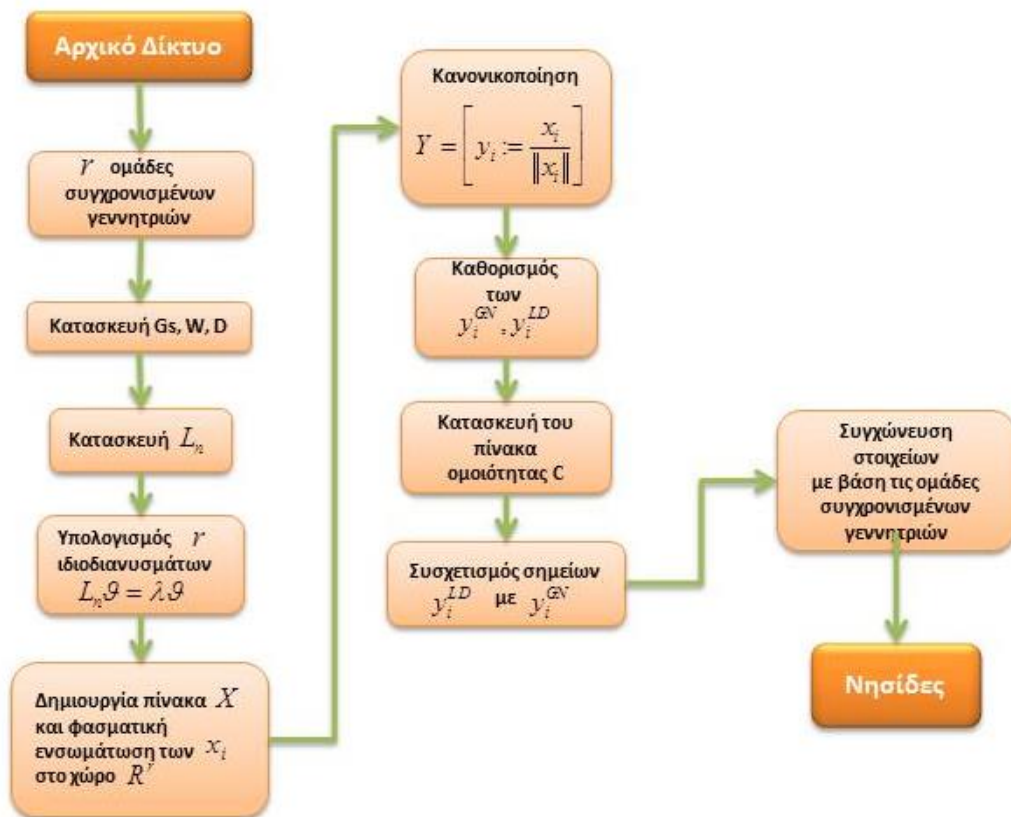
- iii. Κατασκευάζεται ο πίνακας  $X \in \mathcal{R}^{n \times r}$  ο οποίος έχει ως στήλες τα ιδιοδιανύσματα  $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_r$  που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα, και σειρές  $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ . Με τη χρήση αυτών των ιδιοδιανυσμάτων δίνονται γεωμετρικές συντεταγμένες για τους κόμβους του γράφου  $v_i \in V$  στον  $r$ -διάστατο Ευκλείδειο χώρο, αυτό σημαίνει ότι τα διανύσματα  $x_i$  αποτελούν τις συντεταγμένες των κόμβων στον Ευκλείδειο χώρο  $\mathcal{R}^r$ . Η φασματική αυτή ενσωμάτωση (spectral embedding) χρησιμοποιείται στη συνέχεια από τον αλγόριθμο ομαδοποίησης για να ομαδοποιήσει τα στοιχεία του γράφου.
- iv. Καθορίζονται τα “κεντροειδή”  $x_i^{GN} \in X_{GN}$  στο χώρο  $\mathcal{R}^r$ , που είναι στην ουσία τα σημεία που αντιστοιχούν στους κόμβους των γεννητριών στο χώρο  $\mathcal{R}^r$ . Τα υπόλοιπα σημεία  $x_i^{LD} \in X \setminus X_{GN}$  ανήκουν στους κόμβους φορτίων του γράφου  $G_S$ .
- v. Για να βελτιωθεί η ποιότητα της λύσης, κανονικοποιούνται τα διανύσματα  $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ , έτσι ώστε να έχουν μήκος ίσο με τη μονάδα πριν χρησιμοποιηθούν από την οποιαδήποτε τεχνική ομαδοποίησης. Οπότε ορίζονται τα διανύσματα  $y_i := \frac{x_i}{\|x_i\|}, i = 1, 2, \dots, n$ , που στην ουσία προβάλλουν τα διανύσματα  $x_i$  στην μοναδιαία  $(r-1)$ διάστατη σφαίρα  $S^{r-1} = \{y_i \in \mathcal{R}^r : \|y_i\| = 1\}$ . Έτσι σχηματίζεται ο πίνακας  $Y \in \mathcal{R}^{n \times r}$  του οποίου οι σειρές  $y_i, i = 1, 2, \dots, n$  αναπαριστούν τους κόμβους του γράφου  $v_i \in V$  σαν σημεία στην  $S^{r-1}$ .
- vi. Καθορίζονται τα “κεντροειδή”  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$  στην  $S^{r-1}$  που είναι στην ουσία τα σημεία που αντιστοιχούν στους κόμβους των γεννητριών και τα υπόλοιπα σημεία  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  ανήκουν στους κόμβους φορτίων του γράφου  $G_S$ .
- vii. Κατασκευάζεται ο πίνακας ομοιότητας (similarity matrix)  $C$  ο οποίος έχει διαστάσεις  $m \times (n-m)$ , όπου  $n$  ο αριθμός των κόμβων και  $m$  ο αριθμός των γεννητριών. Τα στοιχεία αυτού του πίνακα είναι οι Ευκλείδειες αποστάσεις ανάμεσα στα σημεία ζυγών φορτίου  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  και στα σημεία “κεντροειδή” των γεννητριών  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$ .

Η Ευκλείδεια απόσταση είναι μία συνάρτηση:  $d: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  που αντιστοιχεί σε δύο διανύσματα  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$   $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  και του  $n$ -διάστατου διανυσματικού χώρου  $\mathbb{R}$  [8], και δίνεται από τον τύπο :

$$d(x, y) = \sqrt{(y_1 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2 + \dots + (y_n - x_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}$$

viii. Συσχετίζεται το κάθε σημείο ζυγού-φορτίου  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  με το πλησιέστερο του “κεντροειδές”  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$ . Αυτό μαθηματικά πραγματοποιείται αν στον πίνακα ομοιότητας  $C$  (similarity matrix), προσδιοριστεί η ελάχιστη τιμή κάθε στήλης. Οι γραμμές του πίνακα  $C$  αντιστοιχούν στους κόμβους των γεννητριών, ενώ οι στήλες του στους ζυγούς φορτίων. Έτσι ο κάθε κόμβος φορτίου ομαδοποιείται με έναν και μοναδικό κόμβο γεννήτριας. Ο αριθμός των ομάδων ζυγών φορτίου που θα προκύψει θα ισούται με τον αριθμό των γεννητριών.

ix. Στο τελικό βήμα αυτό που απομένει είναι να δημιουργηθούν τα νησιά απλά συγχωνεύοντας τις ομάδες των κόμβων που προέκυψαν στο προηγούμενο βήμα με βάση τις ομάδες συγχρονισμένων γεννητριών. Συγχωνεύονται δηλαδή οι ομάδες των κόμβων που αντιστοιχούν σε γεννήτριες της ίδιας συναφούς ομάδας (coherent group).



**Σχήμα 4.1.1:** Διάγραμμα ροής μεθόδου φασματικής ομαδοποίησης με περιορισμούς

Αφού εφαρμοστεί ο αλγόριθμος σε κάθε επιμέρους δίκτυο, θα αξιολογηθεί η ποιότητα της προτεινόμενης λύσης νησιδοποίησης (cutset), έτσι ώστε να αξιολογηθεί και η απόδοση του αλγορίθμου. Αυτό μπορεί να γίνει βρίσκοντας την αναλογία ανάμεσα στα μεγέθη **'cut'** και **'volume'** του κάθε νησιού όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Το μέγεθος **'cut'** ενός νησιού ορίζεται από τη σχέση

$$cut(V_k, \overline{V_k}) = \sum_{v_i \in V_k, v_j \in \overline{V_k}} w_{ij}$$

και μετρά τη συνδεσιμότητα ενός νησιού και στην προκειμένη περίπτωση ανταποκρίνεται στη διαταραχή της ροής ισχύος αν το νησί  $V_k$  είναι αποσυνδεδεμένο από το υπόλοιπο σύστημα.

Το μέγεθος **'volume'** ενός νησιού με σύνολο κόμβων  $V_k$ , είναι το άθροισμα των διαγώνιων στοιχείων (weighted degrees) του διαγώνιου πίνακα βαθμών ( $D$ ):

$$vol(V_k) = \sum_{v_i \in V_k} d_i$$

και αναπαριστά την εσωτερική ροή ισχύος ενός νησιού μαζί με τη ροή ισχύος στα όρια του. Μπορεί τώρα να καθοριστεί η ποιότητα ενός νησιού από το μέγεθος  $\phi_k$  που ορίζεται από τον τύπο:

$$\phi_k = 1 - \frac{cut(V_k, \overline{V_k})}{vol(V_k)}$$

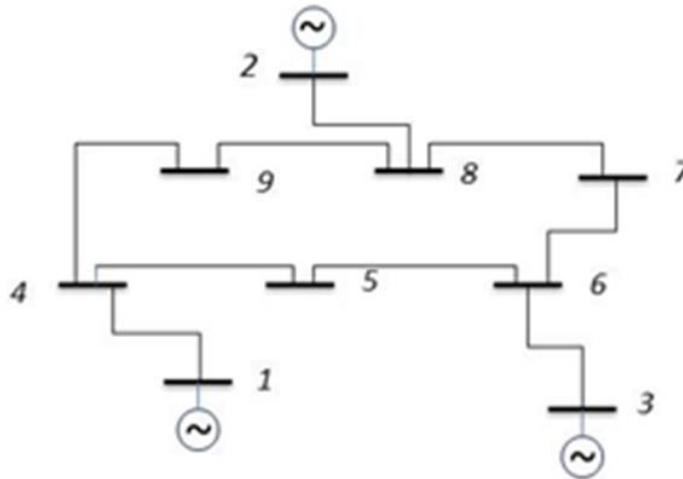
Ο αλγόριθμος αυτός θα εφαρμοστεί, όπως παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες πάνω στα ακόλουθα τρία πρότυπα δίκτυα της IEEE:

- 4) δίκτυο 9 ζυγών το οποίο αποτελείται από 3 γεννήτριες, 6 φορτία και 9 γραμμές μεταφοράς
- 5) δίκτυο 39 ζυγών το οποίο αποτελείται από 10 γεννήτριες, 29 φορτία και 46 γραμμές μεταφοράς
- 6) δίκτυο 118 ζυγών το οποίο αποτελείται από 54 γεννήτριες, 65 φορτία και 186 γραμμές μεταφοράς



## 4.2 Δίκτυο 9 ζυγών

Το δίκτυο των 9 ζυγών φαίνεται στο **σχήμα 4.2.1**, διαθέτει 3 ζυγούς γεννητριών, 6 ζυγούς φορτίων 9 γραμμές μεταφοράς και γνωρίζουμε ήδη τα coherent groups που αποτελούνται από τους ζυγούς γεννητριών {1} και {2,3}.



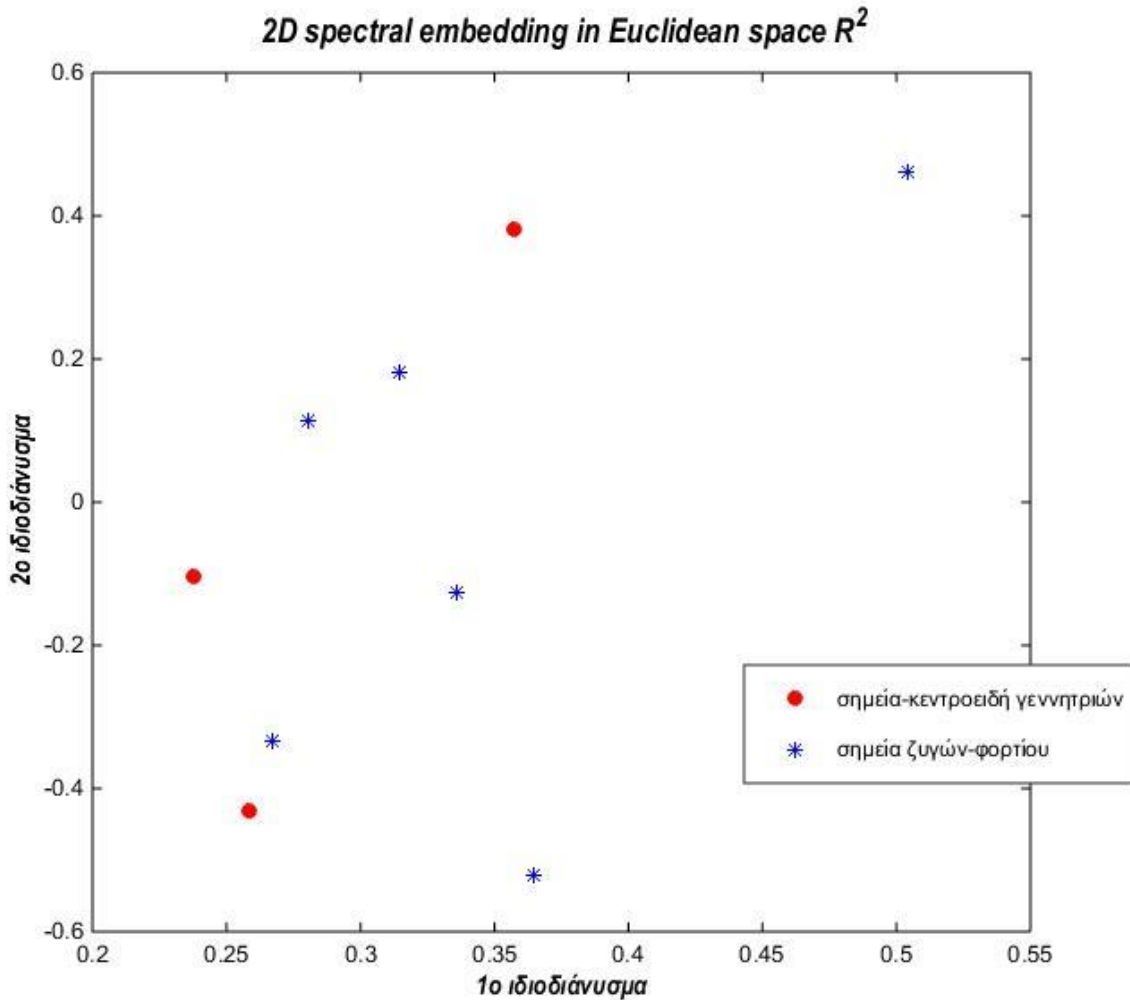
**Σχήμα 4.2.1:** Τοπολογία δικτύου 9 ζυγών

Μέσω του matpower εισάγουμε τα στοιχεία του δικτύου αυτού, στον αλγόριθμο και ακολουθούν τα εξής βήματα:

- i.* Κατασκευάζεται ο στατικός γράφος  $G_S$  ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου και τα βάρη των ακμών του καθορίζονται ως  $(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2$ . Ο πίνακας γειτνίασης είναι  $W = [w_{ij}]$  και ο διαγώνιος πίνακας βαθμών  $D = [d_i]$ .
- ii.* Με τη χρήση του πίνακα γειτνίασης  $W$  κατασκευάζεται ο κανονικοποιημένος πίνακας Laplace  $L_N$  και υπολογίζονται τα  $\psi_1, \psi_2$  ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις μικρότερες 2 ιδιοτιμές του (έχουμε δύο συναφείς ομάδες γεννητριών).
- iii.* Κατασκευάζεται ο πίνακας  $X \in \mathcal{R}^{9 \times 2}$  ο οποίος έχει ως στήλες τα ιδιοδιανύσματα  $\psi_1, \psi_2$  και σειρές  $x_i, i = 1, 2, \dots, 9$ . Με τη χρήση αυτών των ιδιοδιανυσμάτων δίνονται γεωμετρικές συντεταγμένες για τους κόμβους του γράφου  $v_i \in V$  στον 2-διάστατο Ευκλείδειο χώρο, αυτό

σημαίνει ότι τα διανύσματα  $x_i$  αποτελούν τις συντεταγμένες των κόμβων στον Ευκλείδειο χώρο  $\mathcal{R}^2$ .

- iv. Καθορίζονται, όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.2.2**, τα “κεντροειδή”  $x_i^{GN} \in X_{GN}$  (κόκκινα σημεία) στο χώρο  $\mathcal{R}^2$ , που είναι στην ουσία τα σημεία που αντιστοιχούν στους κόμβους των γεννητριών στο χώρο  $\mathcal{R}^2$ . Τα υπόλοιπα σημεία (μπλε σημεία)  $x_i^{LD} \in X \setminus X_{GN}$  ανήκουν στους κόμβους φορτίων του γράφου  $G_S$ .

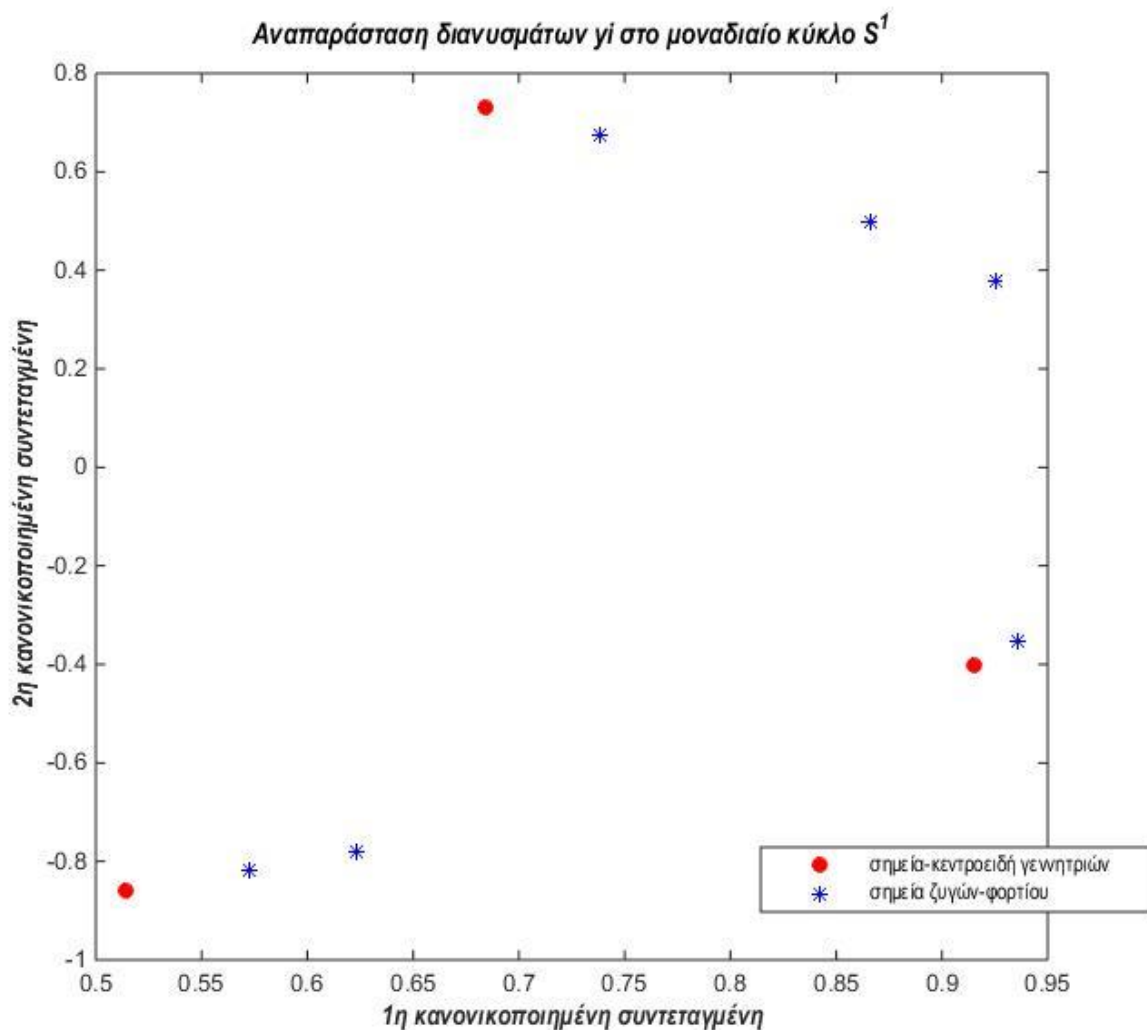


**Σχήμα 4.2.2:** φασματική ενσωμάτωση (spectral embedding) των κόμβων του δικτύου 9 ζυγών στον διδιάστατο Ευκλείδειο χώρο.

