



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ηλεκτρονικής

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗ
ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΜΕΝΗΣ ΑΓΟΡΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

ΞΥΔΙΑΡΗ ΑΝΝΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ

ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2008

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διατριβή μου στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνησή της ξεκίνησε το Δεκέμβριο του 2007 και ολοκληρώθηκε τον Σεπτέμβριο του 2008, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Γεωργιάκη Παύλου.

Με την ευκαιρία της παρουσίασης της εργασίας μου αυτής, θεωρώ χρέος μου να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν αποφασιστικά στην όλη μου προσπάθεια. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεωργιάκη Παύλο, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ σε βάθος με το αντικείμενο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που αποτέλεσε και αντικείμενο των προπτυχιακών μου σπουδών στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Με την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που παρείχε, καλλιέργησε άρτιο κλίμα συνεργασίας σε όλη την πορεία της εργασίας, υπογράφοντας την επιτυχή της ολοκλήρωση. Επιθυμώ να ευχαριστήσω και τον καθηγητή κ. Νικόλο Ιωάννη για τις γνώσεις που μου παρείχε πάνω στο αντικείμενο των γενετικών αλγορίθμων μέσω των παρουσιάσεων και εργασιών στα πλαίσια μεταπτυχιακού του μαθήματος και τον καθηγητή κ. Δουλάμη Αναστάσιο για τη βοήθεια και συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και όλους τους φίλους μου που με στήριξαν και σε αυτήν την προσπάθεια και με βοήθησαν με τον τρόπο τους στο να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πρόβλημα της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται στον προσδιορισμό του πότε και ποια νέα κυκλώματα (γραμμές μεταφοράς) πρέπει να εγκατασταθούν σε ένα ήδη υπάρχον δίκτυο, ώστε να εξασφαλιστεί επαρκής ικανότητα μεταφοράς με βάση τις μελλοντικές δυνατότητες παραγωγής και τις προβλέψεις για τη ζήτηση. Σε ένα περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς (ανταγωνιστικό περιβάλλον) η διαδικασία σχεδιασμού μεταφοράς γίνεται πολύ πιο δύσκολη, σε σχέση με τη μη απελευθερωμένη αγορά, καθώς ο αριθμός των εταιριών που εμπλέκονται τόσο στην παραγωγή όσο και στη μεταφορά αυξάνεται σημαντικά, έχοντας η καθεμία τους δικούς της αντικειμενικούς στόχους. Από την πλευρά του σχεδιαστή μεταφοράς ο κύριος αντικειμενικός στόχος σε μια απελευθερωμένη αγορά είναι να παρέχει ένα αμερόληπτο και ανταγωνιστικό περιβάλλον για όλους τους επενδυτές, ενώ ταυτόχρονα να διασφαλίζει την αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής.

Το πρόβλημα της βέλτιστης επέκτασης του συστήματος μεταφοράς είναι ουσιαστικά ένα μεγάλης κλίμακας, μη γραμμικό, πρόβλημα βελτιστοποίησης. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού ετήσιου κόστους λειτουργίας και επένδυσης ενώ ταυτόχρονα πρέπει να διατηρηθεί υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας και ποιότητας υπηρεσιών. Παράλληλα θα πρέπει να ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πιθανές βλάβες στη μεταφορά αλλά και στις εγκαταστάσεις παραγωγής καθώς και οι προγραμματισμένες συντηρήσεις του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή ερευνητική διατριβή το πρόβλημα της βέλτιστης επέκτασης του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα λυθεί με τη βοήθεια των γενετικών αλγόριθμων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μια κατηγορία μεθόδων βελτιστοποίησης που βασίζονται τη λειτουργία τους στη μίμηση των διαδικασιών της φυσικής εξέλιξης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν αποδειχθεί ότι είναι πολύ αποδοτικά εργαλεία βελτιστοποίησης για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, επέκταση συστήματος μεταφοράς, απελευθερωμένη αγορά, κόστος λειτουργίας, κόστος μεταφοράς, γενετικός αλγόριθμος, βελτιστοποίηση.

ABSTRACT

The transmission network expansion planning problem consists in finding when and which new circuits (transmission lines) should be installed in an existing network, in order to ensure sufficient transmission capability taking future production scenarios and future demand into account. In a deregulated market (competitive environment), the process of transmission planning becomes more complicated compared to a regulated market. Under deregulation, the number of organizations involved in generation planning and transmission planning is significantly increased, each with their own objectives. Generation is planned by a multiplicity of companies seeking to maximize their individual profits through energy sales, while transmission is planned by transmission owners seeking to maximize their profits through transmission services, all overseen and coordinated by a centralized authority seeking to ensure grid reliability and market efficiency.

From the transmission designer's point of view the main objective in a deregulated environment is to provide an unbiased and competitive environment for all the investors while at the same time ensures the reliability of the production system.

The transmission network planning problem is actually a large-scale, non-linear optimization problem. The objective is minimizing total operation and transmission cost while maintaining a high level of reliability and quality. At the same time all the operational constraints of the electrical system must be satisfied. In addition possible load curtailments should be taken into account, as well as the scheduled maintenance.

In the present postgraduate thesis the transmission planning problem will be solved using genetic algorithms. Genetic algorithms are optimization methods inspired by natural genetics and biological evolution. Genetic algorithms have successfully solved many complex power system optimization problems and are extremely effective optimization tools for the solution of complex, large-scale optimization problems.

KEYWORDS

Electrical power systems, transmission of electrical energy, transmission expansion problem, deregulated market, operational cost, investment cost, genetic algorithms, optimization.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Σκοπός της εργασίας	1
1.2	Περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς	1
1.3	Πρόβλημα βέλτιστης επέκτασης συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	2
1.4	Επίλυση προβλήματος με χρήση γενετικών αλγορίθμων	3
1.5	Περιεχόμενα της εργασίας	3
1.6	Βιβλιογραφία	5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

2.1	Εισαγωγή	7
2.2	Γενετικοί αλγόριθμοι και Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	11
2.3	Πλεονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων	12
2.4	Βιβλιογραφία	13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1	Εισαγωγή	15
3.2	Ορισμός προβλήματος	15
3.3	Υποπρόβλημα δικτύου αναφοράς	15
3.4	Πρόβλημα βέλτιστου δικτύου	19
3.5	Βιβλιογραφία	22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

4.1	Εισαγωγή	23
4.2	Περιγραφή λογισμικού	24
4.3	Βιβλιογραφία	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1	Εισαγωγή	37
5.2	Περίπτωση 1: Μικρό σύστημα (6 ζυγοί)	38
5.2.1	Δεδομένα εισόδου	38
5.2.1.1	Υποπερίπτωση 1	40
5.2.1.2	Υποπερίπτωση 2	42
5.2.1.3	Υποπερίπτωση 3	44
5.2.1.4	Υποπερίπτωση 4-3p	46

5.2.2	Δεδομένα γενετικού αλγορίθμου	50
5.2.3	Αποτελέσματα	51
5.2.3.1	Υποπερίπτωση 1	51
5.2.3.2	Υποπερίπτωση 2	65
5.2.3.3	Υποπερίπτωση 3	78
5.2.3.4	Υποπερίπτωση 4-3p	85
5.3	Περίπτωση 2: Μεσαίο σύστημα (30 ζυγοί)	97
5.3.1	Δεδομένα εισόδου	97
5.3.1.1	Υποπερίπτωση 1	100
5.3.1.2	Υποπερίπτωση 2	102
5.3.1.3	Υποπερίπτωση 3	103
5.3.1.4	Υποπερίπτωση 4	104
5.3.2	Δεδομένα γενετικού αλγορίθμου	107
5.3.3	Αποτελέσματα	110
5.3.3.1	Υποπερίπτωση 1	110
5.3.3.2	Υποπερίπτωση 2	119
5.3.3.3	Υποπερίπτωση 3	125
5.3.3.4	Υποπερίπτωση 4	135
5.4	Βιβλιογραφία	152

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	153
---------------------------------	------------

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το πρόβλημα της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται στον προσδιορισμό του πότε και ποια νέα κυκλώματα (γραμμές μεταφοράς) πρέπει να εγκατασταθούν σε ένα ήδη υπάρχον δίκτυο, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί επαρκής ικανότητα μεταφοράς με βάση τις μελλοντικές δυνατότητες παραγωγής και τις προβλέψεις για τη μελλοντική ζήτηση [1.1].

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η επαρκής και αξιόπιστη εξυπηρέτηση των φορτίων, η ανάπτυξη του συστήματος, το κόστος ενέργειας, το κόστος κατασκευής, κ.ο.κ. Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας σχεδιασμού έχει αυξηθεί, ως αποτέλεσμα της αναδιάρθρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΗΕ) καθώς και της προόδου της τεχνολογίας [1.2].

Η βασική αρχή του σχεδιασμού επέκτασης του δικτύου μεταφοράς είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας ικανοποιώντας ταυτόχρονα την απαίτηση για ασφαλή και αξιόπιστη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στους παραλήπτες εντός του χρονικού ορίζοντα για τον οποίο γίνεται το πλάνο επέκτασης.

1.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΜΕΝΗΣ ΑΓΟΡΑΣ

Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας δημιούργησε ένα ανοιχτό ανταγωνιστικό περιβάλλον αγοράς. Από την κατάσταση αυτή επηρεάζονται τόσο ο τομέας της παραγωγής, όσο και οι τομείς της μεταφοράς και διανομής της ΗΕ. Την ευθύνη για αυτές τις λειτουργίες έχουν οι εταιρίες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής υπό την εποπτεία ενός κεντρικού συντονιστή, του ΔΕΣΜΗΕ (Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας), ρόλος του οποίου είναι να εξισορροπεί την προσφορά και τη ζήτηση (σε πραγματικό χρόνο) και να εξασφαλίζει την αξιοπιστία και ασφάλεια του συστήματος. Στο καινούργιο αυτό περιβάλλον, το Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΜΗΕ) κατέχει τον κεντρικό ρόλο στο να παρέχει πρόσβαση σε όλους τους συμμετέχοντες για παράδοση ή κατανάλωση της ΗΕ.

Σε ένα περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς (ανταγωνιστικό περιβάλλον) η διαδικασία σχεδιασμού μεταφοράς γίνεται πολύ πιο δύσκολη, σε σχέση με τη μη απελευθερωμένη αγορά. Ο διαχωρισμός της παραγωγής και της μεταφοράς σημαίνει ότι η λειτουργία και ο έλεγχος του συστήματος είναι ανεξάρτητος της παραγωγής. Το σύστημα μεταφοράς πρέπει να γίνει πιο ευέλικτο και αποδοτικό, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να διατηρηθούν οι υψηλές προδιαγραφές ασφάλειας και αξιοπιστίας.

Στην απελευθερωμένη αγορά, ο αριθμός των εταιριών που εμπλέκονται τόσο στην παραγωγή όσο και στη μεταφορά αυξάνεται σημαντικά, έχοντας η καθεμιά τους δικούς της αντικειμενικούς στόχους. Οι παραγωγοί ζητούν να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους μέσω της

πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι εταιρίες μεταφοράς θέλουν να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους μέσω της παροχής υπηρεσιών μεταφοράς και όλα αυτά υπό την επίβλεψη της κεντρικής ρυθμιστικής αρχής που διασφαλίζει την αξιοπιστία και αποδοτικότητα [1.3].

Από την πλευρά του σχεδιαστή μεταφοράς ο κύριος αντικειμενικός στόχος σε μια απελευθερωμένη αγορά είναι να παρέχει ένα αμερόληπτο και ανταγωνιστικό περιβάλλον για όλους τους επενδυτές, ενώ ταυτόχρονα να διασφαλίζει την αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής.

1.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Το πρόβλημα της βέλτιστης επέκτασης του συστήματος μεταφοράς είναι ουσιαστικά ένα μεγάλης κλίμακας, μη γραμμικό, πρόβλημα βελτιστοποίησης. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού ετήσιου κόστους λειτουργίας και επένδυσης ενώ ταυτόχρονα πρέπει να διατηρηθεί υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας και ποιότητας υπηρεσιών. Παράλληλα θα πρέπει να ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Επίσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πιθανές βλάβες στη μεταφορά αλλά και στις εγκαταστάσεις παραγωγής καθώς και οι προγραμματισμένες συντηρήσεις του ΣΗΕ [1.4].

Στις αναπτυσσόμενες χώρες το πρόβλημα της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς απαιτεί προσεκτική αξιολόγηση λόγω του γεγονότος ότι οι περισσότεροι σταθμοί παραγωγής βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από τους σταθμούς κατανάλωσης. Εξαιτίας αυτής της κατάστασης το κόστος επένδυσης για το δίκτυο μεταφοράς είναι τεράστιο. Επιπλέον κάθε προσπάθεια μείωσης του κόστους μεταφοράς κατά ένα ποσοστό αποφέρει μια σημαντική αύξηση στο κεφάλαιο [1.5].

Δεδομένα προβλήματος :

- ❖ Αρχιτεκτονική δικτύου
- ❖ Πλήθος περιόδων ζήτησης φορτίου
- ❖ Διάρκεια (h) κάθε περιόδου ζήτησης
- ❖ Φορτίο (MW) σε κάθε ζυγό για κάθε χρονική περίοδο ζήτησης
- ❖ Ελάχιστη παραγωγή (MW) σε κάθε ζυγό
- ❖ Μέγιστη παραγωγή (MW) σε κάθε ζυγό
- ❖ Κόστος λειτουργίας κάθε μονάδας παραγωγής (δευτεροβάθμια εξίσωση της εξόδου της μονάδας παραγωγής)
- ❖ Κόστος επένδυσης κάθε γραμμής μεταφοράς (\$ / MW*km*year)
- ❖ Μήκος (km) της κάθε γραμμής μεταφοράς
- ❖ Αριθμός αστοχιών (βλαβών)
- ❖ Αστοχίες (βλάβες) στις εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς

Μεταβλητές σχεδίασης (οι τιμές τους ορίζουν τη βέλτιστη λύση του προβλήματος) :

- ❖ Διάνυσμα με την παραγωγή κάθε μονάδας σε κάθε περίοδο ζήτησης
- ❖ Διάνυσμα με την ισχύ κάθε γραμμής μεταφοράς σε κάθε περίοδο ζήτησης
- ❖ Διάνυσμα με τις βέλτιστες ικανότητες μεταφοράς

1.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Η επέκταση του ΣΜΗΕ είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα με πολλούς περιορισμούς και για την επίλυσή του έχουν προταθεί μέθοδοι μαθηματικού και δυναμικού προγραμματισμού.

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του προβλήματος, το οποίο περιλαμβάνει διακριτές αποφάσεις και δυναμικές λύσεις (χρονικά μεταβαλλόμενο) αποτελεί αντικείμενο έρευνας η εύρεση του κατάλληλου αλγορίθμου ο οποίος θα είναι αποδοτικός και ταυτόχρονα θα δίνει αξιόπιστες λύσεις [1.6].

Στην παρούσα μεταπτυχιακή ερευνητική διατριβή το πρόβλημα της βέλτιστης επέκτασης του ΣΜΗΕ θα λυθεί με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μια κατηγορία μεθόδων βελτιστοποίησης που βασίζουν τη λειτουργία τους στη μίμηση των διαδικασιών της φυσικής εξέλιξης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν αποδειχθεί ότι είναι πολύ αποδοτικά εργαλεία βελτιστοποίησης για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας

Άλλες προσεγγίσεις είναι η επίλυση με γραμμικό προγραμματισμό, δυναμικό προγραμματισμό, ανάλυση ευαισθησίας, προσομοιωμένη απόσβεση (simulated annealing - SA), ή και υβριδικές μεθόδους όπως ο συνδυασμός νευρωνικών δικτύων με γενετικούς αλγορίθμους και ο συνδυασμός SA, γενετικών αλγορίθμων και περιορισμένης αναζήτησης (Tabu search) [1.6].

1.5 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα κεφάλαια της εργασίας έχουν την ακόλουθη δομή:

Στο **Κεφάλαιο 2**, γίνεται μια εισαγωγή στους γενετικούς αλγορίθμους, περιγραφή της λειτουργίας τους και παρουσίαση της εφαρμογής τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης αναλύονται τα πλεονεκτήματα τους έναντι άλλων μεθόδων βελτιστοποίησης. Τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία του κεφαλαίου.

Στο **Κεφάλαιο 3**, ορίζεται και περιγράφεται το πρόβλημα της επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δίνεται το πρόβλημα με μαθηματική μορφή, αναφέρονται τα γενικά βήματα του αλγορίθμου για την επίλυση του προβλήματος και τέλος παρουσιάζεται ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επίλυση. Τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία του κεφαλαίου.

Στο **Κεφάλαιο 4**, παρουσιάζεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος της επέκτασης και γίνεται λεπτομερής επεξήγηση του τρόπου λειτουργίας του κώδικα. Τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία του κεφαλαίου.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τα τρεξίματα του κώδικα για 2 περιπτώσεις, (ενός μικρού και ενός μεσαίου συστήματος μεταφοράς ΗΕ) και για διάφορες υποπεριπτώσεις. Ταυτόχρονα προβάλλονται τα αποτελέσματα σε διαγράμματα και γίνεται ο σχολιασμός τους. Τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία του κεφαλαίου.

Στο **Κεφάλαιο 6** αναφέρονται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και εφαρμογές των προηγούμενων κεφαλαίων.

1.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] J. Fonseca, V. Miranda, “A hybrid meta-heuristic algorithm for transmission expansion planning”, *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol 23, Nr.1, 2004, pp. 250-262
- [1.2] Π. Γεωργιάκης, «Εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων στην Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας», *Τεχν. Χρον. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ*, III, τεύχ. 1-2, 2004.
- [1.3] J. McCalley, R. Kumar, V. Ajjrapu, O. Volij, H. Liu, L. Jin, W. Shang. "Models for Transmission Expansion Planning based on Reconfigurable Capacitor Switching". *EPNES Report*, 2005, Book Article, Chapter 3.
- [1.4] P. Attaviriyanupap, A. Yokoyama, “Transmission Expansion in the Deregulated Power System Considering Social Welfare and Reliability Criteria”, *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, IEEE/PES*, 2005.
- [1.5] S. Jalilzadeh, A. Kazemi, H. Shayeghi, M. Madavi, “Technical and economic evaluation of voltage level in transmission network expansion planning using GA”, *Energy Conversion and Management*, vol. 49, n°5, pp. 1119-1125 [7 page(s) (article)] (17 ref.), 1998, available at www.sciencedirect.com.
- [1.6] G. Latorre, R. Cruz, J. Areiza and A. Villegas, “Classification of publications and models on transmission expansion planning,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 938-946, 2003.

ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms – EA) είναι μια κατηγορία μεθόδων βελτιστοποίησης που βασίζουν τη λειτουργία τους στη μίμηση των διαδικασιών της φυσικής εξέλιξης. Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι εμφανίζονται σε τρεις διαφορετικές μορφές, οι οποίες ακολουθούν διακριτή πορεία, αλλά με ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους: τους **Γενετικούς Αλγορίθμους** (Genetic Algorithms – GA), τον Εξελικτικό Προγραμματισμό (Evolutionary Programming – EP) και τις Εξελικτικές Στρατηγικές (Evolution Strategies – ES).

Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγόριθμων (ΓΑ) χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι επιστήμονες από το χώρο της βιολογίας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη όμως, που οδήγησε στην μορφή με την οποία είναι γνωστοί σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan.

Η βασική ιδέα της φυσικής επιλογής, που κρύβεται πίσω από τους Εξελικτικούς Αλγορίθμους περιγράφεται από τον Michalewicz με το ακόλουθο παράδειγμα που αναφέρεται ειδικότερα στους Γενετικούς Αλγορίθμους [2.1]:

*« Ας υποθέσουμε ότι μελετάμε έναν πληθυσμό από κουνέλια. Κάποια από αυτά είναι γρηγορότερα και εξυπνότερα από τα υπόλοιπα. Αυτά τα ταχύτερα και ευφυέστερα κουνέλια είναι πολύ πιθανό να επιζήσουν σε μια επιδρομή από αλεπούδες και να μπορέσουν έτσι να συνεχίσουν το έργο που γνωρίζουν καλύτερα από κάθε άλλο: να κάνουν κουνέλια. Αντίθετα, τα πιο αργά και λιγότερο έξυπνα κουνέλια κατά πάσα πιθανότητα θα αφανιστούν ύστερα από μια τέτοια επιδρομή, χωρίς βέβαια να αποκλείσουμε και το ενδεχόμενο ότι ορισμένα από αυτά θα επιζήσουν καθαρά επειδή στάθηκαν τυχερά. Ο πληθυσμός λοιπόν που θα επιζήσει της επιδρομής θα αρχίσει κάποτε να αναπαράγεται. Το γενετικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για το νέο πληθυσμό κουνελιών θα προέρχεται από τη μείξη κάποιων αργών με κάποια γρήγορα κουνέλια, κάποιων γρήγορων με γρήγορα, κάποιων έξυπνων με κάποια χαζά κ.ο.κ. Και στην κορυφή αυτών, η φύση κατά καιρούς παράγει και κάποιο κουνέλι-φαινόμενο (γένους *lepus*) μεταλλάσσοντας κατά κάποιο τρόπο το ήδη υπάρχον γενετικό υλικό. Είναι προφανές ότι οι απόγονοι θα είναι κατά μέσο όρο γρηγορότερα και εξυπνότερα κουνέλια από τα προηγούμενα. Φυσικά το ίδιο συμβαίνει και για τις αλεπούδες, γιατί διαφορετικά τα κουνέλια θα γίνονταν κάποια στιγμή εξυπνότερα από τις αλεπούδες με αποτέλεσμα να χαλάσει ο βιολογικός κύκλος. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι ακολουθούν βήμα προς βήμα μια διαδικασία όμοια με της παραπάνω ιστορίας».*

Οι Ε.Α. βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στη μίμηση της διαδικασίας της εξέλιξης, καθώς και στη διαδικασία της κληρονομικότητας στους ζωντανούς οργανισμούς. Ήταν συνεπώς, αναμενόμενο να δανειστούν την ορολογία της βιολογίας για πολλές διαδικασίες που προσομοιάζουν στις αντίστοιχες βιολογικές [2.2].

Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της Φυσικής Γενετικής. Αναφέρονται σε άτομα (individuals) ή **γονότυπους (genotypes)** μέσα σε ένα πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γονότυπος αποτελείται από **χρωμοσώματα (chromosomes)**. Στους Γ.Α. αναφερόμαστε συνήθως σε άτομα με ένα μόνο χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από **γονίδια (genes)** που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνώρισμα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωματοσώματος που καλούνται loci. Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου (όπως για παράδειγμα το χρώμα μαλλιών) έχει τη δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Οι διαφορετικές αυτές καταστάσεις που μπορεί να πάρει το γονίδιο καλούνται **αλληλόμορφα (alleles)**.

Πολλοί οργανισμοί έχουν πολλαπλά χρωμοσώματα σε κάθε κύτταρο. Η συνολική συλλογή από γενετικό υλικό (όλα τα χρωμοσώματα μαζί) ονομάζεται **γονιδίωμα (genome)** του οργανισμού. Ο όρος γονότυπος (genotype) αναφέρεται στο συγκεκριμένο σύνολο γονιδίων που περιέχονται σε ένα γονιδίωμα. Και τέλος ο γονότυπος ύστερα από την εμβρυϊκή ανάπτυξη του οργανισμού δίνει τη θέση του στο **φαινότυπο (phenotype)**, στα σωματικά και πνευματικά του χαρακτηριστικά, όπως χρώμα ματιών, ύψος, μέγεθος εγκεφάλου, ευφυΐα κ.λπ. Ο γονότυπος δηλαδή αναφέρεται στην κωδικοποίηση των εξωτερικών χαρακτηριστικών, ενώ ο φαινότυπος στα ίδια τα χαρακτηριστικά του οργανισμού. Η φυσική επιλογή επιδρά άμεσα στο φαινότυπο αφού τα εξωτερικά χαρακτηριστικά του οργανισμού αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον. Στο γονότυπο επιδρά έμμεσα μέσω της επιβίωσης των καλύτερα προσαρμοσμένων ατόμων [2.2].

Τα χρωμοσώματα, αντίθετα με τα γονίδια δεν είναι μόνιμες δομές. Μπορούν να κατακερματιστούν και τα τμήματά τους να συνδυαστούν διαφορετικά, σε νέες ομάδες γονιδίων. Οι βασικές λειτουργίες που λαμβάνουν χώρα στους οργανισμούς είναι η **αναπαραγωγή** και η **μετάλλαξη (mutation)**.

Στη διαδικασία της αναπαραγωγής δύο μέλη του οργανισμού ανταλλάσσουν γενετικό υλικό με στόχο την παραγωγή απογόνων. Η διαδικασία γίνεται με τον εξής τρόπο: τα χρωμοσώματα κόβονται σε διάφορα σημεία και αλλάζουν θέση από το ένα μέλος του ζεύγους στο άλλο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **διασταύρωση** ή **επιχiasμός (crossover)**. Σε κάθε γονέα ανταλλάσσονται γονίδια μεταξύ των ζευγαριών των χρωμοσωμάτων για να σχηματίσουν τον γαμέτη (gamete)-ένα απλό χρωμόσωμα- και έπειτα οι γαμέτες των δύο γονέων ζευγαρώνουν και δημιουργούν ένα πλήρες σύνολο χρωματοσωμάτων (με χρωμοσώματα ανά ζεύγη) στους απογόνους τους. Οι απόγονοι που εμφανίζονται παίρνουν κάποια από τα χαρακτηριστικά των γονέων τους, ή ακόμα και χαρακτηριστικά από πιο περασμένες γενιές.

Η μετάλλαξη είναι σφάλμα στην αντιγραφή του γενετικού υλικού κατά τη διαδικασία της μίτωσης (της διαίρεσης και πολλαπλασιασμού των κυττάρων). Το σφάλμα αυτό αν συμβεί κατά τη φάση της αντιγραφής, (που ακολουθεί τον επιχiasμό), τότε το τροποποιημένο χρωμόσωμα μπορεί να περάσει στην επόμενη γενιά. Η μετάλλαξη στα είδη λαμβάνει χώρα σε πολύ αραιά χρονικά διαστήματα και προκαλείται είτε από γενετικούς παράγοντες είτε από παράγοντες του περιβάλλοντος.

Η βασική αρχή των γενετικών αλγορίθμων είναι η διατήρηση ενός πληθυσμού του προβλήματος με τη μορφή κωδικοποιημένης πληροφορίας και η εξέλιξη του πληθυσμού με την πάροδο του χρόνου. Η εξέλιξη των μελών του πληθυσμού βασίζεται στους νόμους της φυσικής επιλογής (επιβίωση του ισχυρότερου) και του ανασυνδυασμού του γενετικού υλικού μέσα στον πληθυσμό. Ο εξελισσόμενος πληθυσμός δειγματοληπτεί το χώρο αναζήτησης, συσσωρεύει πληροφορία σχετικά με τις περιοχές λύσεων καλής και κακής ποιότητας και ανταλλάσσοντας τμήματα πληροφορίας σχηματίζει λύσεις με βέλτιστη συμπεριφορά για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Έστω λοιπόν ότι έχουμε ένα σύστημα προς βελτιστοποίηση. Αρχικά πρέπει να γίνει η μοντελοποίηση του συστήματος. Το μοντέλο είναι μια απλουστευμένη απεικόνιση του συστήματος. Η απεικόνιση γίνεται με τη χρήση πεπερασμένου αριθμού παραμέτρων, των **ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης (independent design variables)**. Οι μεταβλητές αυτές μπορεί να είναι σε δυαδική μορφή (κλασικοί γενετικοί αλγόριθμοι), σε μορφή ακεραίου ή σε μορφή πραγματικού αριθμού (υβριδικό εξελικτικό αλγόριθμο). Όταν είναι σε δυαδική μορφή, κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή σχεδίασης αποτελεί ένα γονίδιο και αποτελείται από ένα δυαδικό ψηφίο (0 ή 1) ή μια σειρά δυαδικών ψηφίων (1101010).

Κάθε πίνακας-γραμμή με τα κωδικοποιημένα γονίδια αποτελεί το χρωμόσωμα (chromosome). Όταν στο χρωμόσωμα οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης πάρουν συγκεκριμένες τιμές, τότε έχουμε μία **υποψήφια λύση**. Η κωδικοποίηση ενός συγκεκριμένου συστήματος στη μορφή του χρωμοσώματος αποτελεί τον γονότυπο, ενώ το σύστημα που προκύπτει εάν εφαρμοστεί ο συγκεκριμένος γονότυπος στο μοντέλο του συστήματος, αποτελεί τον φαινότυπο που είναι αυτός που τελικά αξιολογείται.

Το πόσο ισχυρό είναι ένα χρωμόσωμα ελέγχεται από την τιμή της συνάρτησης προσαρμογής (fitness function) η οποία εξαρτάται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το δεδομένο χρωμόσωμα. Τα ισχυρότερα χρωμοσώματα επιλέγονται για να συνδυαστούν με άλλα ισχυρά για τη δημιουργία απογόνου, ενώ τα άλλα σταδιακά απομακρύνονται από τον πληθυσμό. Η βελτιστοποίηση της συνάρτησης προσαρμογής αντιστοιχεί στην προσαρμογή του ατόμου στο περιβάλλον κατά τη διαδικασία της φυσικής επιλογής.