- v. Για να βελτιωθεί η ποιότητα της λύσης, κανονικοποιούνται τα διανύσματα  $x_i, i = 1, 2, \dots, 9$ , έτσι ώστε να έχουν μήκος ίσο με τη μονάδα πριν χρησιμοποιηθούν από την οποιαδήποτε τεχνική ομαδοποίησης. Οπότε ορίζουμε τα διανύσματα  $y_i := \frac{x_i}{\|x_i\|}, i = 1, 2, \dots, 9$ , που στην ουσία προβάλλουν τα διανύσματα  $x_i$  στην μοναδιαία μονοδιάστατη  $(r - 1)$  σφαίρα (κύκλος)

$S^1 = \{y_i \in \mathcal{R}^2: \|y_i\| = 1\}$ . Έτσι σχηματίζεται ο πίνακας  $Y \in \mathcal{R}^{n \times r}$  του οποίου οι σειρές  $y_i, i = 1, 2, \dots, 9$  αναπαριστούν τους κόμβους του γράφου  $v_i \in V$  σαν σημεία στην  $S^{r-1}$ , όπως φαίνεται και στο **σχήμα 4.2.3**.

vi. Καθορίζονται τα “κεντροειδή”  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$  στην  $S^{r-1}$  (κόκκινα σημεία στο **σχήμα 4.2.3**) που είναι στην ουσία τα σημεία που αντιστοιχούν στους κόμβους των γεννητριών και τα υπόλοιπα σημεία  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  ανήκουν στους κόμβους φορτίων του γράφου  $G_S$  (μπλε αστερίσκοι).



**Σχήμα 4.2.3:** Απεικόνιση των κόμβων του δικτύου 9 ζυγών στην επιφάνεια μοναδιαίας μονοδιάστατης σφαίρας

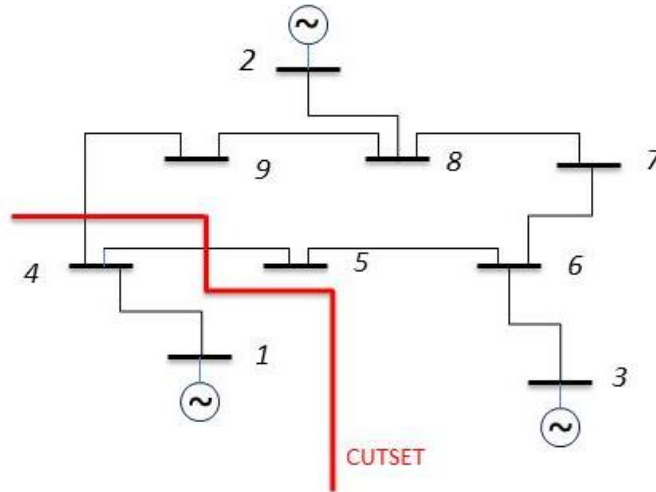
**vii.** Κατασκευάζεται ο πίνακας ομοιότητας(similarity matrix)  $C$  ο οποίος έχει διαστάσεις  $3 \times 6$ . Τα στοιχεία αυτού του πίνακα είναι οι Ευκλείδειες αποστάσεις ανάμεσα στα σημεία ζυγών φορτίου  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  και στα σημεία-“κεντροειδή” των γεννητριών  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$ .

**viii.** Συσχετίζεται το κάθε σημείο ζυγού-φορτίου  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  με το πλησιέστερο του “κεντροειδές”  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$ . Οι τρεις ομάδες ζυγών-φορτίου που προκύπτουν φαίνονται στον **πίνακα 4.2.1** όπου παρουσιάζονται οι ζυγοί φορτίου μαζί τον πιο κοντινό σε κάθε μια από αυτές ζυγό γεννήτριας.

**Πίνακας 4.2.1:** Αντιστοίχιση ζυγών φορτίου-γεννήτριας

<b>Ζυγός φορτίου</b>	<b>Ζυγός γεννήτριας</b>
4	1
5	3
6	3
7	2
8	2
9	2

**ix.** Στο τελικό βήμα συγχωνεύονται οι ομάδες των γεννητριών που προέκυψαν στο προηγούμενο βήμα με βάση τις συναφείς ομάδες γεννητριών. Οι συναφείς ομάδες είναι οι  $\{1\}$  και  $\{2,3\}$  τα τελικά νησιά που προκύπτουν είναι δύο, περιέχουν τους εξής κόμβους  $V_1 = \{1,4\}$  και  $V_2 = \{2,3,5,6,7,8,9\}$ , και φαίνονται στο **σχήμα 4.2.4**. Στον παρακάτω **πίνακα 4.2.2** φαίνονται οι γραμμές του δικτύου που θα αποσυνδεθούν (cutset), προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ελεγχόμενη νησιδοποίηση, και η ροή ισχύος που κάθε μία από αυτές τις γραμμές έχει. Στον **πίνακα 4.2.3** παρουσιάζονται τα νησιά που δημιουργούνται, με τους κόμβους τους και οι τιμές της παραγωγής και της κατανάλωσης ενεργού ισχύος  $P(MW)$ , σε κάθε νησί.



**Σχήμα 4.2.4:** Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση για το δίκτυο 9 ζυγών με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με περιορισμούς

**Πίνακας 4.2.2:** Αποσυνδεδεμένες γραμμές και ροή ισχύος σε αυτές

A/A Αποσυνδεδεμένης Γραμμής (cutset)	Κόμβος <i>i</i>	Κόμβος <i>j</i>	Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)
1	4	5	30.64
2	9	4	41.09

**Πίνακας 4.2.3:** Παραγωγή και κατανάλωση ενεργού ισχύος σε κάθε νησίδα

Νησίδες	Παραγωγή Ενεργού Ισχύος <i>P</i> (MW)	Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος <i>P</i> (MW)	Απόλυτη Τιμή Διαφοράς Παραγωγής & Κατανάλωσης
$V_1 = \{1,4\}$	71.95	0	71.95
$V_2 = \{2,3,5,6,7,8,9\}$	248	315	67

Προκειμένου να αξιολογηθεί η ποιότητα των νησιών που δημιουργούνται θα υπολογιστούν τα μεγέθη ‘cut’ και ‘volume’ και το μέγεθος  $\phi_k$  για κάθε νησί.

**Για την νησίδα  $V_1$  :**

$$t(V_1, \overline{V_1}) = \sum_{v_i \in V_1, v_j \in \overline{V_1}} w_{ij} = 71.74 \text{ MW},$$

$$vol(V_1) = \sum_{v_i \in V_1} d_i = 215.64 \text{ MW}$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_1 = 1 - \frac{cut(V_1, \overline{V_1})}{vol(V_1)} = 0.67$$

**Για την νησίδα  $V_2$  :**

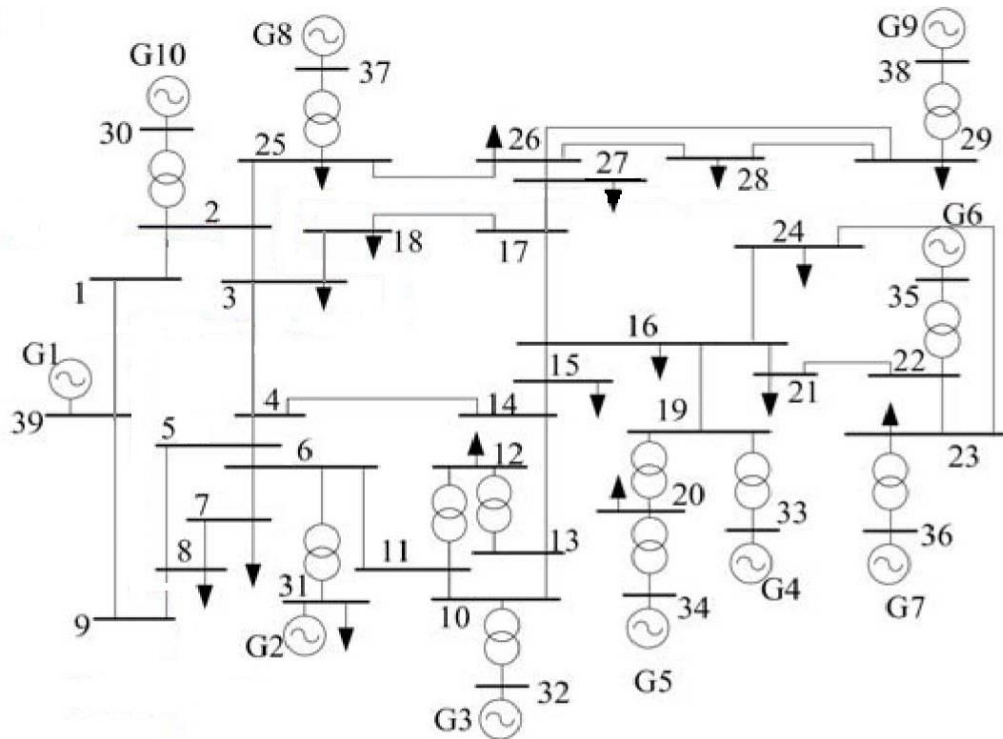
$$cut(V_2, \overline{V_2}) = \sum_{v_i \in V_2, v_j \in \overline{V_2}} w_{ij} = 71.74 \text{ MW}, \text{ ενώ}$$

$$vol(V_2) = \sum_{v_i \in V_2} d_i = 1059.22 \text{ MW}$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_2 = 1 - \frac{cut(V_2, \overline{V_2})}{vol(V_2)} = 0.93$$

### 4.3 Δίκτυο 39 ζυγών

Το δίκτυο των 39 ζυγών φαίνεται στο **σχήμα 4.3.1**, διαθέτει 10 ζυγούς γεννητριών, 29 ζυγούς φορτίων και 46 γραμμές μεταφοράς. Τα coherent groups σε αυτό το δίκτυο είναι οι τρεις ομάδες ζυγών {39} {37,38,30} και {31,32,33,34,35,36}.

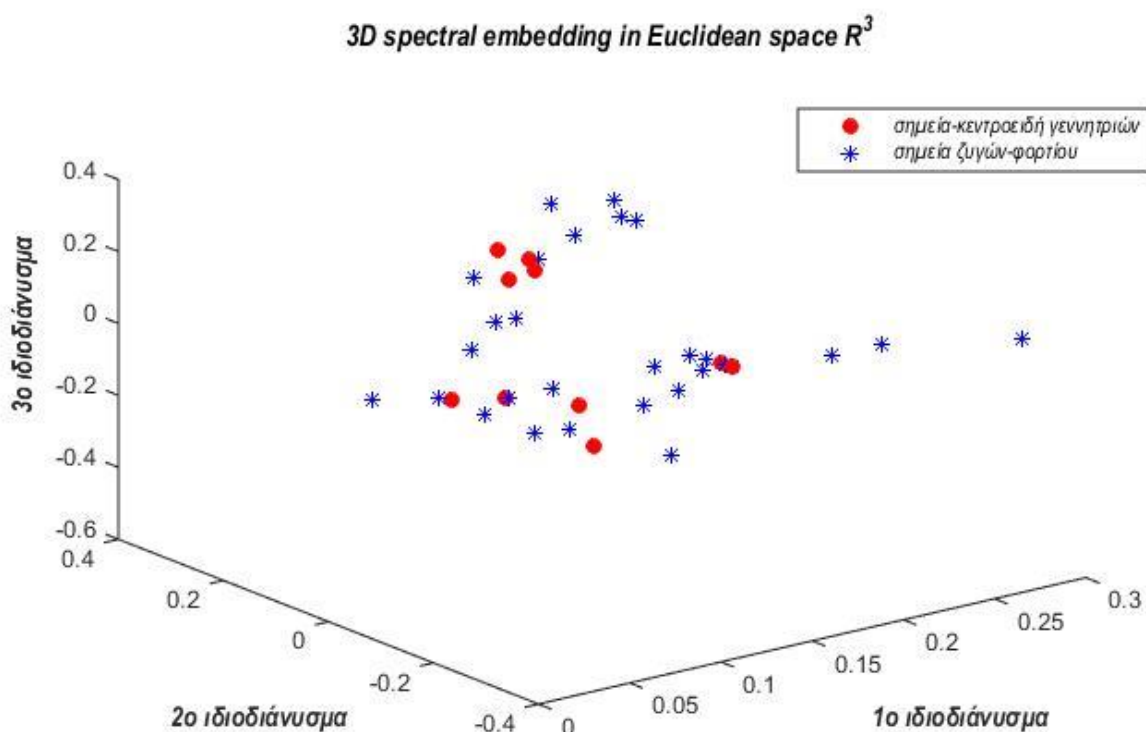


**Σχήμα 4.3.1:** Τοπολογία δικτύου 39 ζυγών

Μέσω του matpower εισάγονται τα στοιχεία του δικτύου στον αλγόριθμο και ακολουθούν τα εξής βήματα:

- i.* Κατασκευάζεται ο στατικός γράφος  $G_S$  ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου και τα βάρη των ακμών του καθορίζονται ως  $(|P_{ij}| + |P_{ji}|) / 2$ . Ο πίνακας γειτνίασης είναι  $W = [w_{ij}]$  και ο διαγώνιος πίνακας βαθμών  $D = [d_i]$ .
- ii.* Με τη χρήση του πίνακα γειτνίασης  $W$  κατασκευάζεται ο κανονικοποιημένος πίνακας Laplace  $L_N$  και υπολογίζονται τα  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις μικρότερες 3 ιδιοτιμές του (έχουμε τρεις συναφείς ομάδες γεννητριών).

- iii. Κατασκευάζεται ο πίνακας  $X \in \mathcal{R}^{39 \times 3}$  ο οποίος έχει ως στήλες τα ιδιοδιανύσματα  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  και σειρές  $x_i, i = 1, 2, \dots, 39$ . Με τη χρήση αυτών των ιδιοδιανυσμάτων δίνονται γεωμετρικές συντεταγμένες για τους κόμβους του γράφου  $v_i \in V$  στον 3-διάστατο Ευκλείδειο χώρο, αυτό σημαίνει ότι τα διανύσματα  $x_i$  αποτελούν τις συντεταγμένες των κόμβων στον Ευκλείδειο χώρο  $\mathcal{R}^3$ .
- iv. Καθορίζονται, όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.3.2**, τα “κεντροειδή”  $x_i^{GN} \in X_{GN}$  (κόκκινα σημεία) στο χώρο  $\mathcal{R}^3$ , που είναι στην ουσία τα σημεία που αντιστοιχούν στους κόμβους των γεννητριών στο χώρο  $\mathcal{R}^3$ . Τα υπόλοιπα σημεία (μπλε σημεία)  $x_i^{LD} \in X \setminus X_{GN}$  ανήκουν στους κόμβους φορτίων του γράφου  $G_s$ .



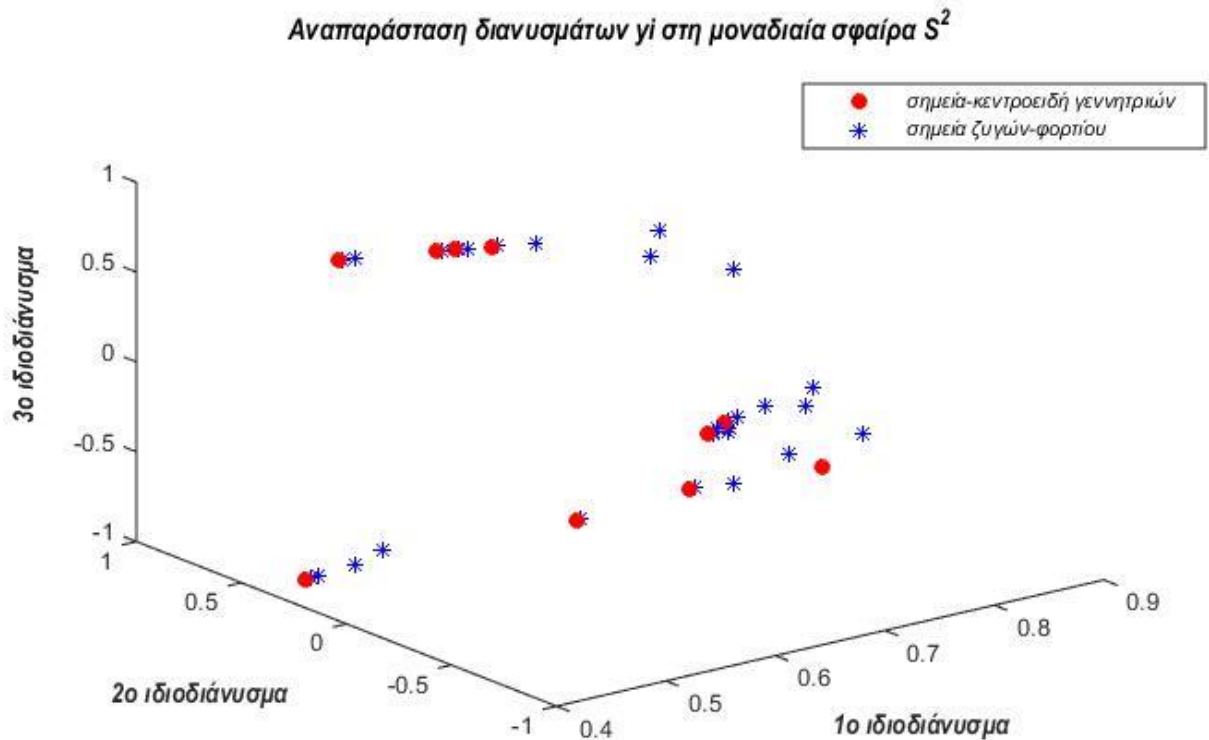
**Σχήμα 4.3.2:** Φασματική ενσωμάτωση (spectral embedding) των κόμβων του δικτύου 39 ζυγών στον τρισδιάστατο Ευκλείδειο χώρο.

- v. Για να βελτιωθεί η ποιότητα της λύσης, κανονικοποιούνται τα διανύσματα  $x_i, i = 1, 2, \dots, 39$ , έτσι ώστε να έχουν μήκος ίσο με τη μονάδα πριν χρησιμοποιηθούν από την οποιαδήποτε τεχνική ομαδοποίησης. Οπότε ορίζουμε τα διανύσματα  $y_i := \frac{x_i}{\|x_i\|}, i = 1, 2, \dots, 39$ , που στην ουσία προβάλλουν τα διανύσματα  $x_i$  στην μοναδιαία δισδιάστατη  $(r - 1)$  σφαίρα (κύκλος)  $S^2 = \{y_i \in \mathcal{R}^3: \|y_i\| = 1\}$ . Έτσι σχηματίζεται ο πίνακας  $Y \in \mathcal{R}^{39 \times 3}$  του οποίου οι σειρές  $y_i, i =$



1,2 ...,39 αναπαριστούν τους κόμβους του γράφου  $v_i \in V$  σαν σημεία στην  $S^{r-1}$ , όπως φαίνεται και στο **σχήμα 4.3.3**.

**vi.** Καθορίζονται τα “κεντροειδή”  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$  στην  $S^2$  (κόκκινα σημεία στο **σχήμα 4.3.3**) που είναι στην ουσία τα σημεία που αντιστοιχούν στους κόμβους των γεννητριών και τα υπόλοιπα σημεία  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  ανήκουν στους κόμβους φορτίων του γράφου  $G_S$  (μπλε αστερίσκοι).



**Σχήμα 4.3.3:** Απεικόνιση των κόμβων του δικτύου 39 ζυγών στην επιφάνεια μοναδιαίας δισδιάστατης σφαίρας  $S^3$

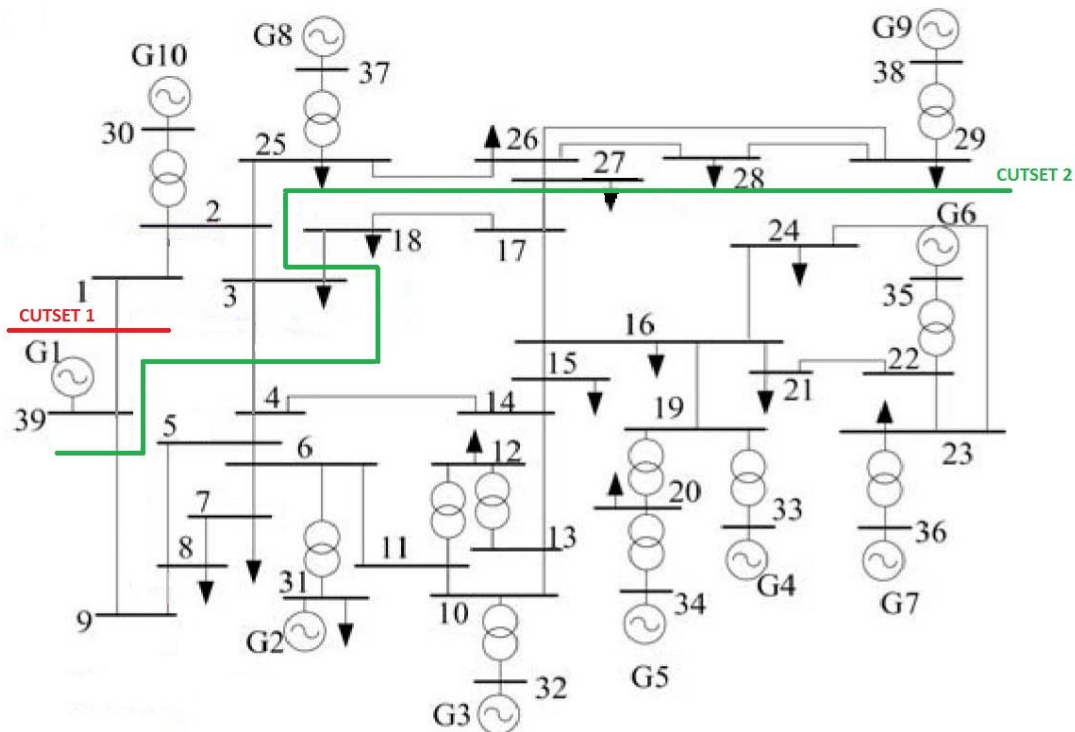
**vii.** Κατασκευάζεται ο πίνακας ομοιότητας(similarity matrix)  $C$ . Τα στοιχεία αυτού του πίνακα είναι οι Ευκλείδειες αποστάσεις ανάμεσα στα σημεία ζυγών φορτίου  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  και στα σημεία-“κεντροειδή” των γεννητριών  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$ .

**viii.** Συσχετίζεται το κάθε σημείο ζυγού-φορτίου  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  με το πλησιέστερο του “κεντροειδές”  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$ . Οι ομάδες ζυγών-φορτίου που προκύπτουν φαίνονται στον **πίνακα 4.3.1** όπου παρουσιάζονται οι ζυγοί φορτίου μαζί με τον πιο κοντινό σε κάθε μια από αυτές ζυγό γεννήτριας.

**Πίνακας 4.3.1:** Αντιστοίχιση ζυγού φορτίου με ζυγό γεννήτριας

Ζυγός φορτίου	Ζυγός γεννήτριας	10	32	21	34
1	30	11	32	22	35
2	30	12	32	23	36
3	30	13	32	24	36
4	32	14	32	25	37
5	31	15	33	26	38
6	31	16	33	27	38
7	31	17	33	28	38
8	31	18	33	29	38
9	31	19	33		
		20	34		

**ix.** Στο τελικό βήμα δημιουργούνται τα νησιά συγχωνεύοντας τις ομάδες των γεννητριών που προέκυψαν στο προηγούμενο βήμα με βάση τις συναφείς ομάδες γεννητριών. Οι συναφείς ομάδες είναι {39} {37,38,30} και {31,32,33,34,35,36}, τα τελικά νησιά που προκύπτουν είναι τρία, περιέχουν τους εξής κόμβους  $V_1 = \{39\}$ ,  $V_2 = \{1,2,3,25,26,27,28,29,30,37,38\}$  και  $V_3 = \{4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,31,32,33,34,35,36\}$ , και φαίνονται στο **σχήμα 4.3.4**. Στον παρακάτω **πίνακα 4.3.2** φαίνονται οι γραμμές του δικτύου που θα αποσυνδεθούν (cutset), προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ελεγχόμενη νησιδοποίηση, και η ροή ισχύος που κάθε μία από αυτές τις γραμμές έχει. Στον **πίνακα 4.3.3** παρουσιάζονται τα νησιά που δημιουργούνται, με τους κόμβους τους και οι τιμές της παραγωγής και της κατανάλωσης ενεργού ισχύος P(MW), σε κάθε νησί.



**Σχήμα 4.3.4:** Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση για το δίκτυο 39 ζυγών με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με περιορισμούς

**Πίνακας 4.3.2:** Αποσυνδεδεμένες γραμμές και ροή ισχύος σε αυτές

A/A Ανοιγμένης Γραμμής (cutset)	Κόμβος $i$	Κόμβος $j$	Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)
1	1	39	76.07
2	3	4	37.26
3	3	18	40.77
4	9	39	27.98
5	17	27	24.63

**Πίνακας 4.3.3:** Παραγωγή και κατανάλωση ενεργού ισχύος σε κάθε νησίδα

Νησίδες	Παραγωγή Ενεργού Ισχύος $P(MW)$	Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος $P(MW)$	Απόλυτη Τιμή Διαφοράς Παραγωγής & Κατανάλωσης
$V_1 = \{39\}$	1000	1104	104
$V_2 = \{1,2,3,25,26,27,28, 29,30,37,38\}$	1620	1553.1	66.9
$V_3 = \{4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17, 18,19,20,21,22,23,24,31,32,33,34,35,36\}$	3677.9	3597.1	80.8

Προκειμένου να αξιολογηθεί η ποιότητα των νησιών που δημιουργούνται θα υπολογιστούν τα μεγέθη 'cut' και 'volume' και το μέγεθος  $\phi_k$  για κάθε νησί:

**Για την νησίδα  $V_1$ :**

$$cut(V_1, \overline{V_1}) = \sum_{v_i \in V_1, v_j \in \overline{V_1}} w_{ij} = 104.04 \text{ MW},$$

$$vol(V_1) = \sum_{v_i \in V_1} d_i = 104.04 \text{ MW}$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_1 = 1 - \frac{cut(V_1, \overline{V_1})}{vol(V_1)} = 0$$

**Για την νησίδα  $V_2$ :**

$$cut(V_2, \overline{V_2}) = \sum_{v_i \in V_2, v_j \in \overline{V_2}} w_{ij} = 178.7 \text{ MW}, \text{ ενώ}$$

$$vol(V_2) = \sum_{v_i \in V_2} d_i = 6898.07 \text{ MW}$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_2 = 1 - \frac{cut(V_2, \overline{V_2})}{vol(V_2)} = 0.9741$$

**Για την νησίδα  $V_3$ :**

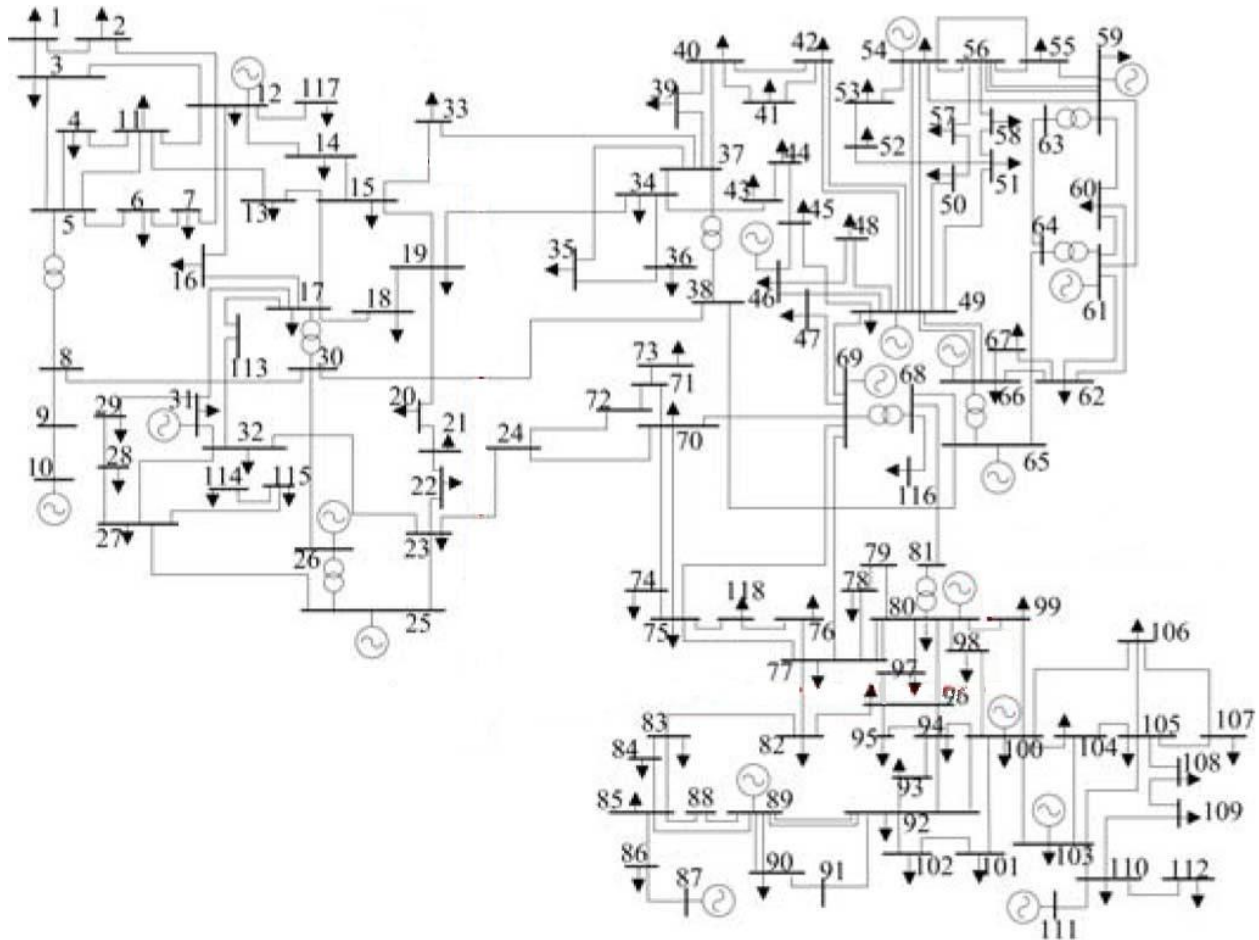
$$cut(V_3, \overline{V_3}) = \sum_{v_i \in V_3, v_j \in \overline{V_3}} w_{ij} = 130.61 \text{ MW}, \text{ ενώ}$$

$$vol(V_3) = \sum_{v_i \in V_3} d_i = 19637.44 \text{ MW}$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_3 = 1 - \frac{cut(V_3, \overline{V_3})}{vol(V_3)} = 0.9933$$

#### 4.4 Δίκτυο 118 ζυγών

Το δίκτυο αυτό των 118 ζυγών φαίνεται στο **σχήμα 4.4.1**, διαθέτει 54 ζυγούς γεννητριών, 65 ζυγούς φορτίων και 186 γραμμές μεταφοράς. Τα coherent groups σε αυτό το δίκτυο είναι τρία και συντελούνται από τους εξής ζυγούς γεννητριών το καθένα {10,12,25,26,31} {46,49,54,59,61,65,66,9,80} και {87,89,100,103,111}.

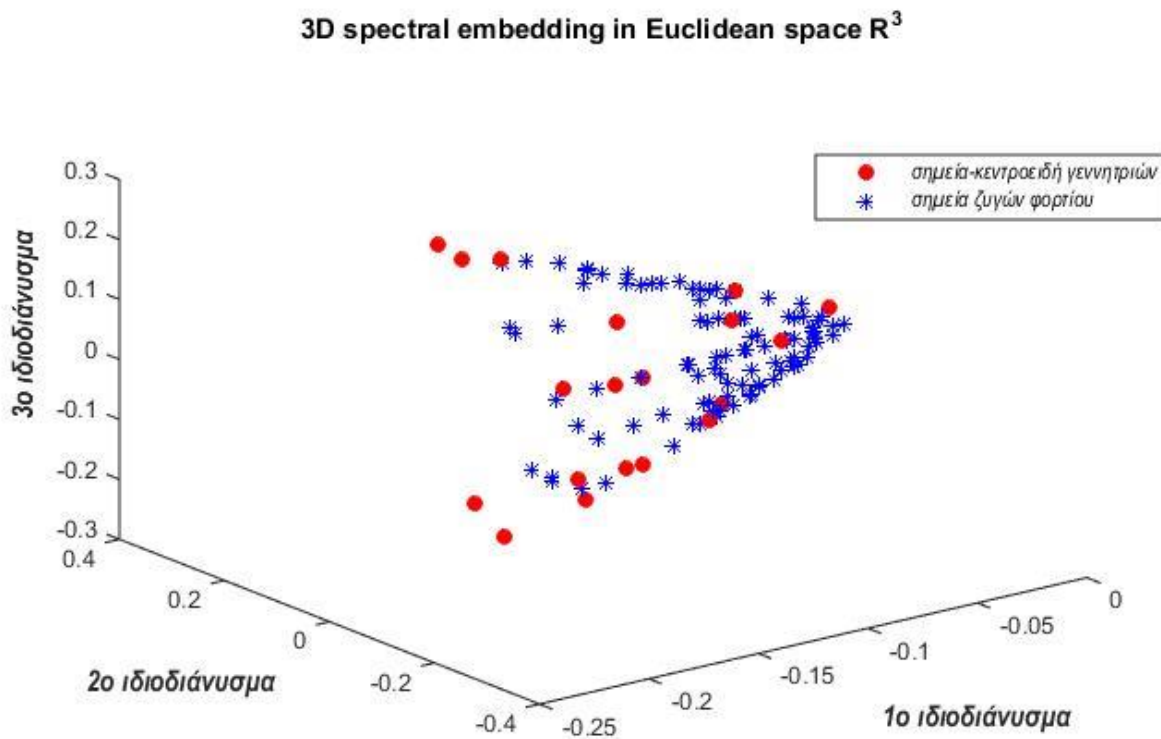


**Σχήμα 4.4.1:** Τοπολογία δικτύου 118 ζυγών

Μέσω του matpower εισάγονται τα στοιχεία του δικτύου στον αλγόριθμο και ακολουθούν τα εξής βήματα:

- i. Κατασκευάζεται ο στατικός γράφος  $G_S$  ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου και τα βάρη των ακμών του καθορίζονται ως  $(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2$ . Ο πίνακας γειτνίασης είναι  $W = [w_{ij}]$  και ο διαγώνιος πίνακας βαθμών  $D = [d_i]$ .

- ii. Με τη χρήση του πίνακα γειτνίασης  $W$  κατασκευάζεται ο κανονικοποιημένος πίνακας Laplace  $L_N$  και υπολογίζονται τα  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις μικρότερες 3 ιδιοτιμές του (έχουμε τρεις συναφείς ομάδες γεννητριών).
- iii. Κατασκευάζεται ο πίνακας  $X \in \mathcal{R}^{118 \times 3}$  ο οποίος έχει ως στήλες τα ιδιοδιανύσματα  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  και σειρές  $x_i, i = 1, 2 \dots, 118$ . Με τη χρήση αυτών των ιδιοδιανυσμάτων δίνονται γεωμετρικές συντεταγμένες για τους κόμβους του γράφου  $v_i \in V$  στον 3-διάστατο Ευκλείδειο χώρο, αυτό σημαίνει ότι τα διανύσματα  $x_i$  αποτελούν τις συντεταγμένες των κόμβων στον Ευκλείδειο χώρο  $\mathcal{R}^3$ .
- iv. Καθορίζονται, όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.4.2**, τα “κεντροειδή”  $x_i^{GN} \in X_{GN}$  (κόκκινα σημεία) στο χώρο  $\mathcal{R}^3$ , που είναι στην ουσία τα σημεία που αντιστοιχούν στους κόμβους των γεννητριών στο χώρο  $\mathcal{R}^3$ . Τα υπόλοιπα σημεία (μπλε σημεία)  $x_i^{LD} \in X \setminus X_{GN}$  ανήκουν στους κόμβους φορτίων του γράφου  $G_S$ .