Ο επιχiasμός υλοποιείται με ανταλλαγή γενετικού υλικού ανάμεσα σε δύο απλοειδείς γονείς (δηλαδή ανάμεσα στα χρωμοσώματα δύο λύσεων της ίδιας γενιάς). Στην πιο απλή του μορφή, τα δύο χρωμοσώματα κόβονται στην ίδια τυχαία θέση και το πρώτο τμήμα του πρώτου χρωμοσώματος ενώνεται με το δεύτερο τμήμα του δεύτερου και αντίστροφα, οπότε προκύπτουν δύο νέες λύσεις (δύο απόγονοι). Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με αλλαγή τιμής σε κάποιο γονίδιο σε μια τυχαία επιλεγμένη θέση του χρωμοσώματος. Η νέα τιμή λαμβάνεται από τα αλληλόμορφα (τις διαφορετικές τιμές που μπορεί να πάρει ένα γονίδιο) του συγκεκριμένου γονιδίου. Έτσι αν η κωδικοποίηση γίνεται με δυαδικούς αριθμούς, το στοιχείο που επιλέχθηκε, αν έχει τιμή 0 μετατρέπεται σε 1, ενώ αν έχει τιμή 1 σε 0.

Ο τελεστής της επιλογής (selection) ωθεί την έρευνα σε περιοχές με καλύτερες προοπτικές, όσον αφορά στην αντικειμενική συνάρτηση. **Οι τελεστές της μετάλλαξης και του επιχιασμού εξερευνούν (explore) τον χώρο των λύσεων, ενώ ο τελεστής της επιλογής εκμεταλλεύεται (exploits) την πληροφορία που υπάρχει μέσα στον πληθυσμό.** Οι πρώτοι τελεστές τείνουν να αυξήσουν τη διαφοροποίηση μεταξύ των ατόμων του πληθυσμού, ενώ η επιλογή τείνει να την μειώσει, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ομοιομορφία ατόμων με υψηλή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η ρύθμιση της ισορροπίας μεταξύ των δύο αντικρουόμενων λειτουργιών (exploration-exploitation) πραγματοποιείται με τον μηχανισμό της επιλογής. Ο όρος που εκφράζει την υπερίσχυση της exploitation σε βάρος της exploration ιδιότητας, ονομάζεται «πίεση επιλογής» - **selective pressure**. Με αύξηση της **selective pressure** αυξάνεται η ταχύτητα σύγκλισης του ΕΑ, αλλά μερικές φορές αυξάνεται και η πιθανότητα εγκλωβισμού σε τοπικά βέλτιστα [2.1].

Η διαδικασία βελτιστοποίησης έχει ως εξής: αρχικά δημιουργείται τυχαία ένας αριθμός P λύσεων κωδικοποιημένων υπό τη μορφή συμβολοσειρών (συνήθως δυαδικών) που αναπαριστούν τα φυσικά χρωμοσώματα. Η έννοια του πληθυσμού δίνει στους γενετικούς αλγόριθμους μοναδικά χαρακτηριστικά: οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μέθοδος στοχαστικής βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί πολλές υποψήφιες λύσεις (μεγάλο πληθυσμό υποψήφιων λύσεων) ταυτόχρονα.

Μετά τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού, κάθε μέλος του πληθυσμού αποκωδικοποιείται σε μία υποψήφια λύση του προβλήματος και ανατίθεται σε αυτή τη λύση

μία τιμή “καταλληλότητας” μέσω μίας συνάρτησης ποιότητας που δίνει ένα μέτρο της ποιότητας της κάθε λύσης. Στη συνέχεια επιλέγονται κατά ζεύγη μέλη του πληθυσμού για να αναπαραχθούν και να σχηματίσουν απογόνους (νέες λύσεις). Η επιλογή των ζευγών γίνεται πιθανοτικά, έτσι ώστε η πιθανότητα επιλογής της κάθε λύσης να είναι ανάλογη της “καταλληλότητάς” της. Αυτό εγγυάται ότι οι λύσεις υψηλής ποιότητας θα επιλεγούν πολλές φορές και θα αποτελέσουν τους “γονείς” για πολλές νέες λύσεις, ενώ οι λύσεις χαμηλής ποιότητας θα συνεισφέρουν λιγότερο στο νέο πληθυσμό, με την πιθανότητα να μην επιλεγούν για αναπαραγωγή [2.3].

Όταν επιλεγούν οι δύο λύσεις-γονείς, οι συμβολοσειρές τους ανασυνδυάζονται για την παραγωγή μίας λύσης-απογόνου με τη χρήση τελεστών που προσομοιώνουν αντίστοιχους γενετικούς μηχανισμούς. Οι βασικοί γενετικοί τελεστές που χρησιμοποιούνται είναι η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Η διασταύρωση ανασυνδυάζει τις συμβολοσειρές των γονέων παράγοντας έναν απόγονο που κληρονομεί χαρακτηριστικά και των δύο γονέων. Η διασταύρωση αν και αποτελεί το βασικό μηχανισμό αναζήτησης νέων λύσεων δεν είναι ωστόσο σε θέση να παράγει πληροφορία που δεν υπάρχει ήδη μέσα στον πληθυσμό. Η μετάλλαξη καλύπτει αυτή την ανάγκη εισάγοντας νέα πληροφορία στο νέο απόγονο. Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με την τυχαία αλλαγή συμβόλων του νέου απογόνου. Γενικά η μετάλλαξη θεωρείται ως δευτερεύων, αλλά χρήσιμος τελεστής, ο οποίος δίνει μία μη μηδενική πιθανότητα για έλεγχο και αξιολόγηση, σε κάθε δυνατή λύση.

Όταν παραχθούν M νέες λύσεις, θεωρούνται ως η νέα γενιά και αντικαθιστούν πλήρως τους “γονείς” ώστε να προχωρήσει η εξέλιξη. Πολλές γενιές απαιτούνται ώσπου ο πληθυσμός να συγκλίνει στη βέλτιστη ή σε κοντινή της λύση, με τον αριθμό των γενιών να αυξάνεται ανάλογα με τη δυσκολία του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Η γενική μορφή των βημάτων ενός εξελικτικού αλγορίθμου δίνεται παρακάτω [2.2]:

(0) Χρονική στιγμή $t=0$ Αρχικοποίηση πληθυσμού λύσεων $P(t=0)$ Αξιολόγηση του πληθυσμού των λύσεων (1) Χρονική στιγμή $t+1$ Επιλογή νέου πληθυσμού λύσεων $P(t+1)$ από τον παλιό $P(t)$ Εφαρμογή τελεστών πάνω στο νέο πληθυσμό Αξιολόγηση του νέου πληθυσμού Επιστροφή στο (1) με $t=t+1$

Το βήμα 1 επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού και τότε ο αλγόριθμος μας δίνει μια βέλτιστη λύση που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς.

Ο αλγόριθμος με τη μορφή ψευδοκώδικα έχει ως εξής:

generation=0 Initialize Evaluate KeepBest do generation=1, MAXGENS Select Crossover Mutate Report Evaluate Elitist enddo

Οι συναρτήσεις του προγράμματος είναι οι εξής:

Initialize: παράγει τον αρχικό πληθυσμό, δίνοντας τυχαίες τιμές, με ομοιόμορφη πιθανότητα, στα γονίδια κάθε χρωμοσώματος του πληθυσμού, εντός των ορίων κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής σχεδίασης.

Evaluate: υπολογίζει τη συνάρτηση προσαρμογής κάθε χρωμοσώματος. Είναι η συνάρτηση που αλλάζει ανάλογα με το πρόβλημα που επιλύεται.

KeepBest: φυλάσσει το καλύτερο άτομο κάθε γενιάς (χρωμόσωμα και συνάρτηση προσαρμογής του).

Select: επιλέγει τα χρωμοσώματα του ενδιαμέσου πληθυσμού, με χρήση της μεθόδου tournament selection.

Crossover: Επιλέγει τα ζεύγη για επιχiasμό. Σαρώνει όλα τα άτομα του πληθυσμού. Κάθε ένα επιλέγεται ως υποψήφιο για επιχiasμό με πιθανότητα **pxover**. Μόλις συμπληρωθεί το ζεύγος, καλείται η **Xover**.

Xover: πραγματοποιεί επιχiasμό μονού σημείου μεταξύ των δύο ατόμων του επιλεγμένου ζεύγους χρωμοσωμάτων. Το σημείο τομής επιλέγεται με ομοιόμορφη πιθανότητα.

Mutate: από το σύνολο του πληθυσμού και το σύνολο των γονιδίων κάθε χρωμοσώματος επιλέγονται (με ομοιόμορφη πιθανότητα) τα γονίδια που θα μεταλλαχθούν. Η νέα τιμή καθενός, προκύπτει με ομοιόμορφη πιθανότητα, από το διάστημα ορισμού της αντίστοιχης μεταβλητής σχεδίασης

Report: υπολογίζει στατιστικά στοιχεία του πληθυσμού σε κάθε γενιά και τα εξάγει στο αρχείο εξόδου

Elitist: εάν το καλύτερο άτομο της παρούσης γενιάς είναι χειρότερο από το καλύτερο της προηγούμενης, το τελευταίο αντικαθιστά το χειρότερο άτομο της παρούσης γενιάς.

2.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι και Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι τεχνικές αναζήτησης «γενικού στόχου» και οι μελετητές τους πρέπει να ασχολούνται με πολλούς κλάδους και να είναι διαθέσιμοι να ξεφύγουν από την επιστήμη τους, προκειμένου να ακολουθήσουν μια πολλά υποσχόμενη εφαρμογή ή ένα μοντέλο [2.4].

Καθώς τα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται ολοένα και περισσότερο σύνθετα, η βελτιστοποίηση της σχεδίασης, της λειτουργίας και του ελέγχου των συστημάτων αυτών γίνεται όλο και πιο δύσκολη. Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν εφαρμοστεί στο σχεδιασμό, τη λειτουργία και τον έλεγχο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο σχεδιασμός των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι μία δυναμική διαδικασία, η οποία εξελίσσεται χρονικά. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η επαρκής και αξιόπιστη εξυπηρέτηση των φορτίων, η ανάπτυξη του συστήματος, το κόστος ενέργειας, το κόστος κατασκευής, κ.ο.κ. Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας σχεδιασμού έχει αυξηθεί, ως αποτέλεσμα της αναδιάρθρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και της προόδου της τεχνολογίας. Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν εφαρμοστεί στο σχεδιασμό της επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.

Η επέκταση του συστήματος μεταφοράς είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού με πολλούς περιορισμούς και για την επίλυσή του έχουν προταθεί μέθοδοι μαθηματικού και δυναμικού προγραμματισμού. Οι μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού έχουν ως μειονεκτήματα ότι επεξεργάζονται τις μεταβλητές απόφασης σε ένα συνεχή χώρο και ότι δεν εγγυώνται την εύρεση του ολικού βέλτιστου. Για να ξεπεραστεί η δυσκολία αυτή στην πράξη, έχουν αναπτυχθεί υβριδικές μέθοδοι, οι οποίες συνδυάζουν ευρετικές μεθόδους με δυναμικό προγραμματισμό, δηλ. προεπιλέγονται καταστάσεις και τροποποιούνται διαδοχικά οι περιοχές αναζήτησης, προκειμένου να βρεθεί ένα τοπικό ελάχιστο. Για την επίλυση του προβλήματος της ελαχιστοποίησης του κόστους επέκτασης του συστήματος μεταφοράς έχουν επίσης προταθεί οι γενετικοί αλγόριθμοι, επειδή από τη φύση τους μπορούν να επεξεργάζονται ακέραιες μεταβλητές, μπορούν να εφαρμοστούν σε προβλήματα μεγάλου μεγέθους και έχουν τη δυνατότητα εύρεσης του ολικού βέλτιστου ή του σχεδόν βέλτιστου σε εύλογο υπολογιστικό χρόνο. Οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν απαιτούν γνώση ή πληροφορία για την κλίση του χώρου αναζήτησης και δεν επηρεάζονται από πιθανές ασυνέχειες στο χώρο αναζήτησης [2.5].

2.3 Πλεονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων

Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων είναι τα εξής [2.6]:

- 1) **Μπορούν να επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα.** Ένας από τους σημαντικότερους λόγους χρήσης των ΓΑ είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Τα προβλήματα που έχουν πολλές ,μη προσδιορισμένες λύσεις ή έχουν συναρτήσεις με πολλές διακυμάνσεις έχει αποδειχθεί ότι αντιμετωπίζονται καλύτερα από ΓΑ.
- 2) **Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα.** Οι ΓΑ μπορούν αν προστεθούν στα ήδη υπάρχοντα μοντέλα χωρίς την απαίτηση της επανασχεδίασής τους. Συνεργάζονται εύκολα με τον υπάρχοντα κώδικα καθώς χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν χωρίς να ενδιαφέρει η δομή του υπόλοιπου συστήματος
- 3) **Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι.** Σε πολλές εφαρμογές έχουν προστεθεί λειτουργίες στον ΓΑ που διαφέρουν από τις κλασικές για βελτίωση της αποδοτικότητας.
- 4) **Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους.** Σε περιπτώσεις που άλλες μέθοδοι έχουν υψηλή αποδοτικότητα υπάρχει η δυνατότητα για χρησιμοποίηση ενός υβριδικού σχήματος ΓΑ σε συνδυασμό με άλλη μέθοδο.
- 5) **Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο.** Οι ΓΑ μπορούν να εφαρμοστούν σε όλα τα πεδία που είναι αναγκαία η βελτιστοποίηση, όπως στο σχεδιασμό μηχανών, στην οικονομία, στην εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων, στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα κ.α.
- 6) **Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται.** Σε άλλες μεθόδους υπάρχει η απαίτηση για τη συνέχεια των συναρτήσεων, την έλλειψη θορύβου και άλλοι περιορισμοί οι οποίοι απουσιάζουν από τους ΓΑ.
- 7) **Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού.** Οι ΓΑ σε κάθε βήμα εξετάζουν μεγάλες ποσότητες πληροφορίας αφού κάθε άτομο αντιπροσωπεύει πολλά άλλα αναλογία είναι της τάξης του $O(n^3)$, δηλ. 10 άτομα αντιστοιχούν σε 1000. Έτσι οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.
- 8) **Είναι μια μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης (exploration) και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας (exploitation).** Τα δυο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά μεταξύ τους και οι ΓΑ καταφέρνουν να τα συνδυάσουν με βέλτιστο τρόπο.

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, New York, 1996.
- [2.2] D.E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [2.3] Melanie Mitchel, An Introduction to Genetic Algorithms, The MIT Press 1999.
- [2.4] Ι. Νικολός, «Εισαγωγή στους Εξελικτικούς Αλγόριθμους», Μηχανικοί Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης, παρουσιάσεις μεταπτυχιακού μαθήματος.
- [2.5] Περράκης, Κ., “*Ανάλυση της διασυνδεδεμένης λειτουργίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας*”, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Δεκέμβριος 1998.
- [2.6] Ε. Γεωργόπουλος, Σ. Λυκοθανάσης, «Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους», *Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών-Πολυτεχνική Σχολή, Εργαστήριο Αναγνώρισης Προτύπων*, Πάτρα, 2008.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα του σχεδιασμού επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Transmission Expansion Planning Problem) εμπεριέχει το πρόβλημα του προσδιορισμού ενός βέλτιστου συστήματος μεταφοράς. Για τον καθορισμό ενός τέτοιου δικτύου αναφοράς απαιτείται η επίλυση ενός προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος υπό περιορισμούς (security constrained optimal power flow, OPF problem) [3.1].