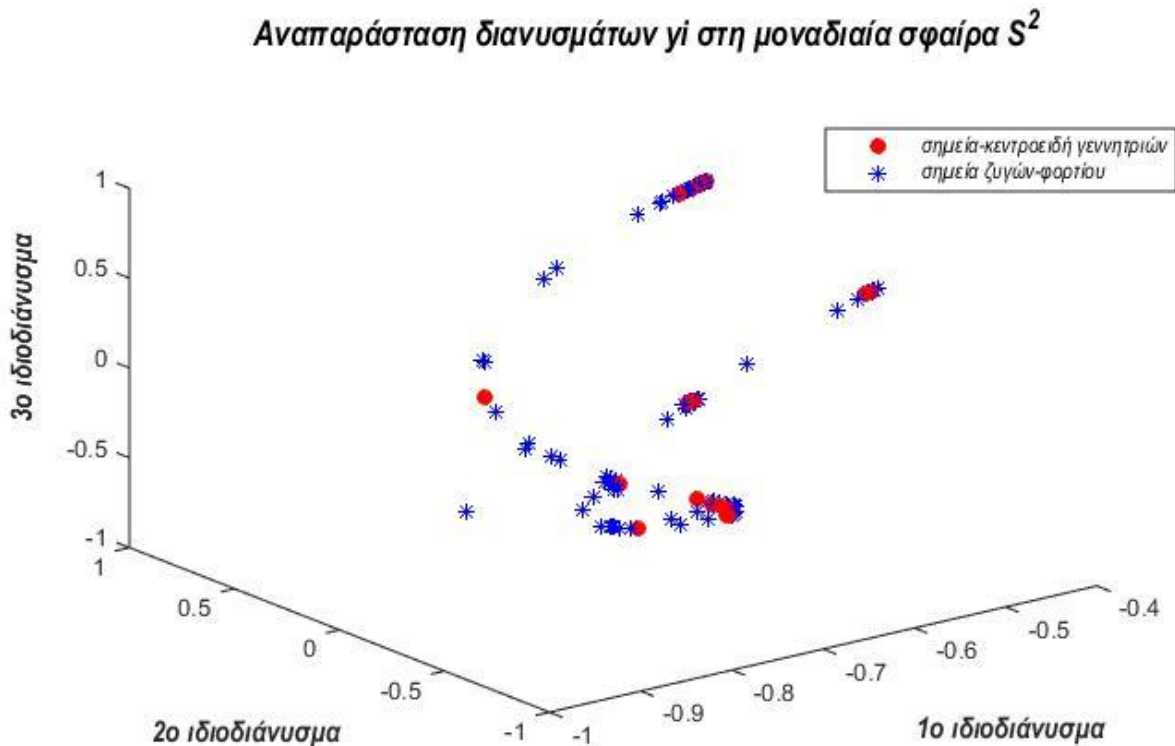


**Σχήμα 4.4.2:** Φασματική ενσωμάτωση (spectral embedding) των κόμβων του δικτύου 39 ζυγών στον τρισδιάστατο Ευκλείδειο χώρο.

- v. Για να βελτιωθεί η ποιότητα της λύσης, κανονικοποιούνται τα διανύσματα  $x_i, i = 1, 2 \dots, 118$ , έτσι ώστε να έχουν μήκος ίσο με τη μονάδα πριν χρησιμοποιηθούν από την

οποιαδήποτε τεχνική ομαδοποίησης. Οπότε ορίζουμε τα διανύσματα  $y_i := \frac{x_i}{\|x_i\|}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 118$ , που στην ουσία προβάλλουν τα διανύσματα  $x_i$  στην μοναδιαία δισδιάστατη  $(r - 1)$  σφαίρα (κύκλος)  $S^2 = \{y_i \in \mathcal{R}^3: \|y_i\| = 1\}$ . Έτσι σχηματίζεται ο πίνακας  $Y \in \mathcal{R}^{118 \times 3}$  του οποίου οι σειρές  $y_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 118$  αναπαριστούν τους κόμβους του γράφου  $v_i \in V$  σαν σημεία στην  $S^{r-1}$ , όπως φαίνεται και στο **σχήμα 4.4.3**.

- vi. Καθορίζονται τα “κεντροειδή”  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$  στην  $S^2$  (κόκκινα σημεία στο **σχήμα 4.4.3**) που είναι στην ουσία τα σημεία που αντιστοιχούν στους κόμβους των γεννητριών και τα υπόλοιπα σημεία  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  ανήκουν στους κόμβους φορτίων του γράφου  $G_S$  (μπλε αστερίσκοι).



**Σχήμα 4.4.3:** Απεικόνιση των κόμβων του δικτύου 39 ζυγών στην επιφάνεια μοναδιαίας δισδιάστατης σφαίρας  $S^3$

- vii. Κατασκευάζεται ο πίνακας ομοιότητας (similarity matrix)  $C$ . Τα στοιχεία αυτού του πίνακα είναι οι Ευκλείδειες αποστάσεις ανάμεσα στα σημεία ζυγών φορτίου  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  και στα σημεία-“κεντροειδή” των γεννητριών  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$ .
- viii. Συσχετίζεται το κάθε σημείο ζυγού-φορτίου  $y_i^{LD} \in Y \setminus Y_{GN}$  με το πλησιέστερο του “κεντροειδές”  $y_i^{GN} \in Y_{GN}$ . Οι ομάδες ζυγών-φορτίου που προκύπτουν φαίνονται στον **πίνακα 4.4.1** όπου παρουσιάζονται οι ζυγοί φορτίου μαζί με τον πιο κοντινό σε κάθε μια από αυτές ζυγό

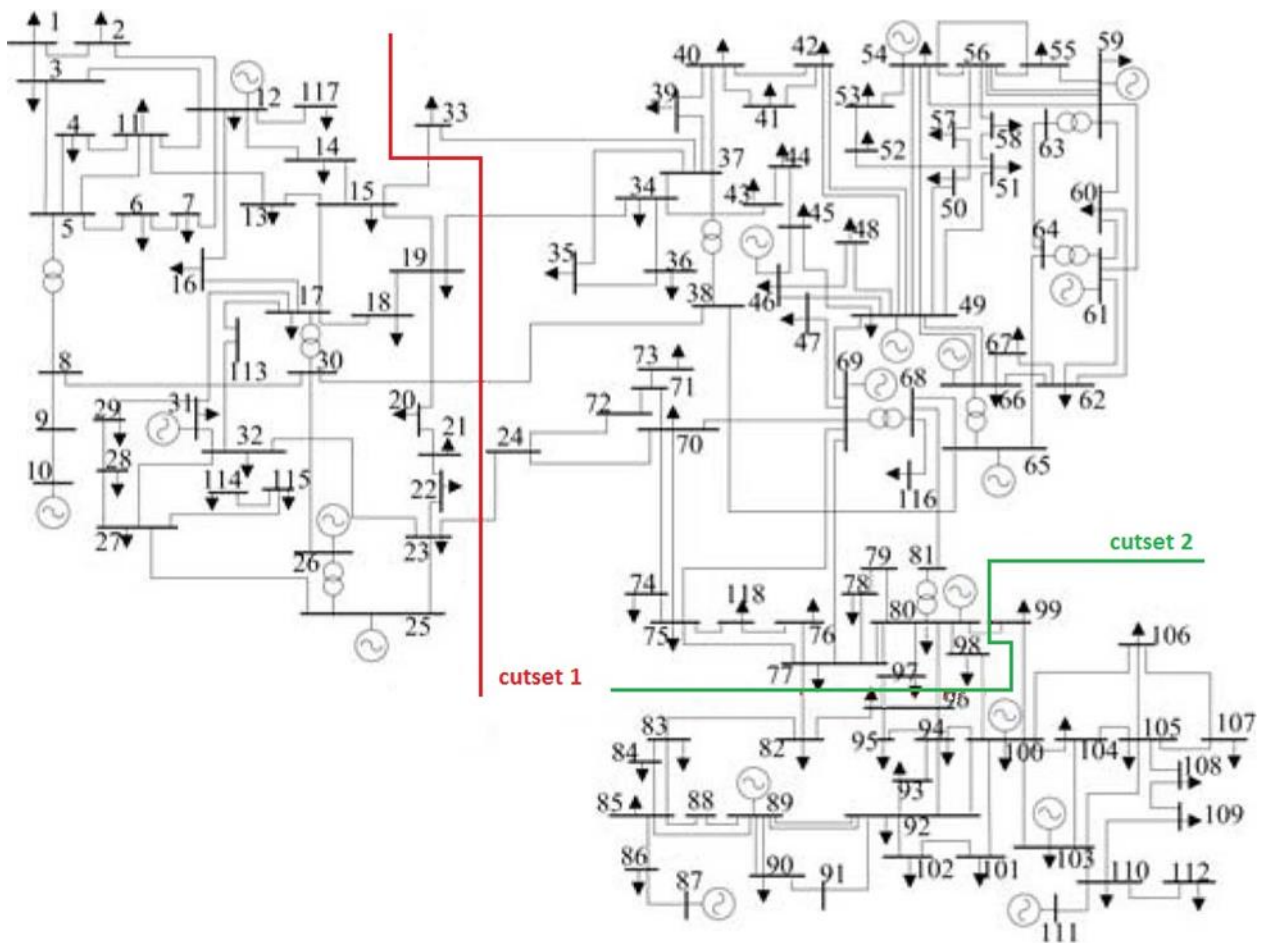
γεννήτριας. Από τη στιγμή λοιπόν που έχουμε δέκα κόμβους γεννητριών που ορίζονται σαν κεντροειδή θα έχουμε και δέκα ομάδες, με μία γεννήτρια και τους πιο κοντινούς σε αυτή κόμβους-φορτίου η κάθε ομάδα.

**Πίνακας 4.4.1:** Αντιστοίχιση ζυγών φορτίου με ζυγούς γεννήτριας

<b>Ζυγός φορτίου</b>	<b>Ζυγός γεννήτριας</b>				
		38	65	81	69
		39	65	82	100
		40	65	83	100
1	10	41	59	84	103
2	10	42	54	85	103
3	10	43	49	86	89
4	10	44	49	88	87
5	10	45	49	90	87
6	10	47	69	91	103
7	10	48	49	92	100
8	12	50	66	93	100
9	12	51	49	94	100
11	10	52	66	95	100
13	10	53	66	96	100
14	12	55	61	97	80
15	26	56	54	98	80
16	31	57	66	99	100
17	25	58	66	101	103
18	26	60	61	102	103
19	26	62	54	104	103
20	26	63	59	105	103
21	26	64	65	106	103
22	26	67	66	107	103
23	26	68	69	108	87
24	65	70	69	109	111
27	31	71	69	110	87
28	31	72	69	112	111
29	31	73	69	113	25
30	26	74	69	114	31
32	25	75	69	115	31
33	65	76	69	116	69
34	65	77	69	117	10
35	65	78	80	118	69
36	65	79	80		
37	65				



ix. Στο τελικό βήμα συγχωνεύονται οι παραπάνω ομάδες των κόμβων που προέκυψαν στο προηγούμενο βήμα με βάση τις συναφείς ομάδες γεννητριών. Οι συναφείς ομάδες γεννητριών είναι  $\{10,12,25,26,31\}$ ,  $\{46,49,54,59,61,65,66,9,80\}$  και  $\{87,89,100,103,111\}$ , τα τελικά νησιά που προκύπτουν είναι τρία και περιέχουν τους εξής κόμβους  $V_1 = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,25,26,27,28,29,30,31,32,113,114,115,117\}$ ,  $V_2 = \{24,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,97,98,116,118\}$  και  $V_3 = \{82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,99,100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111,112\}$ , και φαίνονται στο **σχήμα 4.4.4**. Στον παρακάτω **πίνακα 4.4.2** φαίνονται οι γραμμές του δικτύου που θα αποσυνδεθούν (cutset), προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ελεγχόμενη νησιδοποίηση, και η ροή ισχύος που κάθε μία από αυτές τις γραμμές έχει. Στον **πίνακα 4.4.3** παρουσιάζονται τα νησιά που δημιουργούνται, με τους κόμβους τους και οι τιμές της παραγωγής και της κατανάλωσης ενεργού ισχύος P(MW), σε κάθε νησί.



**Σχήμα 4.4.4:** Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση για το δίκτυο 39 ζυγών με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με περιορισμούς

**Πίνακας 4.4.2:** Αποσυνδεδεμένες γραμμές και ροή ισχύος σε αυτές

A/A Αποσυνδεδεμένης Γραμμής (cutset)	Κόμβος i	Κόμβος j	Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)
1	23	24	8.27
2	15	33	7.29
3	19	34	3.62
4	30	38	62.22
5	77	82	3.10
6	80	96	18.82
7	80	99	19.46
8	96	97	11.14
9	98	100	5.27

**Πίνακας 4.4.3:** Παραγωγή και κατανάλωση ενεργού ισχύος σε κάθε νησίδα

Νησίδες	Παραγωγή Ενεργού Ισχύος P(MW)	Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος P(MW)	Απόλυτη Τιμή Διαφοράς Παραγωγής & Κατανάλωσης
$V_1 = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,25,26,27,28,29,30,31,32,113,114,115,117\}$	1076	963	113
$V_2 = \{24,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,97,98,116,118\}$	2359.86	2333	26.86
$V_3 = \{82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,99,100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111,112\}$	939	946	7

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την ποιότητα των νησιών που δημιουργούνται θα υπολογίσουμε τα μεγέθη 'cut' και 'volume' και το μέγεθος  $\phi_k$  για κάθε νησί:

**Για την νησίδα  $V_1$ :**

$$cut(V_1, \bar{V}_1) = \sum_{v_i \in V_1, v_j \in \bar{V}_1} w_{ij} = 81.4 \text{ MW},$$

$$vol(V_1) = \sum_{v_i \in V_1} d_i = 6940.4 \text{ MW}$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_1 = 1 - \frac{cut(V_1, \bar{V}_1)}{vol(V_1)} = 0.9883$$

### Για την νησίδα $V_2$ :

$$cut(V_2, \bar{V}_2) = \sum_{v_i \in V_2, v_j \in \bar{V}_2} w_{ij} = 139.19 MW, \text{ ενώ}$$

$$vol(V_2) = \sum_{v_i \in V_2} d_i = 7748.78 MW$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_2 = 1 - \frac{cut(V_2, \bar{V}_2)}{vol(V_2)} = 0.982$$

### Για την νησίδα $V_3$ :

$$cut(V_3, \bar{V}_3) = \sum_{v_i \in V_3, v_j \in \bar{V}_3} w_{ij} = 57.79 MW, \text{ ενώ}$$

$$vol(V_3) = \sum_{v_i \in V_3} d_i = 3263.12 MW$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_3 = 1 - \frac{cut(V_3, \bar{V}_3)}{vol(V_3)} = 0.982$$

## 4.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόστηκε όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος φασματικής ομαδοποίησης με τη χρήση της μεθόδου φασματικής ενσωμάτωσης για την ομαδοποίηση των δεδομένων, και τον περιορισμό των ομάδων συναφών γεννητριών, πάνω στα ίδια τρία δίκτυα της IEEE. Ο πυρήνας αυτής της μεθόδου είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελάχιστη διαταραχή ροής ισχύος (minimal power-flow disruption), έτσι πετυχαίνεται βελτιωμένη μεταβατική ευστάθεια των νησιών που δημιουργούνται, μειώνεται η πολυπλοκότητα του προβλήματος βελτιστοποίησης και δημιουργείται ένας αλγόριθμος υπολογιστικά εφικτός και αποδοτικός. Η ενσωμάτωση του περιοριστικού παράγοντα των ομάδων συναφών γεννητριών, εμποδίζει τη δημιουργία νησιών που περιέχουν μη συγχρονισμένες γεννήτριες ή απομονωμένα φορτία.

Μετά τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος αυτός είναι υπολογιστικά αποδοτικός και ενδείκνυται για εφαρμογή σε πραγματικούς χρόνους, όπως παρουσιάζεται στον **πίνακα 4.5.1**, αλλά και για εφαρμογή σε μεγάλα δίκτυα μεταφοράς.

Ελέγχεται το ισοζύγιο παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος σε κάθε νησίδα αλλά δεν ελέγχεται το ισοζύγιο άεργου ισχύος καθώς γίνεται η παραδοχή ότι η ροή αυτής, μπορεί να αντισταθμιστεί με την έγχυση άεργου ισχύος από πυκνωτικές συστοιχίες.

**Πίνακας 4.5.1:** Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμου για όλα τα δίκτυα

<b>Δίκτυο</b>	<b>Χρόνος εκτέλεσης αλγορίθμου (seconds)</b>
<b>9 ζυγών</b>	≈ 0.74
<b>39 ζυγών</b>	≈ 0.93
<b>118 ζυγών</b>	≈ 1.33

Παρατηρείται ότι η μέθοδος φασματικής ομαδοποίησης με τη χρήση της μεθόδου φασματικής ενσωμάτωσης είναι υπολογιστικά αποδοτικότερη από την μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με τη χρήση του πίνακα προβολών. Αυτό είναι λογικό διότι η μέθοδος φασματικής ομαδοποίησης με τη χρήση της μεθόδου φασματικής ενσωμάτωσης μπορεί να διαχωρίσει πολλές νησίδες με την πρώτη επανάληψη και δεν επιστρατεύεται τη μέθοδο αναδρομικής διχοτόμησης. Επίσης στην υπολογιστική αποδοτικότητα της μεθόδου, συμβάλλει το γεγονός ότι δε χρησιμοποιεί επαναληπτικούς αλγορίθμους (kmeans).

Στον παρακάτω **πίνακα 4.5.2** φαίνονται τα μεγέθη ‘cut’, ‘volume’ και  $\phi$  που αντιστοιχούν στις νησίδες του κάθε δικτύου

**Πίνακας 4.5.2:** Μεγέθη αξιολόγησης νησίδων

<b>Δίκτυο</b>	<b>Νησίδες</b>	<b>cut(MW)</b>	<b>vol(MW)</b>	<b><math>\phi</math></b>
<b>9 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	71.74	215.64	0.67
	<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	71.74	1059.22	0.93
<b>39 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	104.04	104.04	0
	<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	178.7	6898.07	0.97
	<b>3<sup>η</sup> νησίδα</b>	130.61	19637.44	0.993
<b>118 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	81.4	6940.4	0.988
	<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	139.19	7748.78	0.982
	<b>3<sup>η</sup> νησίδα</b>	57.79	3263.12	0.982

Ο συντελεστής  $\phi$  μετρά τη συνδεσιμότητα μιας νησίδας, σε σχέση με το μέγεθος της. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο συντελεστής η νησίδα θεωρείται “μη ισχυρά” συνδεδεμένη με το υπόλοιπο δίκτυο, άρα τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα της και τότε θεωρείται καλή λύση

νησιδοποίησης. Αυτό συμβαίνει διότι καθώς ο συντελεστής αυτός πλησιάζει τη μονάδα, τότε η διαταραχή της ροής ισχύος της νησίδας μικραίνει ενώ η ροή ισχύος το εσωτερικό της αυξάνεται. Όπως αξιολογείται από τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.5.2**, η μέθοδος φασματικής ομαδοποίησης με τη χρήση της φασματικής ενσωμάτωσης, παράγει νησίδες παρόμοιες με αυτές της μεθόδου φασματικής ομαδοποίησης με τη χρήση του πίνακα προβολών. Οι νησίδες που προτείνονται για το δίκτυο 9 είναι ακριβώς ίδιες, για το δίκτυο 118 ζυγών είναι ίδιας ποιότητας, σύμφωνα με το συντελεστή  $\phi$ , αλλά παρουσιάζουν μια μικρή διαφορά στους ζυγούς. Όσον αφορά το δίκτυο των 39 ζυγών οι νησίδες που προτείνει η μέθοδος φασματικής ομαδοποίησης με τη χρήση της φασματικής ενσωμάτωσης είναι χαμηλότερης ποιότητας, σύμφωνα με το συντελεστή  $\phi$ , σε σχέση με αυτές της μεθόδου φασματικής ομαδοποίησης με τη χρήση του πίνακα προβολών.



# 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και βαρυτικής αναζήτησης

## 5.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα δύο κεφάλαια χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι νησιδοποίησης οι οποίες βασίζονται στη φασματική ομαδοποίηση. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί και θα εφαρμοστεί (στα ήδη υπάρχοντα τρία πρότυπα δίκτυα της IEEE των 9, των 39 και των 118 ζυγών), ένας αλγόριθμος που συνδυάζει χαρακτηριστικά του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) και του αλγορίθμου βαρυτικής αναζήτησης (GSA). Στην πραγματικότητα, ο αλγόριθμος αυτός (PSOGSA) προτάθηκε για να αντιμετωπιστεί η βραδεία εκμετάλλευση του αλγορίθμου βαρυτικής αναζήτησης, το οποίο προσδιορίστηκε να είναι ένα από τα κύρια μειονεκτήματα του. Κάποιες φορές ωστόσο τα προβλήματα έχουν δυαδικές παραμέτρους, στην περίπτωση αυτή όπως και τώρα χρησιμοποιείται η δυαδική μορφή του αλγορίθμου (BPSOGSA). Ο υβριδικός αυτός αλγόριθμος PSOGSA προτάθηκε από τον Mirjalili S, Hashim [6]. Η βασική ιδέα του είναι ο συνδυασμός της κοινωνικής σκέψης (gbest) του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων με την ικανότητα εξερεύνησης του αλγορίθμου βαρυτικής αναζήτησης.

Μαθηματικά μοντελοποιείται ως εξής:

Όπως και στους αλγορίθμους σμήνους σωματιδίων και βαρυτικής αναζήτησης, κάθε πράκτορας αναζήτησης διαθέτει ένα διάνυσμα θέσης που αντικατοπτρίζει την τρέχουσα θέση του,  $\vec{X}_i = (x_i^1, \dots, x_i^d)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  όπου  $N$  ο αριθμός των πρακτόρων,  $d$  η διάσταση του προβλήματος και  $x_i^d$  η θέση του  $i$  πράκτορα στην  $d$  διάσταση.

Οπότε ολόκληρος ο πληθυσμός απεικονίζεται στον παρακάτω πίνακα  $\vec{X}$  και υπάρχει και ένας πίνακας  $\vec{O}$  στον οποίο αποθηκεύεται η τιμή του κάθε πράκτορα

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \dots & x_1^d \\ x_2^1 & x_2^2 & \dots & x_2^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \dots & x_n^d \end{bmatrix}, \quad \vec{O} = \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ \vdots \\ o_n \end{bmatrix}$$

Η διαδικασία βελτιστοποίησης ξεκινά συμπληρώνοντας τον πίνακα θέσεων  $\vec{X}$  με τυχαίες τιμές και στη συνέχεια υπολογίζεται η βαρυτική έλξη από τον πράκτορα  $j$  στον πράκτορα  $i$ , σε καθορισμένη χρονική στιγμή  $t$  από τον τύπο

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (1.1)$$

όπου  $M_{aj}$  η ενεργός βαρυτική δύναμη του πράκτορα  $j$ ,  $M_{pi}$  η παθητική βαρυτική δύναμη του πράκτορα  $i$ ,  $\varepsilon$  μία μικρή σταθερά,  $R_{ij}$  η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των πρακτόρων  $j$  και  $i$  και  $G(t) = G_0 \times \exp(-a \times \text{iter}/\text{maxiter})$  η βαρυτική σταθερά,  $a$  ένας φθίνων συντελεστής,  $G_0$  την αρχική βαρυτική σταθερά,  $\text{iter}$  η εκάστοτε επανάληψη και  $\text{maxiter}$  ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων.

Σε ένα χωρικό πρόβλημα  $d$  διαστάσεων, η συνολική δύναμη που ασκείται στον πράκτορα  $i$  δίνεται από τον τύπο

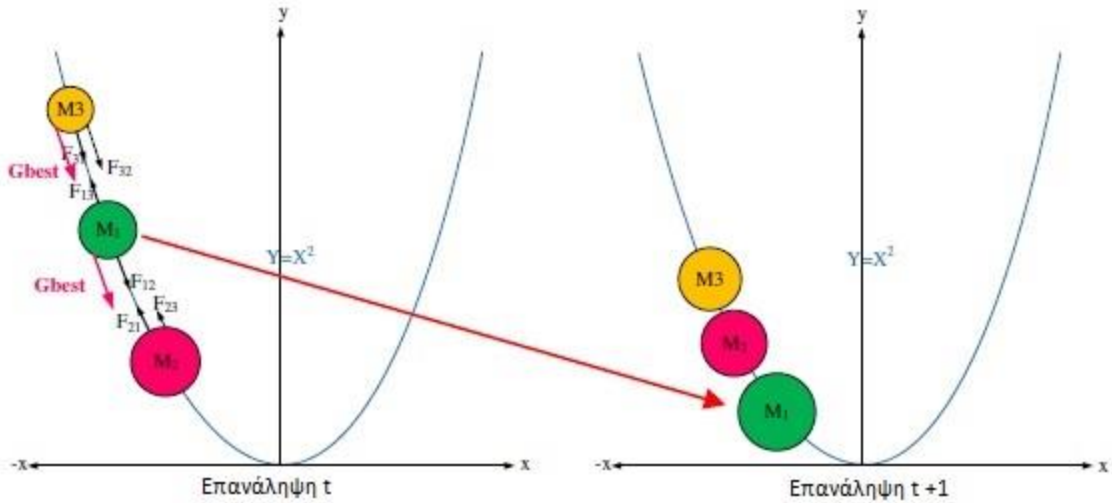
$$F_i^d = \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{rand}_j F_{ij}^d(t)$$

όπου  $\text{rand}_j$  ένας τυχαίος αριθμός που παράγεται με ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[0,1]$ . Στην συνέχεια χρησιμοποιείται ο νόμος της ταχύτητας (2<sup>ος</sup> νόμος του Νεύτωνα) προκειμένου να υπολογιστεί η επιτάχυνση όλων των πρακτόρων

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)}$$

όπου  $d$  η διάσταση του προβλήματος,  $t$  η χρονική στιγμή και  $M_{ii}$  η αδρανειακή μάζα του πράκτορα  $i$ . Κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, σε κάθε επανάληψη η καλύτερη λύση αποθηκεύεται στη μεταβλητή  $g_{best}$ , η κίνηση αυτή έχει εμπνευστεί από τον αλγόριθμο σμήνους σωματιδίων (PSO) και ταυτόχρονα είναι αυτή η κίνηση που βελτιώνει την απόδοση του αλγορίθμου αυτού (PSOGSA) σε σχέση με τον αλγόριθμο βαρυτικής αναζήτησης (GSA). Οι κινήσεις μαζών υπολογίζονται με βάση τα βάρη τους, και τα βάρη τους υπολογίζονται άμεσα από την αντικειμενική συνάρτηση, η οποία κάθε φορά διαφέρει ανάλογα με το πρόβλημα επίλυσης. Έτσι, οι μάζες που έχουν καλύτερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας θεωρούνται “βαριά” αντικείμενα. Ο αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων και βαρυτικής αναζήτησης (PSOGSA), όπως παρουσιάζεται και στο **σχήμα 5.1.1** χρησιμοποιεί την καλύτερη λύση κάθε φορά προκειμένου να κατευθύνει τις “βαριές μάζες” προς το ολικό βέλτιστο. Έτσι επιταχύνεται η κίνηση των μαζών, βελτιώνοντας την ικανότητα εκμετάλλευσης του αλγορίθμου σε σχέση με τον απλό αλγόριθμο βαρυτικής αναζήτησης ο οποίος χρησιμοποιεί σταθερά το ολικό βέλτιστο [6]. Στο σχήμα 4.1.1 απεικονίζεται η κίνηση των μαζών για το απλό μονοδιάστατο πρόβλημα, όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι η  $Y = X^2$ , προς το ολικό βέλτιστο που είναι το ελάχιστο της συνάρτησης.





**Σχήμα 5.1.1:** Κίνηση των μαζών του αλγορίθμου PSO-GSA σε δύο επαναλήψεις

Μετά τον υπολογισμό της επιτάχυνσης και την ανανέωση της καλύτερης λύσης, υπολογίζονται οι ταχύτητες των πρακτόρων από τον τύπο

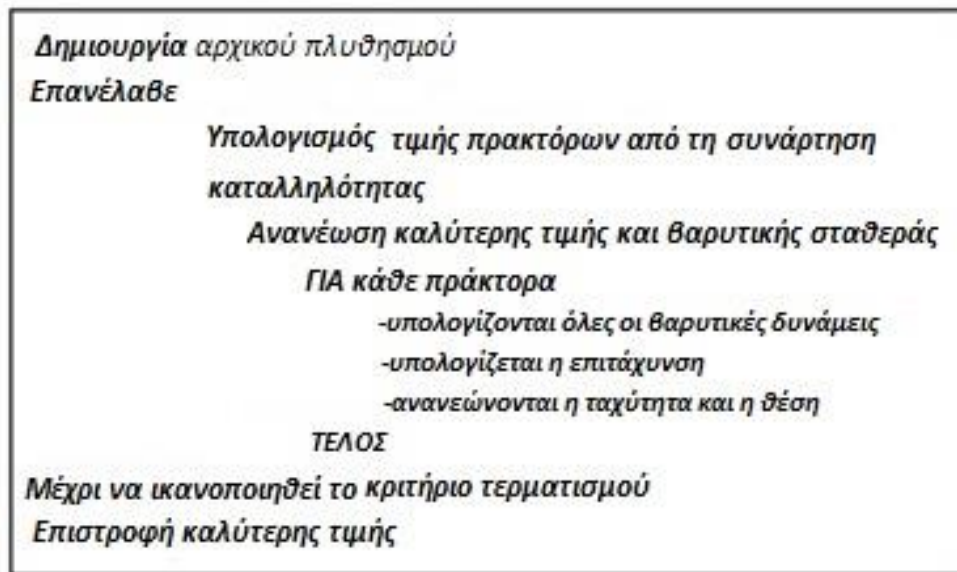
$$V_i(t + 1) = rand \times V_i(t) + c'_1 \times ac_1(t) + c'_2 \times (gbest - X_i(t))$$

όπου  $V_i(t)$  Η ταχύτητα του πράκτορα  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $c'_j$  ένας παράγοντας επιτάχυνσης,  $rand$  ένας τυχαίος αριθμός που παράγεται με ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[0,1]$ ,  $ac_1(t)$  η επιτάχυνση του πράκτορα  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$  και  $gbest$  η καλύτερη λύση μέχρι την εκάστοτε χρονική στιγμή.

Τέλος οι θέσεις των πρακτόρων ανανεώνονται από τον τύπο

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1) \quad (1.1)$$

Η διαδικασία ανανέωσης των ταχυτήτων και των θέσεων θα σταματήσει όταν συναντήσει μια παράμετρο τερματισμού, όπως για παράδειγμα ένας καθορισμένος αριθμός επαναλήψεων. Όλα τα βήματα τα οποία αναφέραμε παραπάνω φαίνονται συνοπτικά στο **σχήμα 5.1.2**

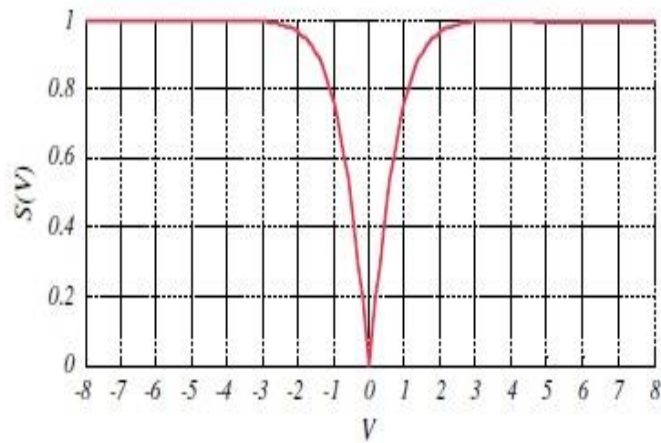


**Σχήμα 5.1.2:** Ψευδοκώδικας αλγορίθμου PSO-GSA

Στον πρότυπο αλγόριθμο(PSO-GSA), οι πράκτορες έχουν διανύσματα θέσης με συνεχείς πραγματικές μεταβλητές οπότε κινούνται στον πραγματικό χώρο. Στην περίπτωση της μελέτης ελεγχόμενης νησιδοποίησης οι μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν τις συνδεσμολογίες των γραμμών μεταφοράς είναι δυαδικές (0 για συνδεδεμένη γραμμή και 1 για αποσυνδεδεμένη), οπότε χρησιμοποιείται η δυαδική μορφή του αλγόριθμου. Οι πράκτορες στο δυαδικό αλγόριθμο κινούνται στο δυαδικό χώρο αναζήτησης, οπότε θα τροποποιείται το βήμα όπου πραγματοποιείται η ανανέωση της θέσης των πρακτόρων. Έναντι της σχέσης (1.1) χρησιμοποιείται ο κανόνας των *σχέσεων* (1.2). Μια συνάρτηση μεταφοράς πρέπει να αλλάζει τη θέση του πράκτορα με βάση την πιθανότητα της ταχύτητας του και θα αντιστοιχεί τις τιμές των ταχυτήτων με τις τιμές των πιθανοτήτων προκειμένου να κάνει ανανέωση των θέσεων, αυτό συμβαίνει με τη χρήση της συνάρτησης καταλληλότητας  $S(v_{i,j}^k(t)) = |\tanh(v_{i,j}^k(t))|$  που φαίνεται στο **σχήμα 5.1.3**. Το εύρος των τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας πρέπει να είναι μεταξύ 0 και 1 και πρέπει να είναι ικανή να παρέχει υψηλή πιθανότητα αλλαγής θέσης του πράκτορα όταν η απόλυτη τιμή της ταχύτητας του είναι υψηλή, έτσι αφότου υπολογιστούν οι πιθανότητες, οι πράκτορες ανανεώνουν τις θέσεις τους με βάση τον ακόλουθο κανόνα σχέσεων

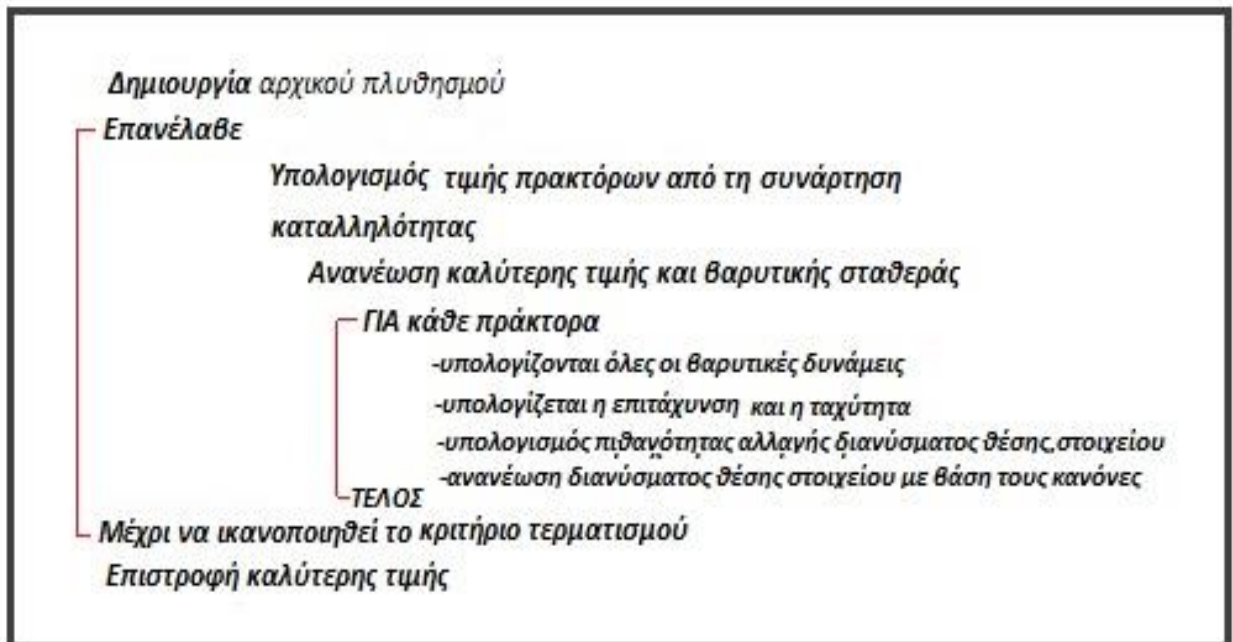
$$\text{An } rand < F(v_{i,j}^k(t+1)) \text{ τότε } x_{i,j}^k(t+1) = complement(x_{i,j}^k(t)) \quad (1.2)$$

$$\text{αλλιώς } x_{i,j}^k(t+1) = x_{i,j}^k(t)$$



**Σχήμα 5.1.3:** Εφαπτομένη υπερβολική συνάρτηση μεταφοράς

Τα βήματα του δυαδικού αλγορίθμου σμήνους σωματιδίων και βαρυτικής αναζήτησης (BPSOGSA) παρουσιάζονται εν συντομία στο **σχήμα 5.1.4**

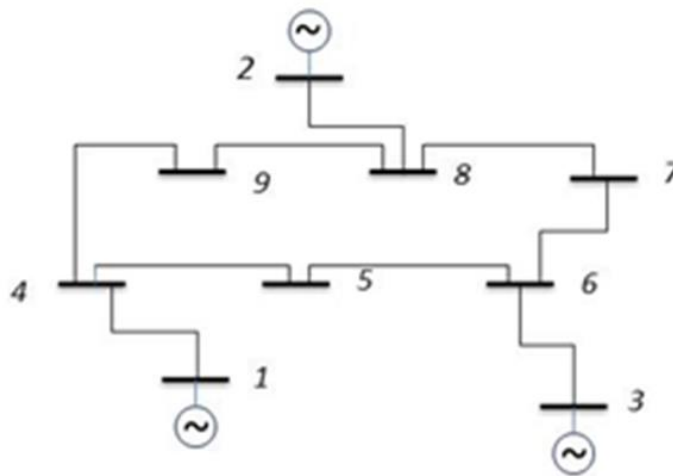


**Σχήμα 5.1.4:** Ψευδοκώδικας αλγορίθμου BPSOGSA

Στις επόμενες ενότητες αναπτύσσεται ο δυαδικός αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων και βαρυτικής αναζήτησης για τα τρία πρότυπα δίκτυα της IEEE των 9, των 39 και των 118 ζυγών και αναλύονται τα αποτελέσματα τους.

## 5.2 Δίκτυο 9 ζυγών

Το δίκτυο των 9 ζυγών φαίνεται στο **σχήμα 5.2.1**, διαθέτει 3 ζυγούς γεννητριών, 6 ζυγούς φορτίων 9 γραμμές μεταφοράς και γνωρίζουμε ήδη τις συναφείς ομάδες γεννητριών που αποτελούνται από τους ζυγούς γεννητριών {1} και {2,3}.