Στην απλούστερη μορφή το πρόβλημα υλοποιείται χρησιμοποιώντας τη συνεχή βέλτιστη ροή φορτίου (dc optimal power flow). Σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του ετήσιου κόστους παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας υπό τους περιορισμούς των νόμων ρευμάτων και τάσεων Kirchhoff καθώς και των ορίων λειτουργίας των μονάδων του συστήματος. Πρέπει να καλυφθούν διάφορα επίπεδα ζήτησης, λαμβάνοντας υπόψη την καμπύλη ζήτησης κατά τη διάρκεια ενός έτους.

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Ο αντικειμενικός στόχος του προβλήματος του σχεδιασμού της επέκτασης του συστήματος μεταφοράς είναι η βελτιστοποίηση της τοπολογίας του δικτύου με την επιλογή των γραμμών μεταφοράς που πρέπει να προστεθούν στο υπάρχον δίκτυο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος παραγωγής και μεταφοράς. Η ελαχιστοποίηση υπόκειται στους περιορισμούς των μονάδων παραγωγής και του δικτύου μεταφοράς.

Το πρόβλημα αποτελείται από 2 αλληλοεξαρτώμενα προβλήματα : 1) το πρόβλημα του βέλτιστου δικτύου (**optimum network problem**) και 2) το υποπρόβλημα του δικτύου αναφοράς (**reference network subproblem**) που εμπεριέχεται στο πρόβλημα βέλτιστου δικτύου [3.1].

3.3 ΥΠΟΠΡΟΒΛΗΜΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Το δίκτυο αναφοράς είναι τοπολογικά ίδιο ακριβώς με ένα υπάρχον δίκτυο (ή με ένα δίκτυο προς επέκταση), όπου οι γεννήτριες και τα φορτία παραμένουν σταθερά. Κάθε γραμμή μεταφοράς έχει μια βέλτιστη ικανότητα μεταφοράς (optimal capacity). Οι βέλτιστες ικανότητες μεταφοράς προσδιορίζονται ελαχιστοποιώντας το άθροισμα του συνολικού κόστους (παραγωγής και μεταφοράς) κατά τη διάρκεια του έτους λαμβάνοντας υπόψη τους υπάρχοντες περιορισμούς. Συγκρίνοντας τις ικανότητες μεταφοράς στις γραμμές του δικτύου αναφοράς και του αρχικού δικτύου, μπορούμε να καθορίσουμε τις ανάγκες για νέες επενδύσεις σε γραμμές μεταφοράς.

Για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του κόστους λειτουργίας των ζυγών παραγωγής και του κόστους επένδυσης των γραμμών μεταφοράς [3.2].

Κόστος λειτουργίας

Αυτό είναι το κόστος παραγωγής και στην περίπτωση του προβλήματος μας διατυπώνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$O_c = a_i + b_i P_{it} + c_i P_{it}^2 \quad (3.1)$$

Όπου:

a_i = Σταθερά κόστους για την γεννήτρια i

b_i = Σταθερά κόστους για την γεννήτρια i

c_i = Σταθερά κόστους για την γεννήτρια i

P_{it} = Παραγόμενη ισχύς του ζυγού παραγωγής i κατά την περίοδο ζήτησης t

Κόστος επένδυσης

Αυτό είναι το κόστος μεταφοράς και διατυπώνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\Omega_c(T_c) = k_c l_c T_c \quad (3.2)$$

Όπου:

k_c = Οριακό ετήσιο κόστος αγοράς της γραμμής μεταφοράς c ανά μονάδα μήκους σε \$/MW*km*year

l_c = Το μήκος της γραμμής μεταφοράς c σε km

T_c = Βέλτιστη ικανότητα μεταφοράς (optimal capacity) της γραμμής μεταφοράς c σε MW

Αντικειμενική Συνάρτηση (ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους)

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος μας είναι η παρακάτω:

$$\min_{P_{pg}, T_b} \left[\sum_{p=1}^{np} \tau_p \sum_{g=1}^{ng} \left(A_g P_{pg} + \frac{1}{2} B_g P_{pg}^2 \right) + \sum_{b=1}^{nl} k_b l_b T_b \right] \quad (3.3)$$

Όπου:

p = χρονική περίοδος (περίοδος ζήτησης)

τ_p = διάρκεια χρονικής περιόδου σε ώρες (h)

g = γεννήτριες (generators)

ng = σύνολο γεννητριών

A_g = σταθερά οριακού κόστους λειτουργίας για τη γεννήτρια g ($A_g = b_i$)

B_g = σταθερά οριακού κόστους λειτουργίας για τη γεννήτρια g ($B_g = 2 c_i$)

P_{pg} = η παραγόμενη ισχύς της γεννήτριας g την χρονική περίοδο p

b = γραμμές μεταφοράς (buses)

T_b = βέλτιστη ικανότητα μεταφοράς της γραμμής μεταφοράς b

Η βελτιστοποίηση υπόκειται στους περιορισμούς του νόμου ρευμάτων Kirchhoff (NPK) και του νόμου τάσεων Kirchhoff (NTK).

Σύμφωνα με τον NPK η συνολική ισχύς που εισέρχεται σε ένα κόμβο πρέπει να ισούται με τη συνολική ισχύ που εξέρχεται από αυτόν. Οι περιορισμοί ισχύουν για κάθε κόμβο του δικτύου.

Ο NPK εκφράζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$[A_d]^T \cdot F_p - P_p + D_p = 0 \quad \forall p = 1, \dots, np \quad (3.4)$$

Όπου:

- $[A_d]^T$ = πίνακας προσεγγισιμότητας (node-branch incidence matrix)

Ο πίνακας έχει μέγεθος (nb x nl) (nb: number of buses, nl: number of lines) και ορίζεται ως εξής (όπου a_{ij} τα στοιχεία του πίνακα):

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν η ροή εξέρχεται από τον κόμβο } i \\ -1, & \text{αν η ροή εισέρχεται στον κόμβο } i \\ 0, & \text{αν δεν υπάρχει ροή από ή προς τον κόμβο } i \end{cases}$$

- F_p = διάνυσμα ροών πραγματικής ισχύος γραμμών μεταφοράς κατά τη χρονική περίοδο p
- P_p = διάνυσμα παραγόμενων ισχύων των γεννητριών κατά τη χρονική περίοδο p
- D_p = διάνυσμα της ζήτησης των ζυγών φορτίου κατά τη χρονική περίοδο p

Σύμφωνα με τον NTK για οποιοδήποτε συγκεντρωμένο κύκλωμα, για οποιονδήποτε από τους βρόχους του, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, το αλγεβρικό άθροισμα όλων των τάσεων κλάδου σε ένα βρόχο είναι μηδέν.

Από τον νόμο αυτό συνεπάγονται οι περιορισμοί που συνδέουν τις ροές ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και τη συνολική ισχύ (εισερχόμενη-εξερχόμενη) στους ζυγούς. Οι περιορισμοί δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις [3.3]:

$$F_p = [S_F] \cdot (P_p - D_p) \quad \forall p = 1, \dots, np \quad (3.5)$$

Όπου:

- $[S_F]$ = πίνακας ευαισθησίας (sensitivity or shift factor matrix)

Ο πίνακας ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$[S_F] = [Y_{br}] \cdot [A_d] \cdot [Z] \quad (3.6)$$

Όπου $[Y_{br}]$ = πίνακας αγωγιμότητας κλάδων (branch admittance matrix). Ο πίνακας έχει μέγεθος (nl x nl), είναι διαγώνιος και τα στοιχεία της κυρίας διαγωνίου είναι οι αγωγιμότητες για κάθε γραμμή μεταφοράς. Π.χ. για 3 γραμμές μεταφοράς ο πίνακας είναι ο παρακάτω:

$$Y_{br} = \begin{bmatrix} y_1 & 0 & 0 \\ 0 & y_2 & 0 \\ 0 & 0 & y_3 \end{bmatrix} \quad \text{ή} \quad Y_{br} = \begin{bmatrix} 1/x_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/x_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/x_3 \end{bmatrix}$$

όπου x_1, x_2, x_3 οι επαγωγικές αντιστάσεις των γραμμών

Όπου $[Z]$ = πίνακας αντίστροφος του «ελαττωμένου» πίνακα αγωγιμότητας Y του δικτύου (δες παρακάτω για πίνακα Y και Z)

- F_p = διάνυσμα ροών πραγματικής ισχύος των γραμμών μεταφοράς κατά τη χρονική περίοδο p
- P_p = διάνυσμα παραγόμενων ισχύων των γεννητριών κατά τη χρονική περίοδο p (εισερχόμενη ισχύς)
- D_p = διάνυσμα της ζήτησης των ζυγών φορτίου κατά τη χρονική περίοδο p (εξερχόμενη ισχύς)

Εκτός από τους παραπάνω περιορισμούς έχουμε και θερμικούς περιορισμούς για τις γραμμές μεταφοράς για τις ροές των γραμμών μεταφοράς. Οι περιορισμοί αυτοί δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$-T \leq F_p \leq T \quad \forall p = 1, \dots, np \quad (3.7)$$

Όπου:

- T = το διάνυσμα των ικανοτήτων μεταφοράς (capacities) των γραμμών.

Όλοι οι παραπάνω περιορισμοί προκύπτουν εφαρμόζοντας dc ροή φορτίου και αγνοώντας τις απώλειες.

Η dc ροή φορτίου αποτελεί απλούστευση των εξισώσεων ροής φορτίου. Η απλούστευση αυτή οδηγεί σε ένα μοντέλο που περιγράφει μόνο τη ροή πραγματικής ισχύος, ενώ οι άεργες ισχύς αγνοούνται [3.4]. Οι υποθέσεις για την dc ροή είναι οι ακόλουθες:

- Η διαφορά των φάσεων των ζυγών θεωρείται πολύ μικρή και τα μέτρα των τάσεων ίσα με 1 α.μ.
- Η ωμική αντίσταση των γραμμών μεταφοράς αμελείται και θεωρείται γνωστή η επαγωγική αγωγιμότητα σειράς.

Για σύστημα n ζυγών οι dc εξισώσεις ροής φορτίου γράφονται στην παρακάτω μορφή:

$$P = [Y] \cdot \delta \rightarrow$$

$$\delta = [Y]^{-1} \cdot P \quad (3.8)$$

Όπου:

- $[Y]$ = πίνακας αγωγιμότητας του δικτύου [3.5]. Έχει μέγεθος $(nb \times nb)$ και για σύστημα (3x3) έχει τη μορφή

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & -y_{12} & -y_{13} \\ -y_{21} & y_{22} & -y_{23} \\ -y_{31} & -y_{32} & y_{33} \end{bmatrix}$$

Τα στοιχεία της κυρίας διαγωνίου για κάθε γραμμή του πίνακα προκύπτουν από το άθροισμα των υπόλοιπων στοιχείων της κάθε γραμμής

$$y_{ii} = \sum_{j \neq i}^{nb} y_{ij}$$

Από τον πίνακα Y αν αφαιρέσουμε την τελευταία γραμμή και στήλη προκύπτει ο «ελαττωμένος» πίνακας και αν πάρουμε τον αντίστροφο του «ελαττωμένου» προκύπτει ο πίνακας Z που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Για τη βελτιστοποίηση πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψη και τα όρια των μεταβλητών σχεδίασης, όπως τα όρια λειτουργίας των γεννητριών και τα όρια των ικανοτήτων μεταφοράς των γραμμών. Οι σχέσεις που μας δίνουν τα όρια αυτά είναι οι εξής:

$$P_{MIN} \leq P_p \leq P_{MAX} \quad \forall p = 1, \dots, np \quad (3.9)$$

$$0 \leq T \leq \infty \quad (3.10)$$

Με συντομία ο επαναληπτικός αλγόριθμος επίλυσης του υποπροβλήματος δίνεται παρακάτω [3.2]

1. Επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου (OPF) για κάθε περίοδο ζήτησης.
2. Έλεγχος ικανοποίησης των συνθηκών του συστήματος εφαρμόζοντας τη dc ροή φορτίου.
3. Προσδιορισμός των υπερφορτωμένων γραμμών μεταφοράς για κάθε περίοδο ζήτησης.
4. Εάν όλες οι γραμμές είναι μέσα στα όρια, τότε πήγαινε στο βήμα 6, αλλιώς πήγαινε στο βήμα 5.
5. Πρόσθεσε περιορισμό για κάθε υπερφορτωμένη γραμμή και πήγαινε στο βήμα 1.
6. Υπολογισμός της βέλτιστης παραγωγής των ζυγών, των βέλτιστων ροών πραγματικής ισχύος των γραμμών μεταφοράς και βέλτιστων ικανοτήτων μεταφοράς.
7. Τερματισμός αλγορίθμου.

3.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το κυρίως πρόβλημα που επιλύει το πρόγραμμά μας είναι το πρόβλημα του βέλτιστου δικτύου, δηλ. το ποιες νέες γραμμές μεταφοράς πρέπει να προστεθούν στο υπάρχον δίκτυο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος παραγωγής και μεταφοράς.

Η λύση για το πρόβλημα αυτό μπορεί να προκύψει δίνοντας αρχικά μια λίστα από υποψήφιες γραμμές μεταφοράς (exhaustive list of candidate new transmission lines) και αποφασίζοντας ποιες γραμμές από τη λίστα αυτή πρέπει να προστεθούν στο δίκτυο ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος. Κατά τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος του βέλτιστου δικτύου και για κάθε εξεταζόμενο συνδυασμό νέων γραμμών, επιλύεται κάθε φορά το υποπρόβλημα του δικτύου αναφοράς (reference network subproblem).

Ο προτεινόμενος γενετικός αλγόριθμος είναι ένας κλασσικός γενετικός αλγόριθμος όπως παρουσιάζεται από τον Z. Michalewicz στο βιβλίο του «Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs» [3.6]. Το μήκος του χρωμοσώματος είναι σταθερό (σταθερός αριθμός ανεξάρτητων παραμέτρων σχεδίασης), εμπεριέχεται μοντέλο ελιτισμού σύμφωνα με το οποίο, το καλύτερο μέλος του πληθυσμού περνάει πάντα στην επόμενη γενιά, χρησιμοποιείται τελεστής επιχiasμού μονού σημείου (one point crossover) και τελεστής ομοιόμορφης μετάλλαξης (uniform mutation). Τέλος η επιλογή που πραγματοποιείται είναι η tournament selection με τελεστή επιλογής q .

Ο γενετικός αλγόριθμος αποτελείται από τα εξής βήματα:

1. Για δοσμένη τοπολογία του δικτύου, δοσμένο μελλοντικό φορτίο σε κάθε ζυγό του δικτύου και δοσμένες μελλοντικές μονάδες παραγωγής σχηματίζεται λίστα υποψηφίων προς κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς (list of candidate new transmission lines).

Π.χ.

Line	1-2	2-4	3-5	3-6	4-6	4-6	4-6
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

2. Δημιουργία αρχικού πληθυσμού υποψηφίων λύσεων (initial population of candidate solutions). Ο αρχικός πληθυσμός παράγεται τυχαία από τη δοσμένη λίστα. Ο αρχικός πληθυσμός αποτελείται από ένα σύνολο χρωμοσωμάτων, Π.χ.

Line	1-2	2-4	3-5	3-6	4-6	4-6	4-6
Chromosome1	0	0	1	0	1	1	0
Chromosome2	1	0	1	0	0	1	0
Chromosome3	1	1	1	1	1	0	0
Chromosome4	0	0	1	0	1	1	0
Chromosome5	0	1	1	1	1	0	0
Chromosome6	0	1	1	0	1	1	0

Κάθε χρωμόσωμα αντιπροσωπεύει ένα πιθανό σενάριο επέκτασης του δικτύου δηλ. είναι μια λίστα από νέες γραμμές μεταφοράς που ενδέχεται να προστεθούν στο δίκτυο. Το χρωμόσωμα είναι δυαδικό, δηλ. κάθε στοιχείο του μπορεί να πάρει τιμή 0 ή 1. Στη θέση που υπάρχει το 1 σημαίνει ότι η αντίστοιχη γραμμή που βρίσκεται στη λίστα με τις υποψήφιες γραμμές θα προστεθεί στο δίκτυο στο πιθανό σενάριο, αλλιώς όχι.

3. Όσο το κριτήριο τερματισμού δεν ικανοποιείται, ο γενετικός επαναλαμβάνει τις παρακάτω φάσεις
 - a. Αξιολόγηση (evaluation) των υποψηφίων λύσεων (χρωμοσωμάτων) εκτελώντας τον αλγόριθμο της βέλτιστης ροής φορτίου (OPF) της παραγράφου 2.3
 - b. Αναπαραγωγή
 - c. Επιχιασμός και μετάλλαξη
 - d. Δημιουργία του νέου πληθυσμού
4. Όταν θα ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού ο γενετικός θα έχει βρει μια λύση η οποία ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση και ταυτόχρονα ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς.

Π.χ. αν η βέλτιστη λύση είναι η ακόλουθη,

Optimal chromosome	0	1	1	0	0	1	1
Line	1-2	2-4	3-5	3-6	4-6	4-6	4-6

Αυτό σημαίνει πως από τις 7 υποψήφιες γραμμές μεταφοράς θα πρέπει να κατασκευαστούν οι 4 μόνο, δηλ. οι 2-4, 3-5, 4-6, 4-6.

Παράμετροι ελέγχου γενετικού αλγορίθμου (Control Parameters)

- Δυαδικά ψηφία κωδικοποίησης κάθε μεταβλητής (NVARs)
- Αριθμός χρωμοσωμάτων (POPSIZE)
- Αριθμός γενεών (ανακυκλώσεων) (MAXGENS)
- Πιθανότητα επιχιασμού ή διασταύρωσης (PXOVER)
- Πιθανότητα μετάλλαξης (PMUTATION)
- Τελεστής επιλογής (q)

Η επιλογή των τιμών των παραμέτρων ελέγχου κατέχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην απόδοση του γενετικού αλγορίθμου και μόνο μέσω των δοκιμών μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τις κατάλληλες τιμές για κάθε πρόβλημα [3.7].

Γενικά για την επιλογή των παραμέτρων αυτών ισχύουν τα παρακάτω [3.7] :

Ο αριθμός χρωμοσωμάτων δηλ. το μέγεθος του πληθυσμού (POPSIZE) όσο μεγαλύτερο είναι ,αυξάνει την ποσότητα των παραλλαγών που παρουσιάζονται στον αρχικό πληθυσμό σε βάρος των περισσότερων υπολογισμών της καταλληλότητας. Το μέγεθος του πληθυσμού εξαρτάται από το μήκος του χρωμοσώματος και το πρόβλημα. Ένας καλός πληθυσμός περιλαμβάνει μια ποικιλόμορφη επιλογή των ενδεχόμενων δομικών μονάδων, οδηγώντας σε καλύτερη αναζήτηση. Αν ο πληθυσμός χάσει την ποικιλομορφία του τότε λέμε ότι ο αλγόριθμος έχει πρόωρη σύγκλιση και γίνεται μικρή αναζήτηση. Όταν έχουμε μεγάλο μέγεθος χρωμοσώματος και για σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης απαιτούνται μεγαλύτερα μεγέθη πληθυσμών. Τα μεγέθη που προτείνονται από πολλούς ερευνητές για το μέγεθος του πληθυσμού είναι από 25 ως 200 χρωμοσώματα.

Ο αριθμός γενεών (MAXGENS) είναι το κριτήριο τερματισμού του γενετικού και εξαρτάται από τη σύγκλιση του, συνήθως ο αριθμός κυμαίνεται από 5 ως 100 γενεές, ανάλογα με το πρόβλημα.

Η πιθανότητα επιχiasμού (PXOVER) αναφέρεται στη διαδικασία του επιχiasμού (επιχiasμός μονού σημείου στην προκειμένη περίπτωση) ως εξής: μόλις επιλεγούν τα δύο χρωμοσώματα για να διασταυρωθούν, επιλέγεται ένας τυχαίος αριθμός από το διάστημα [0-1]. Αν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος από την πιθανότητα επιχiasμού PXOVER τότε πραγματοποιείται ο επιχiasμός (διασταύρωση). Συνήθως επιλέγεται πιθανότητα από 0.5 ως 1.

Η πιθανότητα μετάλλαξης (PMUTATION) προσδιορίζει την πιθανότητα που έχει ένα γονίδιο του χρωμοσώματος να αλλάξει τιμή από 0 σε 1 ή αντίστροφα. Η μετάλλαξη αποκαθιστά μέρος της ποικιλίας του γενετικού υλικού το οποίο έχει καταστραφεί από τις διαδικασίες επιλογής και επιχiasμού. (Μπορούμε να πούμε ότι ενώ η επιλογή και ο επιχiasμός τείνουν να ομογενοποιήσουν τον πληθυσμό βασισμένα στην αρχή της επιβίωσης του ισχυρότερου, η μετάλλαξη επαναφέρει μέρος των γονιδίων που έχουν εξαλειφτεί κατά τη διαδικασία και που μπορεί να είναι απαραίτητα για την αποφυγή τοπικών λύσεων). Πρακτικά έχει διαπιστωθεί ότι στο πρόβλημα της βέλτιστης επέκτασης συστήματος μεταφοράς η τιμή για την πιθανότητα μετάλλαξης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή που χρησιμοποιείται σε άλλες εφαρμογές γενετικών αλγορίθμων. Οι τιμές συνήθως κυμαίνονται από 0.001 ως 0.08.

Ο τελεστής επιλογής (q) είναι η παράμετρος που ρυθμίζει την «πίεση επιλογής» - selective pressure, η οποία εκφράζει την υπερίσχυση της exploitation σε βάρος της exploration ιδιότητας. Με αύξηση της selective pressure αυξάνεται η ταχύτητα σύγκλισης του ΓΑ, αλλά μερικές φορές αυξάνεται και η πιθανότητα εγκλωβισμού σε τοπικά βέλτιστα. Στον αλγόριθμό μας χρησιμοποιούμε την tournament selection στην οποία για να επιλέξουμε ένα νέο μέλος του ενδιαμέσου πληθυσμού, με ομοιόμορφη πιθανότητα επιλέγουμε q μέλη του πληθυσμού, με $q \geq 1$. Συνήθως $q=2$ ή $q=3$. Από τα q αυτά μέλη επιλέγουμε το καλύτερο για να πάει στον ενδιαμέσο πληθυσμό. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι να συμπληρωθεί ο αριθμός των ατόμων του ενδιαμέσου πληθυσμού.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση του γενετικού αλγορίθμου αν κατά το αρχικό στάδιο της εφαρμογής του δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ένας τρόπος είναι μεταβάλλοντας τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων. Αυτή η μέθοδος δοκιμής-λάθους μπορεί να είναι χρονοβόρα αλλά έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσης. Αν η αλλαγή των παραμέτρων δεν έχει επίδραση, τότε μπορεί να χρειάζεται αλλαγή της κωδικοποίησης. Σε άλλες εφαρμογές χρειάζεται δυαδική κωδικοποίηση ενώ σε άλλες πραγματική [3.7].

3.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] P. S. Georgilakis, C. Karytsas, P. G. Vernados, "Genetic algorithm solution to the market-based transmission expansion planning problem," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 10, No. 5, pp. 1120-1125, 2008.
- [3.2] D. S. Kirschen and G. Strbac, *Fundamentals of power system economics*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2004.
- [3.3] Loi Lei Lai, "Intelligent System Applications in Power Engineering: Evolutionary Programming and Neural Networks", Wiley, John & Sons, Incorporated, 1998.
- [3.4] Περράκης, Κ., "Ανάλυση της διασυνδεδεμένης λειτουργίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Δεκέμβριος 1998.
- [3.5] Π. Γεωργιάκης, «Ηλεκτρική Οικονομία», Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά, 2006
- [3.6] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, New York, 1996.
- [3.7] R. Gallego, A. Monticelli, and R. Romero, "Transmission system expansion planning by an extended genetic algorithm," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 3, pp. 329-335, 1998.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του λογισμικού που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος. Για την ανάπτυξη των μοντέλων επέκτασης συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες γλώσσες προγραμματισμού, περιβάλλοντα επίλυσης επιστημονικού υπολογισμού και έτοιμα πακέτα για μοντελοποίηση συστημάτων.

Γλώσσες προγραμματισμού (Programming Languages)

Οι πιο διαδεδομένες για την επίλυση αυτών των προβλημάτων είναι οι γλώσσες Fortran και C. Οι γλώσσες αυτές χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό μοντέλων για πραγματικά δίκτυα παραγωγής και μεταφοράς, όπου ο χρόνος εκτέλεσης κατέχει ιδιαίτερη σημασία, το μοντέλο θα πρέπει να τρέχει συνεχώς διαφορετικά σενάρια και είναι απαραίτητο να είναι συμβατό με άλλες εφαρμογές. Εκτός από τις δύο αυτές γλώσσες, κυκλοφορούν και κάποιες άλλες πολύ ισχυρές όπως οι Haskell, Erlang και Mozart [4.1].

Περιβάλλοντα επίλυσης επιστημονικού υπολογισμού (Environments for Numerical/Symbolic Calculation)

Τα περιβάλλοντα που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι τα Matlab, Scilab, MAPLE, Mathematica, Fermat, καθώς και το Excel για μικρού μεγέθους προβλήματα. Η Matlab δεν έχει σχεδιαστεί ειδικά για να επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης αλλά προσφέρει ιδιαίτερη ευκολία στον χειρισμό των πινάκων και διανυσμάτων, μειώνοντας έτσι τον προγραμματιστικό χρόνο και αποφεύγοντας τα διάφορα πιθανά λάθη προγραμματισμού κατά την μαθηματική αναπαράσταση του μοντέλου. Παρά την ευκολία που παρέχει στους μαθηματικούς υπολογισμούς και τη δυνατότητα για πολύ καλές γραφικές αναπαραστάσεις, υπάρχει το μειονέκτημα της μικρότερης υπολογιστικής ταχύτητας σε σχέση με τις παραπάνω γλώσσες προγραμματισμού.

Πακέτα λογισμικού για μοντελοποίηση συστημάτων (Modeling Systems)

Τα πιο γνωστά είναι τα πακέτα GAMS, AMPL, LINDO, AIMMS, XPRESS [4.1]. Μέσω των πακέτων αυτών ο χρήστης δίνει ως είσοδο μια περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης με σχετικά απλό και βολικό τρόπο και παίρνει ως έξοδο το αποτέλεσμα με ανάλογο τρόπο. Η μετατροπή της εισόδου στη μορφή που χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης γίνεται αυτόματα μέσω του πακέτου. Ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει την περιγραφή γρήγορα και απλά, να αλλάξει είδος επιλύτη (έτοιμοι κώδικα βελτιστοποίησης-solver) να αλλάξει από γραμμικό το πρόβλημα σε μη γραμμικό, όλα αυτά πολύ γρήγορα και χωρίς κόπο. Όμως δεν μπορεί να λύσει διαφορετικές παραλλαγές του ίδιου προβλήματος σε μία εκτέλεση του προγράμματος και δεν χρησιμοποιούν ευρετικούς επιλύτες (heuristic solvers) οι οποίοι είναι απαραίτητοι για μεγάλα και σύνθετα προβλήματα.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Το λογισμικό της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε στο περιβάλλον (και γλώσσα προγραμματισμού) MATLAB. Η MATLAB είναι μια υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού και παράλληλα ένα περιβάλλον εργασίας στο οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάπτυξη αλγορίθμων, απεικόνιση στοιχείων – αποτελεσμάτων, ανάλυση δεδομένων, αριθμητικοί υπολογισμοί. Το λογισμικό πακέτο MATLAB καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών, όπως επεξεργασία εικόνων και σημάτων, επικοινωνίες, σχεδιασμός ελέγχου, μετρήσεις, προσομοιώσεις, οικονομικές αναλύσεις κ.ά.. Οι εφαρμογές της MATLAB επεκτείνονται με τη χρήση των πρόσθετων εργαλείοις (MATLAB toolbox).

Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η Matlab 7.0.1.24704 (R14) Service Pack 1. Το λογισμικό έτρεξε σε υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows XP Home Edition Version 2002 Service Pack 2 και τεχνικά χαρακτηριστικά Genuine Intel® CPU T2500 @ 2.00GHz, με μνήμη (RAM) 1,00GB.

Οδηγίες για τον προγραμματιστή-χρήστη

- Για την εκτέλεση της εφαρμογής τρέχουμε το αρχείο **main.m** στο command window της Matlab. Όλα τα αρχεία της εφαρμογής θα πρέπει να είναι τοποθετημένα στο ίδιο directory (το οποίο θέτουμε ως current directory της Matlab).
- Ως αρχεία εισόδου η εφαρμογή χρησιμοποιεί τα αρχεία **netdata.xls**, **NEWdata.xls** και **genpar.dat**. Τα 2 πρώτα περιέχουν τα δεδομένα του υπάρχοντος δικτύου και τα δεδομένα για την επέκταση του αντίστοιχα. Ανοίγουν με το πρόγραμμα Excel του Microsoft Office και αποτελούνται το πρώτο από 11 φύλλα εργασίας (worksheets) και το δεύτερο από 10 φύλλα. Αναλυτικά :

netdata.xls

1. TIME: Εδώ τοποθετούνται σε μια γραμμή (οριζόντια) οι διάρκειες των χρονικών περιόδων σε ώρες (h).
2. BUSES: Εδώ τοποθετούνται πάλι οριζόντια οι ζυγοί (κόμβοι) από τους οποίους αποτελείται το σύστημα
3. LINES: Εδώ τοποθετούνται σε έναν πίνακα οι γραμμές μεταφοράς του δικτύου ως εξής, για κάθε γραμμή του πίνακα, στην πρώτη στήλη γράφουμε το ζυγό αναχώρησης της γραμμής μεταφοράς και στη δεύτερη στήλη το ζυγό άφιξης. Έτσι ο πίνακας θα έχει τόσες γραμμές όσες οι γραμμές μεταφοράς του δικτύου και 2 στήλες (ζυγός αναχώρησης-ζυγός άφιξης).
4. DEMAND: Εισάγουμε τον πίνακα με τη ζήτηση (φορτίο) για κάθε ζυγό και για κάθε χρονική περίοδο. Το πλήθος των γραμμών του πίνακα ισούται με τον αριθμό των ζυγών και το πλήθος των στηλών με το πλήθος των χρονικών περιόδων (περιόδων ζήτησης). Στην πρώτη στήλη εισάγουμε τη ζήτηση για την πρώτη χρονική περίοδο, στη δεύτερη για τη 2^η χρονική περίοδο κ.ο.κ.
5. A: Εισάγουμε τους συντελεστές A του οριακού κόστους παραγωγής-λειτουργίας (marginal operational cost) για κάθε κόμβο σε έναν πίνακα - γραμμή. (Πάλι η σειρά τοποθέτησης πρέπει να συμπίπτει με τη σειρά τοποθέτησης των κόμβων στον πίνακα BUSES.)