**Σχήμα 5.2.1:** Τοπολογία δικτύου 9 ζυγών

- i.* Κατασκευάζεται ο γράφος  $G = (V, E, \omega)$  όπου  $v_i \in V, i = 1, 2, \dots, 9$  και  $e_{ij} \in E \subset V \times V, i, j = 1, 2, \dots, 9$  οι κόμβοι και οι ακμές του αντίστοιχα ως  $1/[(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2]$ . Εδώ τροποποιούνται τα βάρη των ακμών του γράφου διότι στο επόμενο βήμα χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των πιο ισχυρών συνδέσεων, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω.
- ii.* Οι συναφείς ομάδες γεννητριών είναι δεδομένες και αποτελούνται από τους ζυγούς {1} και {2,3}. Σε κάθε ομάδα εντοπίζονται οι πιο ισχυρές συνδέσεις μεταξύ των γεννητριών, εντοπίζεται δηλαδή η αλληλουχία των κλάδων από τον κόμβο οποιασδήποτε γεννήτριας προς όλους τους κόμβους των γεννητριών της ίδιας ομάδας, με την υψηλότερη ανταλλαγή ενεργού ισχύος. Αυτό πραγματοποιείται στον γράφο  $G$  με τον εντοπισμό των διαδρομών με τα μικρότερα αθροίσματα βαρών. Στον **πίνακα 5.2.1** φαίνονται οι γραμμές οι οποίες δεν μπορούν να αποσυνδεθούν και θα αφαιρεθούν από το σύνολο των γραμμών που θα μελετηθούν στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

**Πίνακας 5.2.1.** Οι κόμβοι μεταξύ των οποίων οι συνδέσεις δεν μπορούν να διακοπούν για το δίκτυο των 39 ζυγών

Κόμβος $i$	Κόμβος $j$
2	8
8	7
7	6
6	3

*iii.* Κατασκευάζεται η αντικειμενική συνάρτηση. Οι κινήσεις μαζών υπολογίζονται με βάση τα βάρη τους, και τα βάρη τους υπολογίζονται άμεσα από την αντικειμενική συνάρτηση. Μετά από μελέτη, καθορίστηκαν οι παράγοντες που συμμετέχουν στη διαμόρφωση της συνάρτησης καταλληλότητας και είναι οι εξής:

1. η διαφορά μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος, σε κάθε νησίδα που δημιουργείται
2. ο αριθμός των νησίδων που δημιουργούνται
3. το αν η κάθε γεννήτρια ανήκει στην εκ των προτέρων γνωστή ομάδα γεννητριών
4. το αν η κάθε νησίδα που δημιουργείται έχει κατανάλωση ενεργού ισχύος
5. το αν η κάθε νησίδα που δημιουργείται έχει παραγωγή ενεργού ισχύος

Έτσι η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται ως εξής

$$F = c_1 \frac{g_c}{S} + c_2 F_1^2 + c_3 dS^2 + c_4 F_2^2 + c_5 F_3^2$$

Όπου

$g_c$ : το άθροισμα της απόλυτης τιμής της διαφοράς παραγωγής και κατανάλωσης της ενεργού ισχύος κάθε νησίδας,

$S$ : ο αριθμός των νησίδων που δημιουργούνται,

$dS$ : διαφορά μεταξύ του αριθμού των νησίδων που προτείνονται από την εκάστοτε λύση και του αριθμού των συναφών ομάδων γεννητριών.

$F_1$ : συντελεστής που αυξάνεται κατά μια μονάδα κάθε φορά που μία γεννήτρια ανήκει σε λάθος coherent group με βάση την προτεινόμενη λύση

$F_2$ : συντελεστής που αυξάνεται κατά μια μονάδα κάθε φορά που μια από τις προτεινόμενες νησίδες δεν περιέχει γεννήτρια

$F_3$ : συντελεστής που αυξάνεται κατά μια μονάδα κάθε φορά που μια από τις προτεινόμενες νησίδες δεν έχει κατανάλωση ενεργού ισχύος

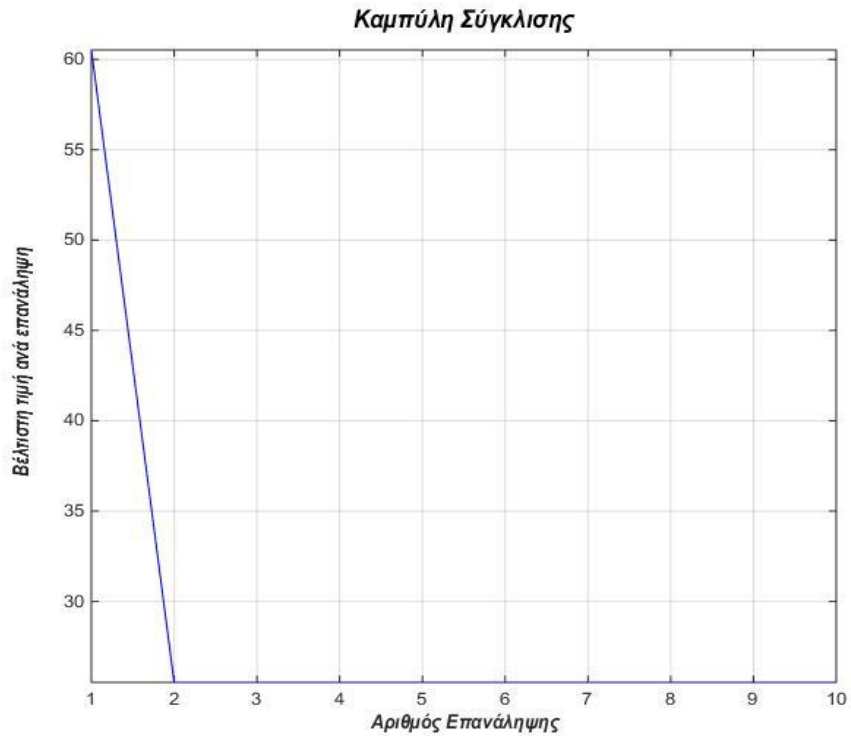
και  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 5$ ,  $c_3 = 100$ ,  $c_4 = 5$  και  $c_5 = 5$ , οι αντίστοιχοι συντελεστές. Προκειμένου η αντικειμενική συνάρτηση να αλλάζει αισθητά τιμή, κάθε φορά που ο αριθμός των νησίδων είναι διάφορος από τον αριθμό των συναφών ομάδων των γεννητριών, κάθε φορά που οι νησίδες

ανήκουν σε λάθος συναφή ομάδα και κάθε φορά που δημιουργείται νησίδα χωρίς να περιέχει είτε κατανάλωση ισχύος είτε παραγωγή. Ο συντελεστής  $c_3$  επιλέχθηκε να είναι αρκετά μεγαλύτερος από τους υπόλοιπους συντελεστές, διότι η μελέτη του αλγορίθμου έδειξε ότι ο αλγόριθμος τείνει ευκολότερα προς τη δημιουργία περισσότερων νησίδων από τις ομάδες των γεννητριών και μάλιστα αυτές περιέχουν έναν και μοναδικό ζυγό φορτίου ή γεννήτριας.

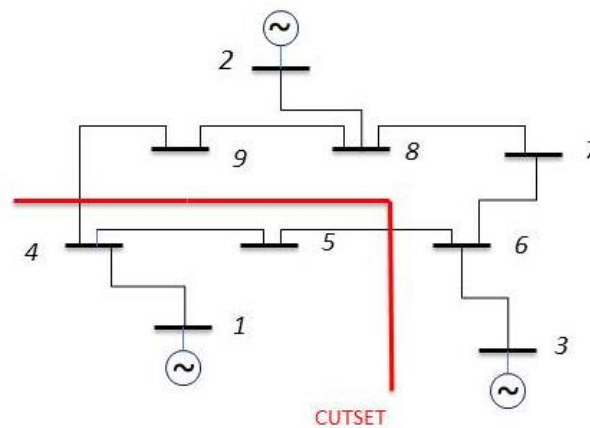
*iv.* Καλείται ο δυαδικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που βασίζεται στους αλγόριθμους σμήνους σωματιδίων και βαρυτικής αναζήτησης (Binary particle swarm optimization and gravitational search algorithm). Εισάγονται ως δεδομένα στον αλγόριθμο:

1. Η συνάρτησης καταλληλότητας  $F$
2. Ο αριθμός των πρακτόρων αναζήτησης  $N=30$
3. Ο αριθμός των επαναλήψεων  $Max\_iteration=10$

Ο αλγόριθμος πραγματοποιεί 10 επαναλήψεις και παρουσιάζει τη βέλτιστη λύση για το δίκτυο των 9 ζυγών με βάση τα αποτελέσματα της συνάρτησης καταλληλότητας. Ο μικρός αριθμός των επαναλήψεων επιλέχθηκε διότι το δίκτυο είναι αρκετά απλό, η επιλογή αυτή επιβεβαιώνεται στο **σχήμα 5.2.2** όπου απεικονίζεται η καμπύλη σύγκλισης για το δίκτυο των 9 ζυγών και παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος σταματά τη βελτίωση από τη δεύτερη επανάληψη και μετά. Στο **σχήμα 5.2.3** παρουσιάζονται τα 2 νησιά που προτείνονται σαν λύση  $V_1 = \{1,5,4\}$  και  $V_2 = \{2,3,6,7,8,9\}$  και οι γραμμές που αποσυνδέονται (cutset) προκειμένου αυτά να δημιουργηθούν.



**Σχήμα 5.2.2.:** Καμπύλη σύγκλισης για το δίκτυο 9 ζυγών



**Σχήμα 5.2.3:** Δίκτυο των 9 ζυγών μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου BPSOGSA

Στον **πίνακα 5.2.1** φαίνονται οι γραμμές που διακόπτονται μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου και στον **πίνακα 5.2.2** παρουσιάζονται οι νησίδες που δημιουργούνται και η παραγωγή και η κατανάλωση ενεργού ισχύος σε κάθε μια από αυτές.

**Πίνακας 5.2.1:** Αποσυνδεδεμένες γραμμές για το δίκτυο των 9 ζυγών

A/A Αποσυνδεδεμένης Γραμμής (cutset)	Κόμβος i	Κόμβος j	Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)
1	5	6	60.17
2	9	4	41.09

**Πίνακας 5.2.2:** Στοιχεία Νησίδων για το δίκτυο 9 ζυγών

Νησίδες	Παραγωγή Ενεργού Ισχύος P(MW)	Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος P(MW)	Απόλυτη Τιμή Διαφοράς Παραγωγής & Κατανάλωσης
$V_1 = \{1,5,4\}$	71.95	90	18.05
$V_2 = \{2,3,6,7,8,9\}$	248	225	23

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την ποιότητα των νησιών που δημιουργούνται θα υπολογίσουμε τα μεγέθη 'cut' και 'volume' και το μέγεθος  $\phi_k$  για κάθε νησί:

**Για την νησίδα  $V_1$ :**

$$cut(V_1, \overline{V_1}) = \sum_{v_i \in V_1, v_j \in \overline{V_1}} w_{ij} = 101.26 MW,$$

$$vol(V_1) = \sum_{v_i \in V_1} d_i = 306.46 MW$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_1 = 1 - \frac{cut(V_1, \overline{V_1})}{vol(V_1)} = 0.67$$

**Για την νησίδα  $V_2$ :**

$$cut(V_2, \overline{V_2}) = \sum_{v_i \in V_2, v_j \in \overline{V_2}} w_{ij} = 101.26 MW, \text{ ενώ}$$

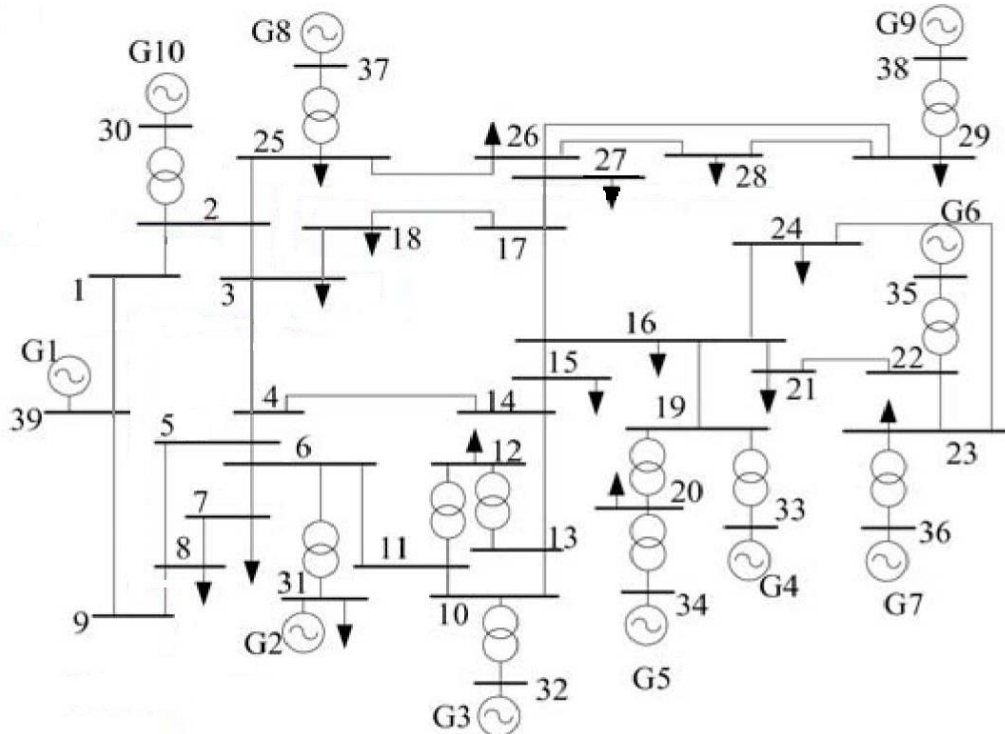
$$vol(V_2) = \sum_{v_i \in V_2} d_i = 968.41 MW$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_2 = 1 - \frac{cut(V_2, \overline{V_2})}{vol(V_2)} = 0.896$$



### 5.3 Δίκτυο 39 ζυγών

Το δίκτυο αυτό των 39 ζυγών φαίνεται στο **σχήμα 5.3.1**, διαθέτει 10 ζυγούς γεννητριών, 29 ζυγούς φορτίων και 46 γραμμές μεταφοράς. Οι συναφείς ομάδες γεννητριών σε αυτό το δίκτυο είναι τρεις και συντελούνται από τους εξής ζυγούς γεννητριών το καθένα {39} {37,38,30} και {31,32,33,34,35,36}.



**Σχήμα 5.3.1:** Τοπολογία δικτύου 39 ζυγών

Τα βήματα του κώδικα όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι εν συντομία τα εξής:

- i. Κατασκευάζεται ο γράφος  $G = (V, E, \omega)$  όπου  $v_i \in V, i = 1, 2, \dots, 39$  και  $e_{ij} \in E \subset V \times V, i, j = 1, 2, \dots, 39$  οι κόμβοι και οι ακμές του αντίστοιχα. Από τα δεδομένα ροής ισχύος του δικτύου τα βάρη των ακμών του καθορίζονται ως  $1/[(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2]$ .
- ii. Οι συναφείς ομάδες γεννητριών είναι δεδομένες και αποτελούνται από τους ζυγούς {39} {37,38,30} και {31,32,33,34,35,36}. Στον **πίνακα 5.3.1** φαίνονται οι γραμμές οι οποίες δεν μπορούν να αποσυνδεθούν και θα αφαιρεθούν από το σύνολο των γραμμών που θα μελετηθούν στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

**Πίνακας 5.3.1:** Οι κόμβοι μεταξύ των οποίων οι συνδέσεις δεν μπορούν να διακοπούν για το δίκτυο των 39 ζυγών

Κόμβος <i>i</i>	Κόμβος <i>j</i>
2	25
4	14
5	4
6	5
6	11
10	13
10	32
11	10
13	14
14	15
15	16
16	19
16	21
16	24
19	20

19	33
20	34
21	22
22	23
22	35
23	36
24	23
25	26
25	37
26	29
29	38
30	2
31	6
32	10
33	19
34	20
37	25

iii. Κατασκευάζεται η αντικειμενική συνάρτηση.

$$F = c_1 \frac{g-c}{S} + c_2 F_1^2 + c_3 dS^2 + c_4 F_2^2 + c_5 F_3^2$$

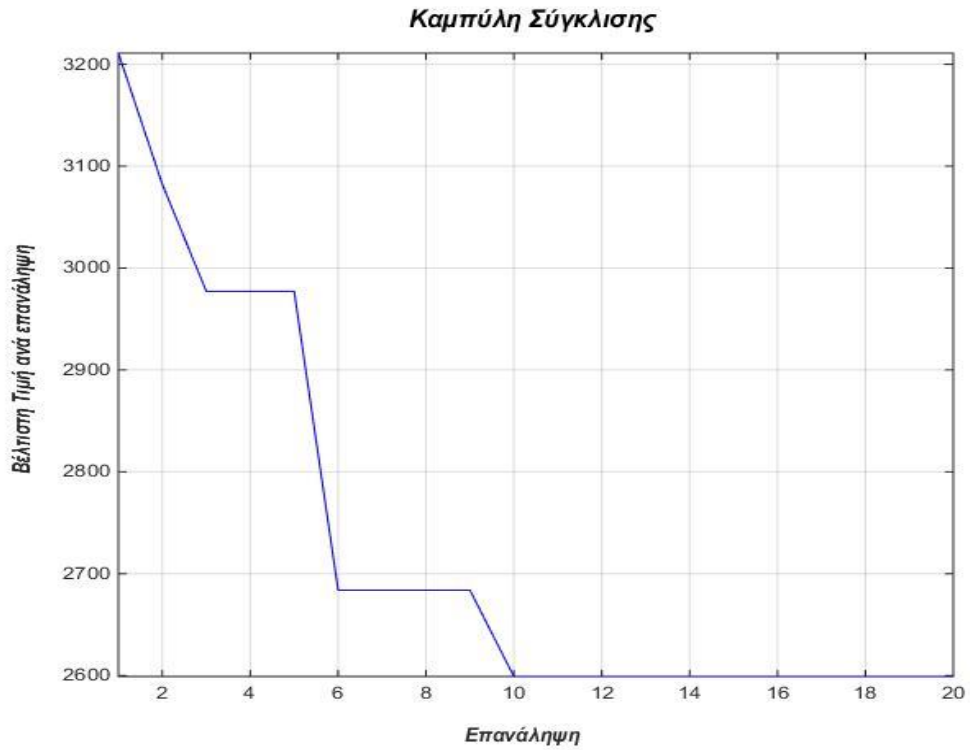
Όπου  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 5$ ,  $c_3 = 5$ ,  $c_4 = 2$  και  $c_5 = 5$ , οι αντίστοιχοι συντελεστές. Προκειμένου η αντικειμενική συνάρτηση να αλλάζει αισθητά τιμή, κάθε φορά που ο αριθμός των νησίδων είναι διάφορος από τον αριθμό των συναφών ομάδων των γεννητριών, κάθε φορά που οι νησίδες ανήκουν σε λάθος συναφή ομάδα και κάθε φορά που δημιουργείται νησίδα χωρίς να περιέχει είτε κατανάλωση ισχύος είτε παραγωγή, οι συντελεστές  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$  και  $c_5$  επιλέχθηκαν να είναι μεγαλύτεροι από τον συντελεστή  $c_1$  του αθροίσματος της απόλυτης τιμής της διαφοράς παραγωγής και κατανάλωσης της ενεργού ισχύος κάθε νησίδας προς τον αριθμό των νησίδων. Επίσης οι συντελεστές

$c_2$ ,  $c_3$  και  $c_5$  επιλέχθηκαν να είναι μεγαλύτεροι, διότι η μελέτη του αλγορίθμου έδειξε ότι ο αλγόριθμος τείνει ευκολότερα προς τη δημιουργία περισσότερων νησίδων από τις ομάδες των γεννητριών και μάλιστα αυτές περιέχουν έναν και μοναδικό ζυγό φορτίου ή γεννήτριας.