6. B: Εισάγουμε τους συντελεστές B του οριακού κόστους λειτουργίας σε πίνακα-γραμμή.
7. K: Πίνακας- γραμμή με τους συντελεστές k_c (σε $\$/MW*km*year$) του κόστους μεταφοράς-επένδυσης (investment cost) για κάθε γραμμή μεταφοράς. (Εδώ η σειρά τοποθέτησης πρέπει να ακολουθεί τη σειρά τοποθέτησης των γραμμών μεταφοράς στο LINES)
8. L: Πίνακας-γραμμή με τα μήκη των γραμμών μεταφοράς σε χιλιόμετρα (km). Πάλι η σειρά τοποθέτησης πρέπει να ακολουθεί τη σειρά τοποθέτησης των γραμμών μεταφοράς στο LINES
9. PMINMAX: Εισάγεται ο πίνακας με την ελάχιστη και μέγιστη παραγωγή για κάθε ζυγό. Στην πρώτη στήλη εισάγουμε τις ελάχιστες τιμές και στη δεύτερη τις μέγιστες.. ΠΡΟΣΟΧΗ, οι γραμμές αναφέρονται στις γραμμές του πίνακα BUSES, δηλ. η πρώτη γραμμή αναφέρεται στον κόμβο της πρώτης γραμμής του BUSES κοκ.(Το ίδιο ισχύει και για τον πίνακα DEMAND)
10. X: Πίνακας-γραμμή με τις επαγωγικές αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς
11. Tact: Πίνακας-στήλη με τις ικανότητες μεταφοράς (capacities) των γραμμών μεταφοράς.

NEWdata.xls

1. NEW_BUSES: Εδώ τοποθετούνται οριζόντια οι νέοι ζυγοί (μελλοντικές μονάδες παραγωγής) που θα προστεθούν στο σύστημα.
2. NEW_PMINMAX: Δίνονται τα όρια των νέων αυτών ζυγών (ελάχιστο-μέγιστο) με ανάλογο τρόπο όπως στο netdata.xls.
3. NEW_A: Εισάγουμε τους συντελεστές A του κόστους παραγωγής-λειτουργίας (marginal operational cost) για κάθε νέο ζυγό σε έναν πίνακα - γραμμή.
4. NEW_B: Εισάγουμε τους συντελεστές B του κόστους λειτουργίας σε πίνακα-γραμμή.
5. NEW_DEMAND: Εισάγουμε τον πίνακα με τη ζήτηση (φορτίο) για κάθε νέο ζυγό και για κάθε χρονική περίοδο.
6. CAND_LINES: Εδώ τοποθετούνται οι υποψήφιες γραμμές μεταφοράς για την επέκταση του δικτύου, με τρόπο ανάλογο με τον πίνακα LINES.
7. CAND_K: Πίνακας- γραμμή με τους συντελεστές k_c για κάθε υποψήφια γραμμή μεταφοράς. (Εδώ η σειρά τοποθέτησης πρέπει να ακολουθεί τη σειρά τοποθέτησης των γραμμών μεταφοράς στο CAND_LINES).
8. CAND_L: Πίνακας-γραμμή με τα μήκη των γραμμών μεταφοράς για κάθε υποψήφια γραμμή. Πάλι η σειρά τοποθέτησης πρέπει να ακολουθεί τη σειρά τοποθέτησης των γραμμών μεταφοράς στο CAND_LINES.

9. CAND_X: Πίνακας-γραμμή με τις επαγωγικές αντιστάσεις των υποψήφιων γραμμών μεταφοράς.
10. CAND_Tact: Πίνακας-στήλη με τις ικανότητες μεταφοράς (capacities) των υποψήφιων γραμμών μεταφοράς..

genpar.dat

Το αρχείο αυτό είναι αρχείο κειμένου και ανοίγει με το πρόγραμμα Σημειωματάριο (Notepad) ή οποιοδήποτε πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου (text editor).

Εδώ δίνονται οι παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου δηλ. το μέγεθος του χρωμοσώματος (Size of chromosome), το μέγεθος του πληθυσμού (Size of population) , ο αριθμός γενεών (No. of generations), η πιθανότητα για μετάλλαξη (Mutation Probability), η πιθανότητα για επιχiasμό (Crossover Probability) , ο τελεστής επιλογής (Selective pressure) και η αρχική ποινή (Penalty). Το αρχείο έχει την παρακάτω μορφή:

```

-----
GENETIC ALGORITHM PARAMETERS
-----

Size of chromosome (NVARs)= 8
Size of population (POPSIZE)= 20
No. of generations (MAXGENS)= 300
Mutation Probability (PMUTATION)= 0.08
Crossover Probability (PXOVER)= 0.9
Selective pressure(q)= 2
Penalty (PENALTY)= 1000
-----

```

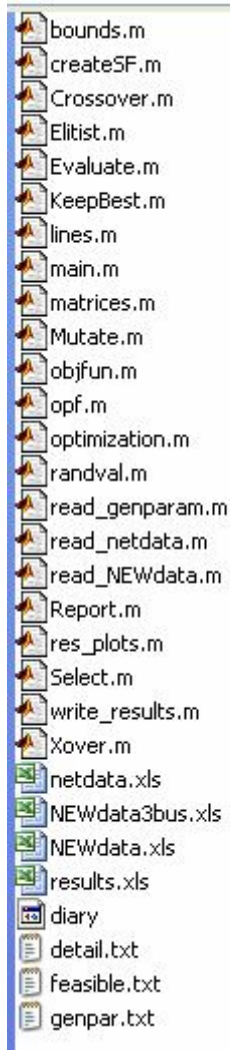
- Ως αρχείο εξόδου η εφαρμογή χρησιμοποιεί το αρχείο **results.xls**. Ανοίγει με το πρόγραμμα Excel του Microsoft Office και αποτελείται από 8 φύλλα εργασίας (worksheets). Αναλυτικά

results.xls

1. best_chrome: Εδώ αποθηκεύεται το χρωμόσωμα που προκύπτει σαν βέλτιστη λύση και δείχνει ποιες γραμμές μεταφοράς θα προστεθούν στο δίκτυο.
2. opt_h_cost: Εδώ αποθηκεύεται το βέλτιστο ωριαίο συνολικό κόστος (σε \$).
3. opt_y_cost: Το βέλτιστο ετήσιο συνολικό κόστος (σε \$).
4. opt_max_flow: Πίνακας στήλη με τις βέλτιστες ικανότητες μεταφοράς (T) για κάθε γραμμή μεταφοράς (αναφέρεται στις γραμμές με τη σειρά που έχουν τοποθετηθεί στον LINES και τις γραμμές από τον CAND_LINES που θα προστεθούν στο δίκτυο).
5. opt_power_gen: Πίνακας με τη βέλτιστη παραγωγή (P) κάθε ζυγού σε κάθε περίοδο ζήτησης.. Στην πρώτη στήλη οι τιμές που αφορούν την πρώτη χρονική περίοδο, στη 2^η στήλη οι τιμές για τη δεύτερη χρονική περίοδο κοκ. Το πλήθος των γραμμών του πίνακα είναι ίσο με τον αριθμό των ζυγών.

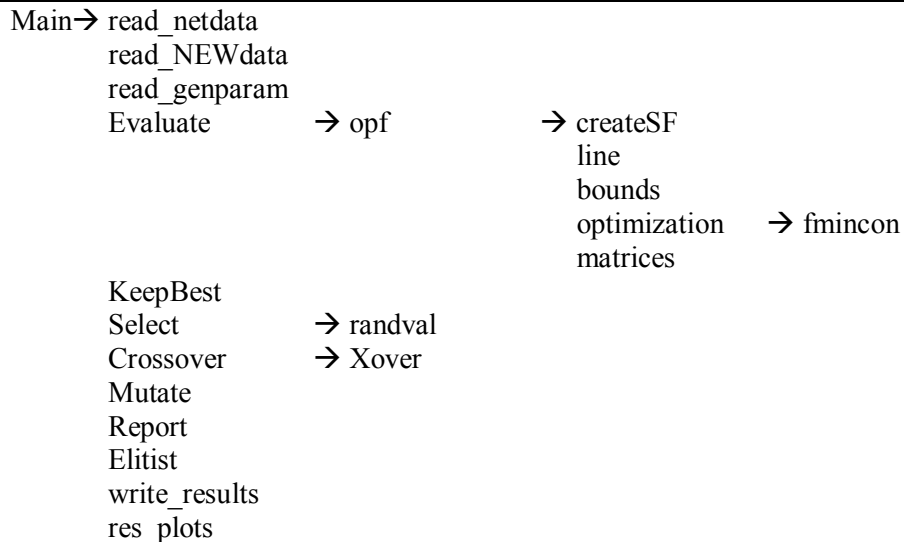
6. `opt_line_flow`: Πίνακας με τις βέλτιστες ισχύς (F) κάθε γραμμής μεταφοράς για κάθε περίοδο ζήτησης. Στην πρώτη στήλη οι τιμές που αφορούν την πρώτη χρονική περίοδο, στη 2^η στήλη οι τιμές για τη δεύτερη χρονική περίοδο κοκ. Το πλήθος των γραμμών ίσο με τον αριθμό των γραμμών μεταφοράς
7. `duration_sec`: Χρονική διάρκεια εκτέλεσης του γενετικού αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (sec)
8. `duration_min`: Χρονική διάρκεια εκτέλεσης του γενετικού αλγορίθμου σε λεπτά (min)

- Τα αρχεία που αποτελούν το λογισμικό μας βρίσκονται στον φάκελο **genetic** και είναι συνολικά 30 αρχεία. Φαίνονται στο Σχήμα 4.1



Σχήμα 4.1 : Αρχεία λογισμικού

Οι δύο βασικές συναρτήσεις είναι η `main` (κύρια συνάρτηση) και η `opf` (optimal power flow). Η `main` αποτελεί την επίλυση του κυρίως προβλήματος, δηλ. του προβλήματος του βέλτιστου δικτύου (optimum network problem) και η `opf` επιλύει το υποπρόβλημα του δικτύου αναφοράς (reference network subproblem). Η `main` σε διάφορα σημεία της καλεί την `Evaluate` η οποία με τη σειρά της καλεί την `opf` και με τον τρόπο αυτό συνδέονται οι `main` και `opf` συναρτήσεις. Το διάγραμμα που δείχνει το πώς η μια συνάρτηση εμπεριέχεται στην άλλη, με τη σειρά που αυτές καλούνται φαίνεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 : Διάγραμμα με ροή συναρτήσεων λογισμικού

- Στο πρώτο μέρος της main γίνεται η φόρτωση των δεδομένων από τα αρχεία εισόδου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα που αποτελεί το αντίστοιχο μέρος του κώδικα. Οι συναρτήσεις **read_netdata**, **read_NEWdata**, **read_genparam** διαβάζουν από τα αρχεία excel τα δεδομένα και τα αποθηκεύουν στους αντίστοιχους πίνακες.

```

%Main Function

clear all;
clc;

% delete diary
diary on;

global np nb nl

GP='genpar30.dat';
NETD='netdata30bus.xls';
RS='results30.xls';
NEWD='NEWdata30bus.xls';

%load data of initial network
disp('Loading data of initial network...');
[TIME,BUSES,LINES,D,A,B,K,L,PMINMAX,X,Tact]=read_netdata (NETD);
np=length(TIME);
nb=length(BUSES);
nl=size(LINES,1);

%load data of new power plants and candidate new transmission lines
disp('Loading data of future power plants and candidate transmission lines...');
[NEW_BUSES,NEW_PMINMAX,NEW_A,NEW_B,NEW_D,CAND_LINES,CAND_X,CAND_K,CAND_L,CAND_Tact]=read_NEWdata(NEWD);

%genetic algorithm parameters
disp('Loading parameters of genetic algorithm...');
[NVARS,POPSIZE,MAXGENS,PMUTATION,PXOVER,q,PENALTY]=read_genparam(GP);
  
```

Σχήμα 4.3 : Ανάγνωση δεδομένων λογισμικού

Αν ο χρήστης επιθυμεί να αλλάξει τα ονόματα των αρχείων εισόδου και εξόδου πρέπει να αλλάξει τα ονόματα και στο αντίστοιχο μέρος του κώδικα

```
GP='genpar30.dat';  
NETD='netdata30bus.xls';  
RS='results30.xls';  
NEWD='NEWdata30bus.xls';
```

Σχήμα 4.4 : Αρχεία εισόδου λογισμικού

- Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος κρατάμε ένα αρχείο **diary** (εντολή της Matlab) όπου αποθηκεύεται ό,τι τυπώνεται στο command window δηλαδή τα στατιστικά αποτελέσματα της αναφοράς (Report).
- Επίσης έχουμε 2 προαιρετικά αρχεία κειμένου **feasible.txt** και **detail.txt** στα οποία αποθηκεύονται, κατά την εκτέλεση του προγράμματος, ο αριθμός των εφικτών λύσεων για κάθε γενιά (στο feasible.txt), οι επαναλήψεις (opf loops) και η τιμή της αντικειμενικής (fval) για κάθε εκτέλεση της opf (optimal power flow) σε κάθε γενιά (στο detail.txt).

Παράδειγμα περιεχομένου feasible.txt

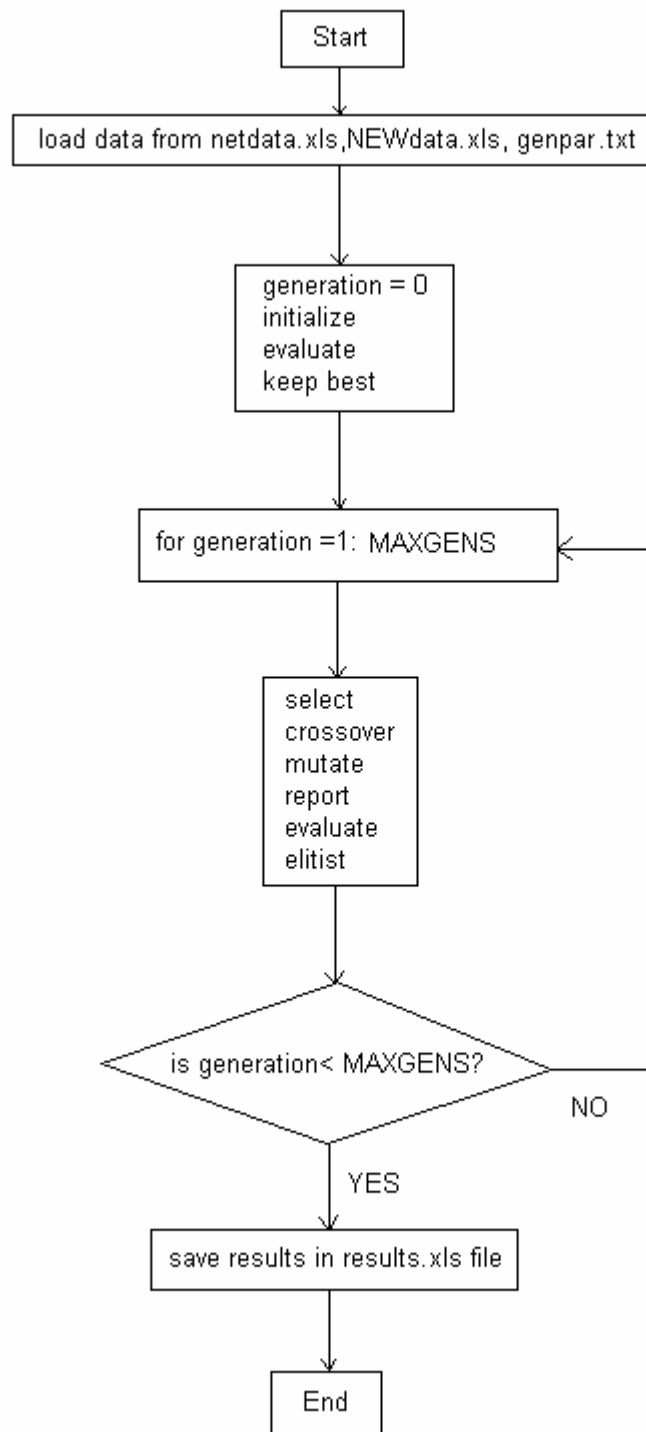
```
Generation no.0 :feasible solutions found =18.000000  
Generation no.1 :feasible solutions found =16.000000  
Generation no.2 :feasible solutions found =8.000000
```

Παράδειγμα περιεχομένου detail.txt

```
GENERATION NO.0  
OPF LOOPS = 1  
EXITFLAG = 5  
FVAL = 584.358964  
GENERATION NO.0  
OPF LOOPS = 1  
EXITFLAG = 5  
FVAL = 843.589325  
GENERATION NO.0  
OPF LOOPS = 1  
EXITFLAG = 0  
FVAL = 846.112646  
GENERATION NO.1  
OPF LOOPS = 1  
EXITFLAG = 5  
FVAL = 584.358964  
GENERATION NO.1  
OPF LOOPS = 1  
EXITFLAG = 5  
FVAL = 841.211228  
GENERATION NO.1  
OPF LOOPS = 1  
EXITFLAG = 5  
FVAL = 584.358964
```

Περιγραφή του προγράμματος

Αφού γίνει η φόρτωση των δεδομένων ξεκινά η διαδικασία του γενετικού αλγορίθμου. Η ροή του αλγορίθμου φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα του Σχήματος 4.5



Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου

Αναλυτικά:

Πρώτα γίνεται η αρχικοποίηση του αλγορίθμου. Δημιουργείται ο αρχικός πληθυσμός, και γίνεται αξιολόγηση και αποθήκευση του καλύτερου μέλους του πληθυσμού αυτού. Στη συνέχεια εκτελούνται επαναληπτικά για τα μέλη των επόμενων πληθυσμών οι διαδικασίες επιλογής, επιχιασμού, μετάλλαξης, αναφοράς, αξιολόγησης και ελιτισμού μέχρι το μέγιστο αριθμό γενεών (MAXGENS). Τέλος γίνεται αποθήκευση των αποτελεσμάτων.

Αρχικοποίηση (initialize)

Ο αρχικός πληθυσμός δημιουργείται τυχαία χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `randsrc` της Matlab που δημιουργεί έναν τυχαίο πίνακα με μέγεθος και στοιχεία από αλφάβητο που καθορίζουμε εμείς. Στην προκειμένη περίπτωση το μέγεθος είναι ίσο με

μέγεθος του πληθυσμού (POPSIZE) x μήκος χρωμοσώματος (NVARs)

και τα στοιχεία του πίνακα είναι 1 ή 0.

Αξιολόγηση (evaluate)

Για τον αρχικό πληθυσμό (όπως και για τους επόμενους), γίνεται η αξιολόγηση του πληθυσμού, δηλ. καλείται η συνάρτηση `Evaluate` η οποία αξιολογεί κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού και επιστρέφει μια τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση. Όσο μικρότερη η τιμή αυτή τόσο «καλύτερο» είναι το χρωμόσωμα, οπότε αυξάνεται η πιθανότητα να περάσει στις επόμενες γενιές.

Στην αρχή της `Evaluate` γίνεται ένας έλεγχος συνδεσιμότητας του δικτύου, δηλ. ελέγχεται κατά πόσο οι νέες μονάδες παραγωγής και οι υποψήφιες γραμμές μεταφοράς συνδέονται με το υπάρχον δίκτυο, και σε περίπτωση που το συνολικό δίκτυο δεν είναι συνδεδεμένο εμφανίζεται στην οθόνη το αντίστοιχο μήνυμα λάθους (“ERROR, no new line is connected to the initial network” / “ERROR, one or more new buses are not connected to the initial network”). Τότε, στην αξιολόγηση του συγκεκριμένου χρωμοσώματος ως τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης θέτουμε την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του αρχικού δικτύου και προσθέτουμε μια ποινή (Penalty) σε αυτήν, η τιμή της οποίας είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την τιμή της αντικειμενικής, ώστε η λύση αυτή να μην είναι πιθανό να περάσει στις επόμενες γενιές και να οδηγηθεί ο αλγόριθμος σε περιοχή εφικτών λύσεων (feasible area).

Σε αντίθετη περίπτωση (αν δεν προκύψει λάθος στη συνδεσιμότητα) γίνεται κανονικά η αξιολόγηση του νέου (μετά την επέκταση) δικτύου, δηλ καλείται η `opf` (λύνεται το υποπρόβλημα δικτύου αναφοράς) για το μελλοντικό αυτό δίκτυο και έτσι υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δηλ. το συνολικό κόστος για το συγκεκριμένο χρωμόσωμα.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αποθηκεύονται σε ένα πίνακα-κελιών (cell array). Οι πίνακες αυτοί είναι μια συλλογή μεταβλητών οργανωμένων σε μορφή πινάκων των οποίων τα στοιχεία ονομάζονται «κελιά» και μπορεί να περιέχουν μεταβλητές διαφορετικού τύπου. Υπάρχει επίσης η ευκολία προσπέλασης τους με δείκτες όπως στους πίνακες.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα αποτελέσματα της `opf` αποθηκεύονται σε ένα cell array 5 πεδίων που το ονομάζουμε `eval`. Στο πρώτο πεδίο αποθηκεύεται το χρωμόσωμα σε μορφή πίνακα δυαδικών στοιχείων, στο δεύτερο πεδίο ο πίνακας με τις βέλτιστες ικανότητες μεταφοράς των γραμμών, στο τρίτο ο πίνακας με την παραγωγή των γεννητριών και στο τελευταίο πεδίο η τιμή του συνολικού κόστους. Σε κάθε γραμμή του `eval` αποθηκεύονται τα στοιχεία για την παρούσα γενιά, οπότε στο τέλος του αλγορίθμου ο `eval` περιέχει τα αποτελέσματα για όλες τις γενιές.

Η `Evaluate` ολοκληρώνεται με το άνοιγμα του αρχείου `feasible.txt` όπου αποθηκεύεται ο συνολικός αριθμός των εφικτών λύσεων για την παρούσα γενιά..

Η διαδικασία της orf – υποπρόβλημα δικτύου αναφοράς

Στην Evaluate καλείται η συνάρτηση orf που επιλύει τη βέλτιστη ροή φορτίου χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς **fmincon** του Optimization Toolbox της Matlab. Η orf υπολογίζει για μια δοσμένη τοπολογία δικτύου, τις παραγόμενες ισχύς των γεννητριών, τις ροές πραγματικής ισχύος σε όλες τις γραμμές μεταφοράς, για όλες τις περιόδους ζήτησης, καθώς και τις βέλτιστες ικανότητες μεταφοράς των γραμμών αυτών.

Η fmincon βρίσκει το ελάχιστο μιας συνάρτησης (αντικειμενικής) ορισμένων μεταβλητών (μεταβλητές σχεδίασης) για τις οποίες ισχύουν κάποιοι περιορισμοί.

Το πρόβλημα πρέπει να είναι της μορφής

$$\min_x F(x) \quad \text{subject to: } A_{\text{ineq}} \cdot x \leq b_{\text{ineq}}, A_{\text{eq}} \cdot x = B_{\text{eq}} \quad (\text{linear constraints})$$

$$C(x) \leq 0, C_{\text{eq}}(x) = 0 \quad (\text{nonlinear constraints})$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (\text{lower and upper bounds})$$

Οι μεταβλητές σχεδίασης εισάγονται στην fmincon ως ένα διάνυσμα x (διάνυσμα στήλη) με την εξής σειρά : πρώτα τα T (line capacity) μετά τα P (generator power) και τέλος τα F (line flow). Για τα P τα στοιχεία τους αποθηκεύονται στο x με την εξής σειρά, πρώτα τα P για την 1^η περίοδο ζήτησης και μετά τα P για τη 2^η κοκ. Όμοια για τα F .

Π.χ. για δίκτυο με 3 ζυγούς, 3 γραμμές μεταφοράς και 2 περιόδους ζήτησης το x θα είναι της μορφής

$$x = [T1 \ T2 \ T3 \ P11 \ P21 \ P31 \ P12 \ P22 \ P32 \ F11 \ F21 \ F31 \ F12 \ F22 \ F32]'$$

Όπου T_i , P_{ij} , F_{ij} α στοιχεία των αντίστοιχων πινάκων

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η συνάρτηση συνολικού κόστους που διατυπώθηκε στην εξίσωση (3.3) του κεφαλαίου 3. Οι περιορισμοί δίνονται στις εξισώσεις (3.4) και (3.5) και τα όρια των μεταβλητών στις (3.7), (3.9) και (3.10).

Η orf καλεί τις συναρτήσεις που φαίνονται και στο Σχήμα 4.2 με την εξής σειρά

```
-createSF
-line
-bounds
-optimization    → fmincon
-matrices
```

Η **createSF** υλοποιεί τον πίνακα $[S_F]$ (πίνακας ευαισθησίας-sensitivity matrix) και τον πίνακα $[A_d]^T$ (πίνακας προσεγγισιμότητας-admittance matrix) που εμφανίζονται στις εξισώσεις (3.4), (3.5) και (3.6) του κεφαλαίου 3.

Η **line** είναι μια συνάρτηση που μετατρέπει έναν πίνακα σε πίνακα-γραμμή, τοποθετώντας στη σειρά τα στοιχεία της πρώτης στήλης ,της δεύτερης κοκ.

Η **bounds** υλοποιεί τα άνω και κάτω όρια των μεταβλητών σχεδίασης.

Η **optimization** είναι η συνάρτηση που καλεί την **fmincon** για να γίνει η βελτιστοποίηση. Η fmincon καλείται ως εξής:

[x, fval]= fmincon (objfun, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon, options)

- objfun : η αντικειμενική συνάρτηση
- x0 : αρχικό διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης
- A, b, Aeq, beq: πίνακες για τις εξισώσεις των περιορισμών
- lb, ub: πίνακες για τα όρια των μεταβλητών
- nonlcon: μη γραμμικοί περιορισμοί
- options: επιλογές για την βελτιστοποίηση

Η **matrices** μετατρέπει το διάνυσμα x των μεταβλητών σχεδίασης στους αντίστοιχους πίνακες T,P και F.

Συγκεκριμένα η orf αποτελείται από τα εξής στάδια :

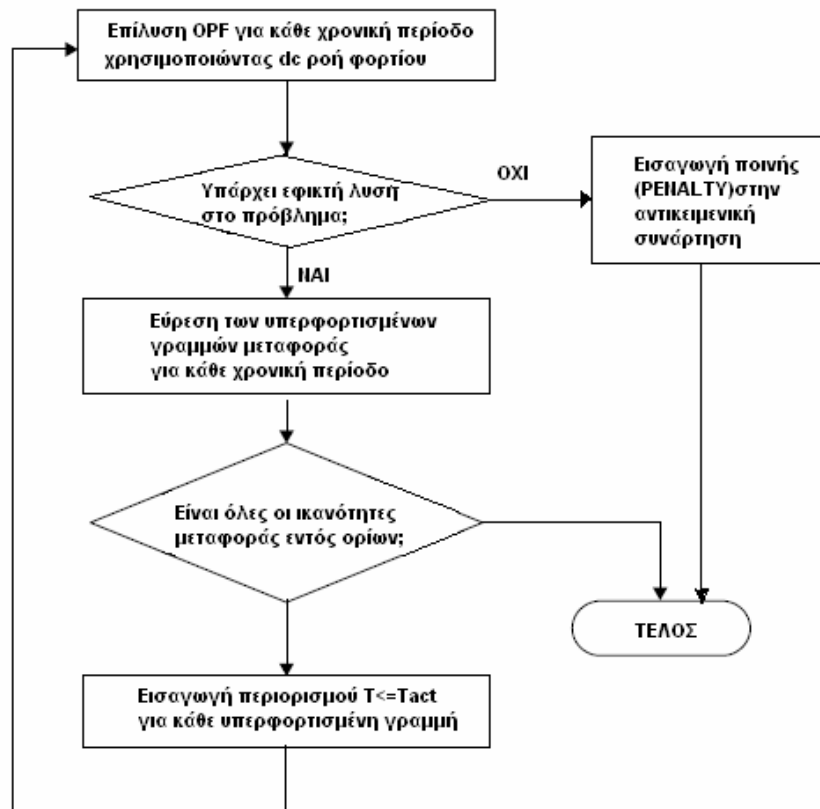
- Υλοποίηση των περιορισμών ισότητας και ανισότητας μέσω του υπολογισμού των πινάκων Aeq,beq, A,b αντίστοιχα και των ορίων μέσω των πινάκων lb,ub
- Δημιουργία του διανύσματος x με τις μεταβλητές σχεδίασης
- Υλοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης objfun
- Κλήση της optimization και μέσω αυτής της fmincon για επίλυση του προβλήματος

Στο τέλος της orf αποθηκεύεται στο αρχείο detail.txt ο αριθμός της γενιάς (GENERATION NO.), οι επαναλήψεις (orf loops) η σημαία εξόδου (exitflag) και η τιμή της αντικειμενικής (fval) . Αυτό είναι προαιρετικό για να παρακολουθεί ο προγραμματιστής τα αποτελέσματα της orf .

Σε περίπτωση που η orf βρει εφικτή λύση όπου σε μία ή περισσότερες γραμμές μεταφοράς η βέλτιστη ικανότητα μεταφοράς (T) είναι μεγαλύτερη από την πραγματική ικανότητα μεταφοράς της γραμμής (Tact), δηλ αν μία ή περισσότερες γραμμές είναι υπερφορτισμένες, τότε προστίθεται στο πρόβλημα ένας περιορισμός της μορφής $F_{ij} \leq T_{act}$ για κάθε υπερφορτισμένη γραμμή και εκτελείται πάλι η optimization με τους περιορισμούς αυτούς (αυξάνονται οι επαναλήψεις-orf loops) μέχρι να μην υπάρχει υπερφορτισμένη γραμμή η μέχρι να μη βρεθεί εφικτή λύση. Αν τελικά δε βρεθεί εφικτή λύση, τότε στην τιμή της αντικειμενικής προστίθεται ένα Penalty το οποίο αυξάνεται όσο προχωράνε οι γενιές, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να κατευθύνεται στο χώρο εφικτών λύσεων [4.2]. Στις αρχικές γενιές η ποινή είναι μικρότερη έτσι ώστε να δίνεται η δυνατότητα για αναζήτηση (exploration) στο χώρο των λύσεων, ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος για εγκλωβισμό σε τοπικά βέλτιστα. Ετσι σε περίπτωση μη εφικτής λύσης η συνάρτηση παίρνει την τιμή που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση

$$fval = fval + (generation+1)*PENALTY$$

Συνοπτικά η OPF ακολουθεί το διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.6



Σχήμα 4.6 : Διάγραμμα ροής της OPF (βέλτιστης ροής φορτίου)

Αφού γίνει η αξιολόγηση του αρχικού πληθυσμού εκτελείται η KeepBest η οποία αποθηκεύει το καλύτερο μέλος του πληθυσμού (αυτό με την μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην τελευταία (έξτρα) θέση του πίνακα με τον πληθυσμό των χρωμοσωμάτων. Δηλαδή ο πίνακας αυτός έχει μέγεθος όσο το μέγεθος του πληθυσμού συν μια παραπάνω θέση για την αποθήκευση του καλύτερου μέλους. Εκτός από το χρωμόσωμα αποθηκεύεται και η τιμή της αντικειμενικής (fitness function) του καλύτερου μέλους.

Επιλογή (select)

Για κάθε γενιά η συνάρτηση **Select** επιλέγει τα χρωμοσώματα του ενδιαμέσου πληθυσμού με τη μέθοδο της tournament selection. Για να επιλεγθεί ένα νέο μέλος του ενδιαμέσου πληθυσμού, επιλέγονται με ομοιόμορφη πιθανότητα q μέλη του πληθυσμού, με $q \geq 1$. Από τα q αυτά μέλη επιλέγεται το καλύτερο για να πάει στον ενδιαμέσο πληθυσμό. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να συμπληρωθεί ο αριθμός των ατόμων του ενδιαμέσου πληθυσμού.

Επιχiasμός (crossover)

Μέσω της συνάρτησης **Crossover** γίνεται ο επιχiasμός μονού σημείου. Σαρώνονται όλα τα άτομα του πληθυσμού και κάθε ένα επιλέγεται ως υπονήφιο για επιχiasμό με πιθανότητα PXOVER. Μόλις συμπληρωθεί το ζεύγος, καλείται η **Xover** η οποία πραγματοποιεί επιχiasμό μονού σημείου μεταξύ των δύο ατόμων του επιλεγμένου ζεύγους χρωμοσωμάτων. Το σημείο τομής επιλέγεται με ομοιόμορφη πιθανότητα.

Μετάλλαξη (mutate)

Στη συνέχεια εκτελείται τυχαία ομοιόμορφη μετάλλαξη μέσω της συνάρτησης **Mutate**. Από το σύνολο του πληθυσμού και το σύνολο των γονιδίων κάθε χρωμοσώματος επιλέγονται (με ομοιόμορφη πιθανότητα) τα γονίδια που θα μεταλλαχθούν. Η νέα τιμή καθενός, προκύπτει με ομοιόμορφη πιθανότητα, από το διάστημα ορισμού της αντίστοιχης μεταβλητής σχεδίασης. Επειδή έχουμε δυαδική κωδικοποίηση η νέα τιμή κάθε γονιδίου είναι 0 αν πριν ήταν 1 και αντίστροφα.

Αναφορά (report)

Η συνάρτηση **Report** υπολογίζει στατιστικά στοιχεία του πληθυσμού σε κάθε γενιά και τα εξάγει στο command window και αποθηκεύονται στο diary. Τα στοιχεία αυτά είναι η μέση τιμή της αντικειμενικής του πληθυσμού (average population fitness), η τυπική απόκλιση αυτής (std deviation of population fitness) και η καλύτερη τιμή αυτής (best population fitness)

Ελιτισμός (elitist)

Μέσω της συνάρτησης **Elitist** εξασφαλίζεται ότι το καλύτερο μέλος του πληθυσμού περνά στην επόμενη γενιά. Σύμφωνα με αυτήν εάν το καλύτερο άτομο της παρούσης γενιάς είναι χειρότερο από το καλύτερο της προηγούμενης, το τελευταίο αντικαθιστά το χειρότερο άτομο της παρούσης γενιάς.

Τερματισμός

Όταν ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού, δηλ όταν ο αριθμός των γενεών είναι ίσος με MAXGENS, τότε αποθηκεύονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου στο αρχείο results.xls μέσω της συνάρτησης **write_results**.

Πριν τερματίσει το πρόγραμμα εκτελείται η **res_plots** μέσω της οποίας τα αποτελέσματα και η εξέλιξη του αλγορίθμου παρουσιάζονται σε διαγράμματα για την ευκολότερη μελέτη και εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα διαγράμματα αυτά με τα αποτελέσματα για τα διάφορα test cases παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] G. Latorre, R. Cruz, J. Areiza and A. Villegas, "Classification of publications and models on transmission expansion planning," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 938-946, 2003.

- [4.2] R. Gallego, A. Monticelli, and R. Romero, "Transmission system expansion planning by an extended genetic algorithm," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 3, pp. 329-335, 1998.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου για 2 συστήματα (2 test cases), ένα μικρό σύστημα με 6 ζυγούς και αρχικά 6 γραμμές μεταφοράς και ένα μεγάλο με 30 ζυγούς και 41 γραμμές μεταφοράς. Το δίκτυο με τους 6 ζυγούς είναι γνωστό στη βιβλιογραφία ως δίκτυο του Garver και είναι το πιο διαδεδομένο σύστημα για δοκιμή στο πρόβλημα της βέλτιστης επέκτασης δικτύου μεταφοράς. Τα δεδομένα αρχιτεκτονικής του κάθε δικτύου έχουν εισαχθεί από τη βιβλιογραφία και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά των δημοσιεύσεων [5.1 – 5.7].

Όπως αναφέρθηκε και στο τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου, το λογισμικό στο τέλος καλεί τη συνάρτηση **res_plots** η οποία παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προγράμματος σε διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά είναι τα εξής :

- Διάγραμμα 1 (figure 1)
Το διάγραμμα αυτό δε δημιουργείται στην **res_plots** αλλά στην κύρια συνάρτηση (**main**) στο τέλος κάθε γενιάς και παρουσιάζει όλες τις λύσεις (τιμές αντικειμενικής συνάρτησης) συναρτήσει των γενεών. Είναι βοηθητικό διάγραμμα για να δούμε όλες τις εφικτές και μη εφικτές λύσεις, όπως και τις διαφορετικές εφικτές λύσεις κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου.
- Διάγραμμα 2 (figure 2)
Το διάγραμμα αυτό σχεδιάζεται πρώτο στην **res_plots** και εμφανίζει το συνολικό πλήθος των εφικτών λύσεων για κάθε γενιά. Στον οριζόντιο άξονα τοποθετούνται οι γενεές (**generation**) και στον κατακόρυφο ο συνολικός αριθμός εφικτών λύσεων (**total feasible solutions**).
- Διάγραμμα 3 (figure 3)
Εδώ φαίνεται για κάθε γενιά, το καλύτερο μέλος της παρούσας γενιάς (**current best**) δηλ. η τιμή της αντικειμενικής του και το συνολικά καλύτερο μέλος μέχρι την παρούσα γενιά (**total best**).
- Διάγραμμα 4 (figure 4)
Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία όπως προκύπτουν από την **Report**. Δηλαδή η μέση τιμή της αντικειμενικής για κάθε γενιά (**average**), η τιμή της αντικειμενικής του καλύτερου μέλους (**Best**) και η τιμή για την τυπική απόκλιση (**stddev**).
- Διάγραμμα 5 (figure 5)
Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση για την βέλτιστη ικανότητα μεταφοράς (**T**) σε συνδυασμό με τα πραγματικά όρια των γραμμών (**Tact**) για κάθε γραμμή. Στον οριζόντιο άξονα τοποθετούνται οι γραμμές μεταφοράς και στον κατακόρυφο οι τιμές των **T**, **Tact** σε **MW**. Τα διαγράμματα είναι σε μορφή **bars**.
- Διάγραμμα 6 (figure 6)
Στο παρόν φαίνονται οι βέλτιστες ροές ισχύος των γραμμών (**F**) όπως προκύπτουν από τον γενετικό για κάθε γραμμή με τη μορφή διαγράμματος **bars**.
- Διάγραμμα 7 (figure 7)
Εδώ απεικονίζονται οι βέλτιστες παραγωγές ισχύος των ζυγών (**P**) για κάθε ζυγό, σε συνδυασμό με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές της παραγωγής (**PMAX**, **PMIN**).

- Διάγραμμα 8 (figure 8)

Στο τελευταίο απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το συνολικό ωριαίο ελάχιστο κόστος κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου. Στον οριζόντιο άξονα τοποθετούνται οι γενιές και στον κατακόρυφο τα κόστη σε μορφή bars.

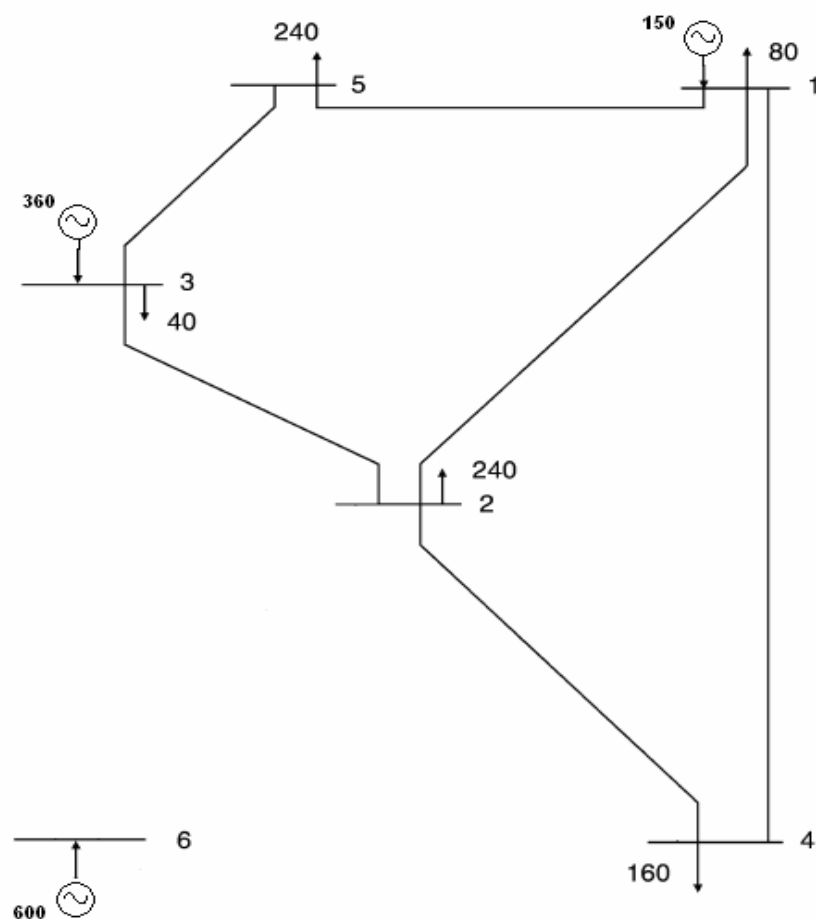
5.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1: ΜΙΚΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (6 ΖΥΓΟΙ)

5.2.1 Δεδομένα εισόδου

Για την περίπτωση του μικρού συστήματος των 6 ζυγών τα δεδομένα εισόδου του υπάρχοντος δικτύου (αρχικό σύστημα) βρίσκονται στο αρχείο **netdata.xls**.

Τα δεδομένα εισόδου για τις μελλοντικές μονάδες παραγωγής, το δοσμένο μελλοντικό φορτίο και τις υποψήφιες προς κατασκευή νέες γραμμές μεταφοράς, βρίσκονται στο αρχείο **NEWdata.xls**.

Το αρχικό δίκτυο φαίνεται στο Σχήμα 5.1



Σχήμα 5.1: Αρχικό δίκτυο 6 ζυγών (δίκτυο Garver)

Στο δίκτυο αυτό ο ζυγός 6 είναι μια νέα μονάδα παραγωγής που θα προστεθεί στο δίκτυο, οπότε αρχικά δεν υπάρχει καμμία γραμμή να συνδέει το ζυγό αυτό με το δίκτυο. Η συνολική μέγιστη παραγωγή πριν τη σύνδεση του ζυγού 6 είναι ίση με 510MW και η συνολική ζήτηση 760MW. Οπότε υπάρχει έλλειμμα ισχύος 250 MW τα οποία πρέπει να καλυφθούν από τον ζυγό 6. Στην πραγματικότητα στη χειρότερη περίπτωση ο ζυγός 3 μπορεί να παρέχει το μέγιστο 240MW λόγω των περιορισμών των γραμμών μεταφοράς (line capacities), οπότε το έλλειμμα γίνεται 370MW.

Εκτελούμε τις **5 υποπεριπτώσεις (cases)** που φαίνονται στον **Πίνακα 5.1**

Πίνακας 5.1: Υποπεριπτώσεις για το δίκτυο των 6 ζυγών

Υποπερίπτωση 1 (case1)	1 χρονική περίοδος (8760h) Υψηλά ελάχιστα όρια λειτουργίας γεννητριών (σύνολο ελάχιστης παραγωγής 760MW)
treksimo1	10 υποψήφιες γραμμές, $A=0.1 \text{ \$/MWh}$, $B=0.0003\text{\$/MWh}$, $kc=10 \text{ \$/MW year km}$
treksimo2	Ίδια με treksimo 1
treksimo3nvars12	Ίδια με treksimo 1 αλλά 12 υποψήφιες γραμμές
Υποπερίπτωση 2 (case2)	1 χρονική περίοδος (8760h) Μηδενικά ελάχιστα όρια λειτουργίας γεννητριών
treksimo1	10 υποψήφιες γραμμές $A=0.1 \text{ \$/MWh}$, $B=0.0003\text{\$/MWh}$, $kc=10 \text{ \$/MW year km}$
treksimo2	Ίδια με treksimo 1
treksimo3nvars12	Ίδια με treksimo