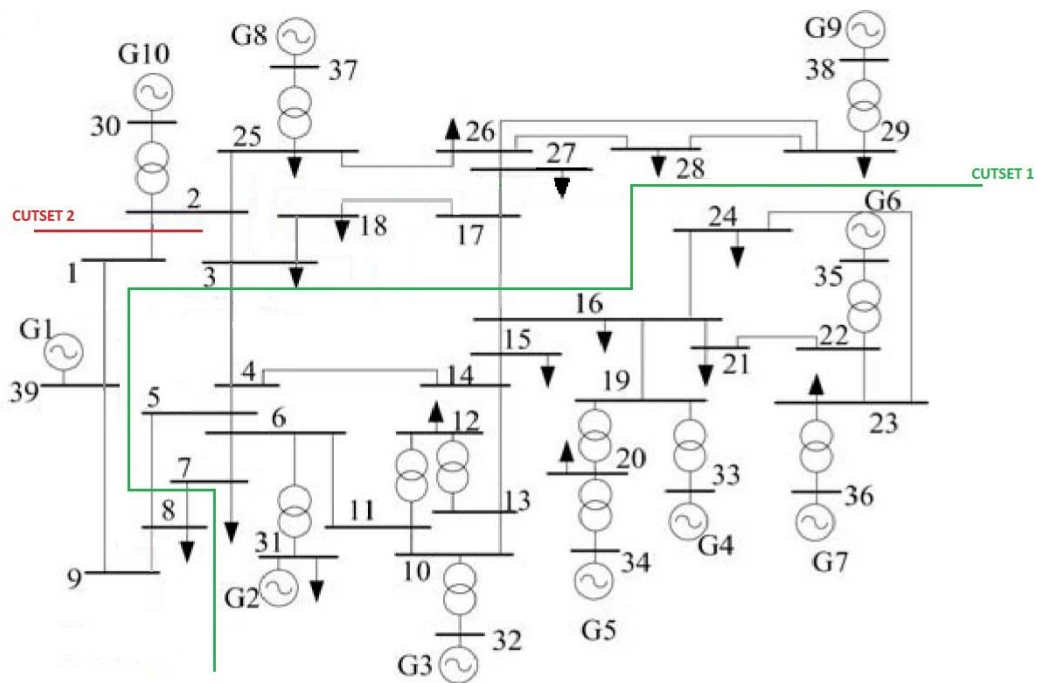
**iv.** Καλείται ο δυαδικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που βασίζεται στους αλγόριθμους σμήνους σωματιδίων και βαρυτικής αναζήτησης. Εισάγονται ως δεδομένα στον αλγόριθμο:

1. Η συνάρτησης καταλληλότητας  $F$
2. Ο αριθμός των πρακτόρων αναζήτησης  $N=30$
3. Ο αριθμός των επαναλήψεων  $Max\_iteration=20$
4. Ο αριθμός των μεταβλητών (γον) ,που στην ουσία είναι το μήκος του διανύσματος που θα επεξεργάζεται ο αλγόριθμος. Ο αριθμός δηλαδή των συνδέσεων του δικτύου αφού έχουν αφαιρεθεί οι κλάδοι-γραμμές του δικτύου που υπολογίστηκαν στο βήμα **ii** . Με τον τρόπο αυτό αποκλείονται από τη λύση οι κλάδοι του δικτύου που μεταφέρουν υψηλές τιμές ενεργού ισχύος και συνδέουν συγχρονισμένες γεννήτριες μεταξύ τους.

Ο αλγόριθμος πραγματοποιεί 20 επαναλήψεις και παρουσιάζει τη βέλτιστη λύση για το δίκτυο 39 ζυγών με βάση τα αποτελέσματα της συνάρτησης καταλληλότητας. Στο **σχήμα 5.3.2** απεικονίζεται η καμπύλη σύγκλισης για το δίκτυο των 39 ζυγών, όπως απεικονίζεται ο αλγόριθμος σταματά την βελτίωση των αποτελεσμάτων (κατά μέσο όρο) μετά την  $10^1$  περίπου επανάληψη και για αυτό επιλέχθηκε ο αριθμός των επαναλήψεων να είναι 20 και όχι παραπάνω. Ο αλγόριθμος αυτός είναι στοχαστικός , αυτό σημαίνει ότι σε κάθε επανάληψη μπορεί να μην παρουσιάσει τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα. Μετά από πληθώρα επαναλήψεων παρουσιάζονται στο **σχήμα 5.3.3** και στο **σχήμα 5.3.4** οι πιο συχνές λύσεις νησιδοποίησης που προτείνει ο αλγόριθμος. Στα σχήματα παρουσιάζονται τα 3 νησιά  $V_1 = \{1,8,9,39\}$ ,  $V_2 = \{2,3,18,17,25,26,27,28,29,30,37,38\}$  και  $V_3 = \{4,5,6,7,10,11,12,13,14,15,16,19, 20,21,22,23,24,31,32,33,34,35,36\}$  στη πρώτη εκδοχή και  $V_1 = \{1,7,8,9,39\}$ ,  $V_2 = \{2,3,18,17,25,26,27,28,29,30,37,38\}$  και  $V_3 = \{4,5,6,10,11,12,13,14,15,16,19,20,21, 22,23,24,31,32,33,34,35,36\}$  στη δεύτερη εκδοχή, που προτείνονται σαν λύσεις και οι γραμμές που αποσυνδέονται (cutset1 και cutset2) κάθε φορά.



**Σχήμα 5.3.2:** Καμπύλη σύγκλισης για το δίκτυο 39 ζυγών



**Σχήμα 5.3.3:** Πρώτη εκδοχή του δικτύου των 39 ζυγών μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου BPSOGSA

Παρουσιάζονται παρακάτω για την πρώτη εκδοχή της λύσης στον **πίνακα 5.3.2** οι γραμμές που διακόπτονται και οι ροές ισχύος που αυτές έχουν, και στον **πίνακα 5.3.3** οι νησίδες που δημιουργούνται και η παραγωγή και η κατανάλωση ενεργού ισχύος σε κάθε μια από αυτές.

**Πίνακας 5.3.2:** Οι γραμμές που διακόπτονται στην πρώτη εκδοχή του δικτύου των 39 ζυγών μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου BPSOGSA

A/A Αποσυνδεδεμένης Γραμμής (cutset)	Κόμβος $i$	Κόμβος $j$	Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)
1	1	2	174.19
2	5	8	338.71
3	3	4	37.24
4	7	8	218.66
5	16	17	223.85

**Πίνακας 5.35.3:** Στοιχεία Νησίδων για την πρώτη εκδοχή του δικτύου των 39 ζυγών μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου BPSOGSA

Νησίδες	Παραγωγή Ενεργού Ισχύος P(MW)	Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος P(MW)	Απόλυτη Τιμή Διαφοράς Παραγωγής & Κατανάλωσης
$V_1 = \{1,9,8,39\}$	1000	1730.1	730.1
$V_2 = \{2,3,17,18,25,26,27,28,29,30,37,38\}$	1620	1613.5	6.5
$V_3 = \{4,5,6,7,10,11,12,13,14,15,16,19,20,21,22,23,24,31,32,33,34,35,36\}$	3677.9	2910.63	767.27

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την ποιότητα των νησιών που δημιουργούνται θα υπολογίσουμε τα μεγέθη 'cut' και 'volume' και το μέγεθος  $\phi_k$  για κάθε νησί:

**Για την νησίδα  $V_1$ :**

$$cut(V_1, \overline{V_1}) = \sum_{v_i \in V_1, v_j \in \overline{V_1}} w_{ij} = 731.56 MW,$$

$$vol(V_1) = \sum_{v_i \in V_1} d_i = 1008.93 MW$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_1 = 1 - \frac{cut(V_1, \overline{V_1})}{vol(V_1)} = 0.27$$

**Για την νησίδα  $V_2$ :**

$$cut(V_2, \overline{V_2}) = \sum_{v_i \in V_2, v_j \in \overline{V_2}} w_{ij} = 435.28 MW$$

$$vol(V_2) = \sum_{v_i \in V_2} d_i = 7334.88 MW$$

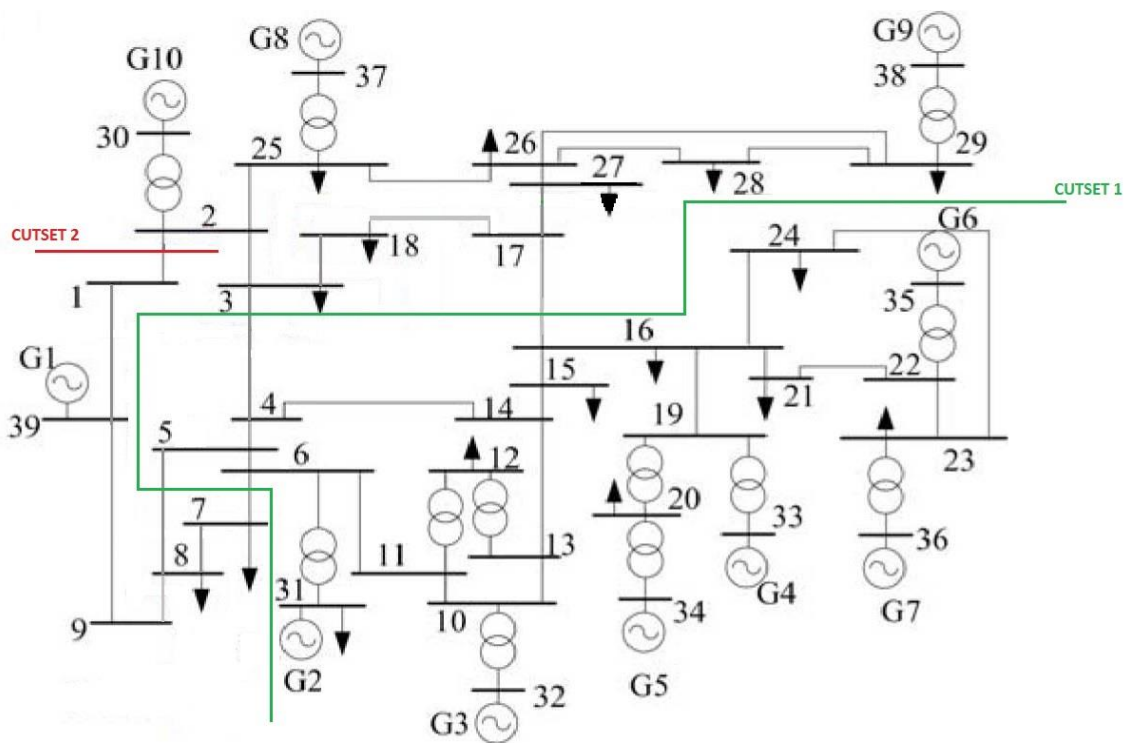
οπότε προκύπτει  $\phi_2 = 1 - \frac{cut(V_2, \bar{V}_2)}{vol(V_2)} = 0.94$

**Για την νησίδα  $V_3$ :**

$cut(V_3, \bar{V}_3) = \sum_{v_i \in V_3, v_j \in \bar{V}_3} w_{ij} = 594.61 MW$ , ενώ

$vol(V_3) = \sum_{v_i \in V_3} d_i = 18295.74 MW$

οπότε προκύπτει  $\phi_3 = 1 - \frac{cut(V_3, \bar{V}_3)}{vol(V_3)} = 0.968$



**Σχήμα 5.3.4:** Δεύτερη εκδοχή του των 39 ζυγών μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου BPSOGSA

**Πίνακας 5.3.4:** Οι γραμμές που διακόπτονται στην δεύτερη εκδοχή του δικτύου των 39 ζυγών μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου BPSOGSA

Α/Α Αποσυνδεδεμένης Γραμμής (cutset)	Κόμβος $i$	Κόμβος $j$	Ροή Ενεργού Ισχύος (MW)
1	1	2	174.19
2	5	8	338.71
3	6	7	453.19
4	3	4	37.24
5	16	17	223.85

**Πίνακας 5.3.5:** Στοιχεία Νησίδων για την δεύτερη εκδοχή του δικτύου των 39 ζυγών μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου BPSOGSA

Νησίδες	Παραγωγή Ενεργού Ισχύος P(MW)	Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος P(MW)	Απόλυτη Τιμή Διαφοράς Παραγωγής & Κατανάλωσης
$V_1 = \{1,7,8,9,39\}$	1000	1963.9	963.9
$V_2 = \{2,3,17,18,25,26,27,28,29,30,37,38\}$	1620	1613.5	6.5
$V_3 = \{4,5,6,10,11,12,13,14,15,16,19,20,21,22,23,24,31,32,33,34,35,36\}$	3677.9	2676.8	1001.1

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την ποιότητα των νησιών που δημιουργούνται θα υπολογίσουμε τα μεγέθη ‘cut’ και ‘volume’ και το μέγεθος  $\phi_k$  για κάθε νησί:

**Για την νησίδα  $V_1$  :**

$$cut(V_1, \overline{V_1}) = \sum_{v_i \in V_1, v_j \in \overline{V_1}} w_{ij} = 966.09 MW,$$

$$vol(V_1) = \sum_{v_i \in V_1} d_i = 1680.78 MW$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_1 = 1 - \frac{cut(V_1, \overline{V_1})}{vol(V_1)} = 0.43$$

**Για την νησίδα  $V_2$  :**

$$cut(V_2, \overline{V_2}) = \sum_{v_i \in V_2, v_j \in \overline{V_2}} w_{ij} = 435.28 MW, \text{ ενώ}$$

$$vol(V_2) = \sum_{v_i \in V_2} d_i = 7334.88 MW$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_2 = 1 - \frac{cut(V_2, \overline{V_2})}{vol(V_2)} = 0.94$$

**Για την νησίδα  $V_3$  :**

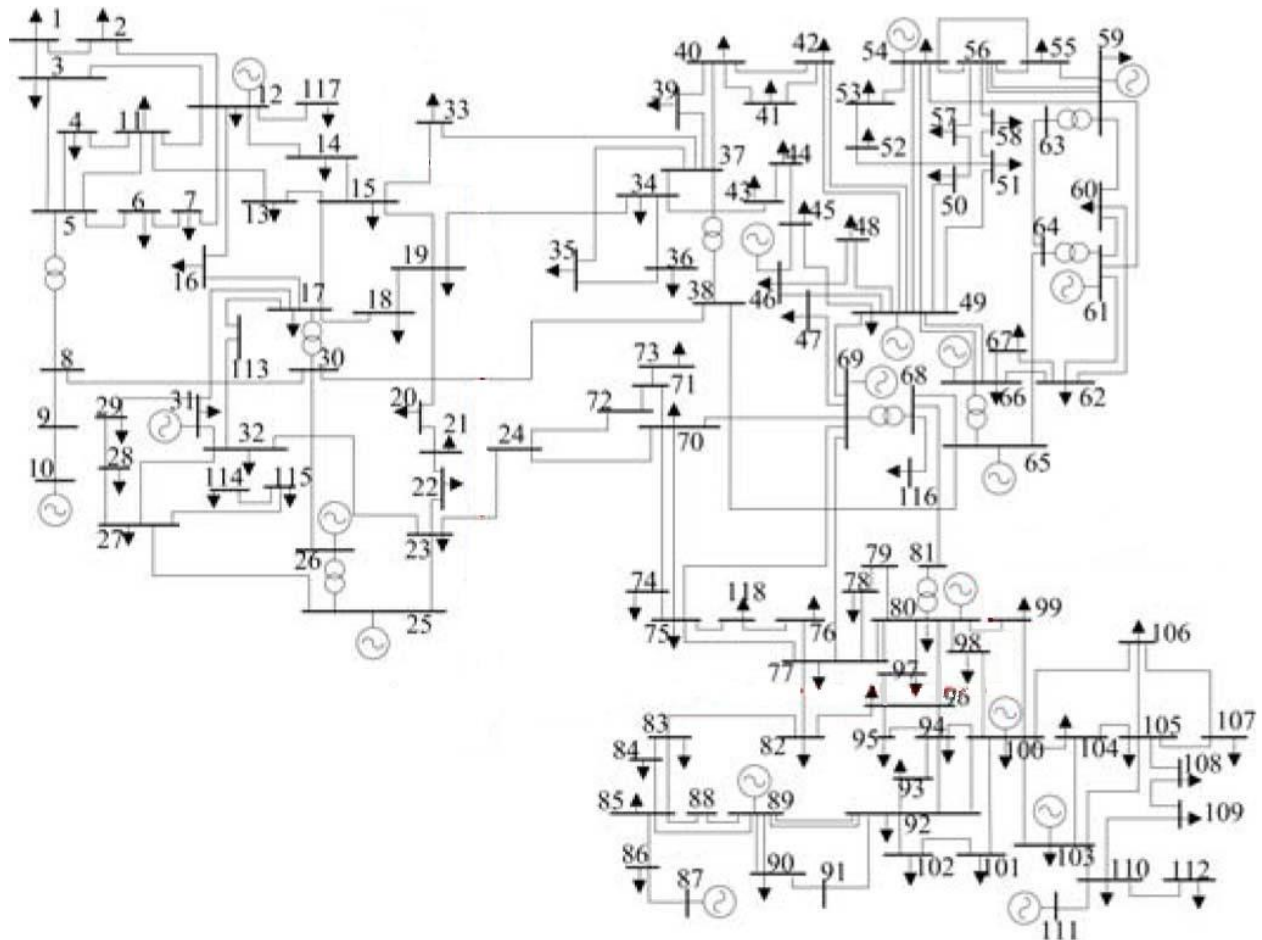
$$cut(V_3, \overline{V_3}) = \sum_{v_i \in V_3, v_j \in \overline{V_3}} w_{ij} = 1052.99 MW, \text{ ενώ}$$

$$vol(V_3) = \sum_{v_i \in V_3} d_i = 15873.66 MW$$

$$\text{οπότε προκύπτει } \phi_3 = 1 - \frac{cut(V_3, \overline{V_3})}{vol(V_3)} = 0.93$$

## 5.4 Δίκτυο 118 ζυγών

Το δίκτυο αυτό των 118 ζυγών φαίνεται στο **σχήμα 5.4.1**, διαθέτει 54 ζυγούς γεννητριών, 65 ζυγούς φορτίων και 186 γραμμές μεταφοράς. Οι συναφείς ομάδες γεννητριών σε αυτό το δίκτυο είναι τρεις και συντελούνται από τους εξής ζυγούς γεννητριών το καθένα {10,12,25,26,31} {46,49,54,59,61,65,66,9,80} και {87,89,100,103,111}.



**Σχήμα 5.4.1:** Τοπολογία δικτύου 118 ζυγών

Τα βήματα του κώδικα στην περίπτωση του δικτύου των 118 ζυγών είναι όμοια με των προηγούμενων δικτύων



- i. Κατασκευάζεται ο γράφος  $G = (V, E, \omega)$  όπου  $v_i \in V, i = 1, 2, \dots, 118$  και  $e_{ij} \in E \subset V \times V, i, j = 1, 2, \dots, 118$  οι κόμβοι και οι ακμές του αντίστοιχα. Από τα δεδομένα ροής ισχύος του δικτύου τα βάρη των ακμών του καθορίζονται ως  $1/[(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2]$ .
- ii. Οι συναφείς ομάδες γεννητριών είναι δεδομένες και στον **πίνακα 5.4.1** φαίνονται οι γραμμές οι οποίες δεν μπορούν να αποσυνδεθούν και θα αφαιρεθούν από το σύνολο των γραμμών που θα μελετηθούν στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

**Πίνακας 5.4.1:** Οι κόμβοι μεταξύ των οποίων οι συνδέσεις δεν μπορούν να διακοπούν για το δίκτυο των 118 ζυγών

Κόμβος i	Κόμβος j
5	8
5	11
8	30
9	8
10	9
11	12
23	32
25	23
25	26
30	26
32	31
45	49
46	45
46	47
47	69
49	54
49	66
49	69

54	59
59	61
59	63
61	62
62	66
63	64
65	64
65	68
68	69
68	81
69	77
77	80
81	80
85	89
86	85
87	86
89	92
92	100
100	103

- iii. Κατασκευάζεται η αντικειμενική συνάρτηση.

$$F = c_1 \frac{g-c}{S} + c_2 F_1^2 + c_3 dS^2 + c_4 F_2^2 + c_5 F_3^2$$

Όπου  $c_1 = 1, c_2 = 5, c_3 = 5, c_4 = 2$  και  $c_5 = 5$ , οι αντίστοιχοι συντελεστές.

*iv.* Καλείται ο δυαδικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που βασίζεται στους αλγόριθμους σμήνους σωματιδίων και βαρυτικής αναζήτησης. Εισάγονται ως δεδομένα στον αλγόριθμο:

5. Η συνάρτησης καταλληλότητας  $F$
6. Ο αριθμός των πρακτόρων αναζήτησης  $N=30$
7. Ο αριθμός των επαναλήψεων  $Max\_iteration=20$

Ο αριθμός των μεταβλητών ( $n$ ), που στην ουσία είναι το μήκος του διανύσματος που θα επεξεργάζεται ο αλγόριθμος. Ο αριθμός δηλαδή των συνδέσεων του δικτύου αφού έχουν αφαιρεθεί οι κλάδοι-γραμμές του δικτύου που υπολογίστηκαν στο βήμα *ii*. Με τον τρόπο αυτό αποκλείονται από τη λύση οι κλάδοι του δικτύου που μεταφέρουν υψηλές τιμές ενεργού ισχύος και συνδέουν συγχρονισμένες γεννήτριες μεταξύ τους

Παρόλο που εφαρμόστηκαν τα ίδια ακριβώς βήματα και χρησιμοποιήθηκε η ίδια αντικειμενική συνάρτηση, που και τα δύο ήταν αποτελεσματικά κατά την εφαρμογή τους στα προηγούμενα δίκτυα, στο δίκτυο 118 ζυγών δεν ισχύει το ίδιο. Τα αποτελέσματα που εμφανίζει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης δεν είναι καθόλου ικανοποιητικά για το δίκτυο των 118 ζυγών καθώς στην προτεινόμενη λύση εμφανίζεται αριθμός νησίδων πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των συναφών ομάδων των γεννητριών (coherent groups), πολλά από αυτά τα νησιά δε διαθέτουν ζυγούς γεννητριών, ενώ άλλα αποτελούνται από ένα μόνο ζυγό γεννήτριας. Οι συγχρονισμένες γεννήτριες δεν ανήκουν στις ίδιες ομάδες όπως θα έπρεπε και δεν ικανοποιείται σε καμία περίπτωση το ισοζύγιο παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος σε κάθε προτεινόμενο νησί.

## **5.5 Συμπεράσματα**

Στο κεφάλαιο αυτό, όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή του στοχαστικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και βαρυτικής αναζήτησης(BPSOGSA), στα τρία πρότυπα δίκτυα της IEEE των 9, των 39 και των 118 ζυγών. Κατασκευάζεται για τον αλγόριθμο μια αντικειμενική συνάρτηση με στοιχεία όπως το ισοζύγιο παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος, ο αριθμός των νησίδων που σχηματίζονται και η θέση των γεννητριών στις νησίδες αυτές. Κατόπιν γίνεται μια “καθοδήγηση” του αλγορίθμου μέσω των όρων που περιλαμβάνονται στην αντικειμενική συνάρτηση και των συντελεστών τους. Το βασικό του μειονέκτημα, με βάση τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε, είναι ότι δεν είναι αποδοτικός για όλα τα μεγέθη δικτύων με την υφιστάμενη συνάρτησης καταλληλότητας και με τους συγκεκριμένους συντελεστές. Είναι αποδοτικός για τα δίκτυα των 9 και 39 ζυγών, ενώ στο δίκτυο των 118 ζυγών φαίνεται ότι δεν είναι ικανός για να δώσει μια ανταγωνιστική λύση. Ένα ακόμα βασικό του μειονέκτημα, όπως παρουσιάζεται στον **πίνακα 5.5.1**, αποτελεί το γεγονός ότι συγκριτικά με τους άλλους δύο αλγορίθμους απαιτεί περισσότερο χρόνο για την εύρεση λύσης νησιδοποίησης. Ο χρόνος αυτός αυξάνεται όσο αυξάνεται και η πολυπλοκότητα του δικτύου.

Αυτό είναι λογικό καθώς ο αλγόριθμος αυτός πραγματοποιεί πολλές επαναλήψεις με αρκετούς υπολογισμούς.

**Πίνακας 5.5.1:** Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμου BPSOGSA

<b>Δίκτυο</b>	<b>Χρόνος εκτέλεσης αλγορίθμου (seconds)/(αριθμός επαναλήψεων)</b>
<b>9 ζυγών</b>	$\approx 17.73/(10)$
<b>39 ζυγών</b>	$\approx 32.2826/(20)$
<b>118 ζυγών</b>	$\approx 61.0356/(20)$

Στον παρακάτω **πίνακα 5.5.2** φαίνονται τα μεγέθη **'cut'**, **'volume'** και  $\phi$  που αντιστοιχούν στις νησίδες των δικτύων 9 και 39 ζυγών, των οποίων τα μεγέθη αξιολόγησης είναι ικανοποιητικά αλλά όχι καλύτερα από αυτά των δύο προηγούμενων μεθόδων.

**Πίνακας 5.5.2:** Μεγέθη αξιολόγησης νησίδων

<b>Δίκτυο</b>	<b>Νησίδες</b>	<b>cut(MW)</b>	<b>vol(MW)</b>	<b><math>\phi</math></b>
<b>9 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	101.26	306.46	0.67
	<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	101.26	968.41	0.896
<b>39 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	731.56	1008.93	0.27
	<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	435.28	7334.88	0.94
	<b>3<sup>η</sup> νησίδα</b>	594.61	18295.74	0.968



## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ – Συμπεράσματα/Αξιολόγηση Μεθόδων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσεγγίστηκε η μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης μέσω τριών διαφορετικών μεθόδων. Οι δύο πρώτες μέθοδοι βασίζονται στη φασματική ομαδοποίηση, η οποία χρησιμοποιεί τη θεωρία των γράφων και το φάσμα των πινάκων Laplace, προκειμένου να εξάγει πληροφορίες για το εκάστοτε δίκτυο. Η θεωρία των γράφων είναι εξαιρετικά χρήσιμη για την αναπαράσταση και απλοποίηση μεγάλων δικτύων, ενώ έχει αποδειχθεί ότι η χρήση του κανονικοποιημένου πίνακα Laplace δίνει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την ομαδοποίηση δεδομένων, σε σχέση με τον μη κανονικοποιημένο πίνακα Laplace. Η τρίτη μέθοδος είναι εντελώς διαφορετικής φιλοσοφίας και βασίζεται σε φυσικά φαινόμενα όπως είναι η βαρυτική έλξη που ασκείται μεταξύ διαφόρων μαζών αλλά και η παρατήρηση της συμπεριφοράς σμήνους ατόμων στη φύση.

Οι δύο πρώτες μέθοδοι, φασματικής ομαδοποίησης με τη χρήση πίνακα προβολών και φασματικής ομαδοποίησης με τη χρήση φασματικής ενσωμάτωσης, αποτελούν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελάχιστη διαταραχή ροής ισχύος (minimal power-flow disruption). Με τη χρήση της ελάχιστης διαταραχής ροής ισχύος ως αντικειμενική συνάρτηση, πετυχαίνεται βελτιωμένη μεταβατική ευστάθεια των νησιών που δημιουργούνται, μειώνεται η πιθανότητα υπερφόρτωσης των γραμμών μεταφοράς εντός της νησίδας, διευκολύνεται η ενδεχόμενη επανένταξη της νησίδας στο υπόλοιπο σύστημα, μειώνεται η πολυπλοκότητα του προβλήματος βελτιστοποίησης και δημιουργείται ένας αλγόριθμος υπολογιστικά εφικτός και αποδοτικός. Η ενσωμάτωση του περιοριστικού παράγοντα και στις δύο μεθόδους για τις ομάδες συγχρονισμένων γεννητριών, εμποδίζει τη δημιουργία νησιών που περιέχουν μη συγχρονισμένες γεννήτριες ή απομονωμένα φορτία.

Ο αλγόριθμος φασματικής ενσωμάτωσης έχει το μειονέκτημα ότι μπορεί μόνο να διχοτομήσει το δίκτυο. Σε μεγάλα δίκτυα λοιπόν, που οι ομάδες συναφών γεννητριών είναι συνήθως περισσότερες από δύο, απαιτείται η δημιουργία αντίστοιχων νησίδων και ο αλγόριθμος αυτός δεν μπορεί να ανταπεξέλθει. Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιείται η μέθοδος αναδρομικών διχοτομήσεων με επιπλέον επαναλήψεις. Ενώ ο αλγόριθμος φασματικής ομαδοποίησης με χρήση της μεθόδου φασματικής ενσωμάτωσης για την ομαδοποίηση των δεδομένων μπορεί εξαρχής να διαχωρίσει οποιοδήποτε αριθμό νησίδων απαιτείται.

Μετά από μελέτη αποδείχθηκε ότι ο αλγόριθμος φασματικής ομαδοποίησης με χρήση της μεθόδου φασματικής ενσωμάτωσης για την ομαδοποίηση των δεδομένων είναι υπολογιστικά αποδοτικότερος από τον αλγόριθμο φασματικής ομαδοποίησης με τη χρήση πίνακα προβολών. Αυτό παρουσιάζεται και στον **πίνακα 6.1**, στον οποίο φαίνονται οι χρόνοι εκτέλεσης και των τριών

αλγορίθμων. Ο αλγόριθμος φασματικής ομαδοποίησης με χρήση φασματικής ενσωμάτωσης υπερτερεί σε σχέση με τον αλγόριθμο φασματικής ενσωμάτωσης με χρήση του πίνακα προβολών όσον αφορά το χρόνο εκτέλεσης, διότι δεν πραγματοποιεί τη μέθοδο αναδρομικής διχοτόμησης, κάτι το οποίο σημαίνει ότι λύνει μια φορά το χρονοβόρο ιδιοπρόβλημα, δεν κατασκευάζει τον πίνακα προβολών που αποτελεί μία χρονοβόρα διαδικασία και δεν χρησιμοποιεί επαναληπτικούς αλγορίθμους π.χ. kmeans. Έχει όμως λίγο χαμηλότερη ποιότητα νησίδων, κάτι το οποίο φαίνεται από τον συντελεστή  $\phi$  στον **πίνακα 6.2**, αλλά καλύτερο ισοζύγιο παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος.

Όσον αφορά τον στοχαστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και βαρυτικής αναζήτησης (BPSOGSA) κατασκευάζεται μια αντικειμενική συνάρτηση με στοιχεία όπως το ισοζύγιο παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος, ο αριθμός των νησίδων που σχηματίζονται και η θέση των γεννητριών στις νησίδες αυτές. Κατόπιν γίνεται μια “καθοδήγηση” του αλγορίθμου μέσω των όρων που περιλαμβάνονται στην αντικειμενική συνάρτηση και των συντελεστών τους. Το βασικό του μειονέκτημα είναι ότι δεν παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μεγάλα δίκτυα όπως για παράδειγμα για το δίκτυο 118 ζυγών. Παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τα δίκτυα των 9 και 39 ζυγών κάτι το οποίο φαίνεται από τον συντελεστή  $\phi$  στον **πίνακα 6.2**, αλλά ένα ακόμα βασικό του μειονέκτημα, όπως παρουσιάζεται στον **πίνακα 6.1**, αποτελεί το γεγονός ότι συγκριτικά με τους άλλους δύο αλγορίθμους απαιτεί περισσότερο χρόνο για την εύρεση λύσης νησιδοποίησης. Ο χρόνος αυτός αυξάνεται όσο αυξάνεται και η πολυπλοκότητα του δικτύου και τον καθιστά ανέκδοτο να ανταπεξέλθει στην πρόκληση εύρεσης έκτακτης βέλτιστης λύσης νησιδοποίησης σε πραγματικό χρόνο.

**Πίνακας 6.1:** Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμων

<b>Δίκτυο</b>	<b>Χρόνος εκτέλεσης 1<sup>ου</sup> αλγορίθμου (όλες οι επαναλήψεις) (seconds)</b>	<b>Χρόνος εκτέλεσης 2<sup>ου</sup> αλγορίθμου (seconds)</b>	<b>Χρόνος εκτέλεσης 1ου αλγορίθμου (όλες οι επαναλήψεις) (seconds)</b>
<b>9 ζυγών</b>	≈1.15	≈ 0.74	≈ 17.73
<b>39 ζυγών</b>	≈1.85	≈ 0.93	≈ 32.28
<b>118 ζυγών</b>	≈1.58	≈ 1.33	≈ 61.04

**Πίνακας 6.2:** Μεγέθη αξιολόγησης νησίδων για όλες τις μεθόδους

<b>Μέθοδος</b>	<b>Δίκτυο</b>	<b>Νησίδες</b>	<b>cut(MW)</b>	<b>vol(MW)</b>	<b>φ</b>
<b>Φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα προβολών</b>	<b>9 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	71.74	215.64	0.67
		<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	71.74	1059.22	0.93
	<b>39 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	110.71	166.66	0.98
		<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	178.7	6898.07	0.97
		<b>3<sup>η</sup> νησίδα</b>	137.28	19574.82	0.98
	<b>118 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	58.91	3202.1	0.988
		<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	140.32	7809.8	0.982
		<b>3<sup>η</sup> νησίδα</b>	81.4	6940.4	0.982
	<b>Φασματικής ομαδοποίησης με φασματική ενσωμάτωση</b>	<b>9 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	71.74	215.64
<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>			71.74	1059.22	0.93
<b>39 ζυγών</b>		<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	104.04	104.04	0
		<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	178.7	6898.07	0.97
		<b>3<sup>η</sup> νησίδα</b>	130.61	19637.44	0.993
<b>118 ζυγών</b>		<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	81.4	6940.4	0.988
		<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	139.19	7748.78	0.982
		<b>3<sup>η</sup> νησίδα</b>	57.79	3263.12	0.982
<b>Σμήνους σωματιδίων &amp; βαρυτικής αναζήτησης</b>		<b>9 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	101.26	306.46
	<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>		101.26	968.41	0.896
	<b>39 ζυγών</b>	<b>1<sup>η</sup> νησίδα</b>	731.56	1008.93	0.27
		<b>2<sup>η</sup> νησίδα</b>	435.28	7334.88	0.94
		<b>3<sup>η</sup> νησίδα</b>	594.61	18295.74	0.968





## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] 'Συμβολή Μηχανικής Μάθησης στον Έλεγχο Δυναμικής Ασφάλειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας', Εμμανουήλ, Μ. Βουμβουλάκης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [2] 'Two-Step Spectral Clustering Controlled Islanding Algorithm', Lei Ding, Member, IEEE, Francisco M. Gonzalez-Longatt, Senior Member, IEEE, Peter Wall, Vladimir Terzija, Senior Member, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 28, NO. 1, FEBRUARY 2013
- [3] 'Hierarchical Spectral Clustering of Power Grids', IEEE, TRANSACTION ON POWER SYSTEMS, Ruben J. Sanchez-Garcia, Max Fennelly, Sean Norris, Nick Wright, Grahah Niblo, Jacek Brodzki and Janusz W. Blalek
- [4] 'Constrained spectral clustering-based methodology for intentional controlled islanding of large-scale power systems', Jairo Quirós-Tortós, Rubén Sánchez-García, Jacek Brodzki, Janusz Bialek, Vladimir Terzija, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 9, 2015.
- [5] 'A Tutorial on Spectral Clustering', Ulrike von Luxburg, Max Planck, Institute of Biological Cybernetics, Statistics and Computing 2007 //www.springer.com//
- [6] 'Binary optimization using hybrid particle swarm optimization and gravitational search algorithm', Seyedali Mirjalili, Gai-Ge Wang, Leandro dos S. Coelho, Neural Computing and Applications · November, 2014
- [7] 'Spectral K-Way Ratio-Cut Partitioning and Clustering', IEEE Transactions on Computed-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol 13, No 9, Pak K. Chan, Member, IEEE, Martine D. F. Schlag, Member, IEEE, and Jason Y. Zien
- [8] [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%85%CE%BA%CE%BB%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CE%B5%CE%B9%CE%B1\\_%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AEa.org/wiki/%CE%95%CF%85%CE%BA%CE%BB%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CE%B5%CE%B9%CE%B1\\_%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%85%CE%BA%CE%BB%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CE%B5%CE%B9%CE%B1_%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AEa.org/wiki/%CE%95%CF%85%CE%BA%CE%BB%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CE%B5%CE%B9%CE%B1_%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE)
- [9] 'GSA: A Gravitational Search Algorithm', Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, P.O. Box 76169-133, Kerman, Iran, Esmat Rashedi, Hossein Nezamabadi-pour, Saeid Saryazdi
- [10] 'Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Μονάδων Διεσπαρμένης παραγωγής με τη χρήση Υβριδικής PSO και Βέλτιστης ροής Φορτίου', Αλεξάνδρα Ζίγκηρη, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Ιούλιος 2012
- [11] [http://en.wikipedia.org/wiki/Graph\\_Theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Graph_Theory)  
[http://math.tut.fi/~ruohonen/GT\\_English.pdf](http://math.tut.fi/~ruohonen/GT_English.pdf)
- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral\\_Clustering](http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_Clustering)
- [13] 'Φασματικές Μέθοδοι Ανάκτησης Πληροφορίας, Εργαλεία Λογισμικού και Εφαρμογές', Δημήτριος Ζειμπέκης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών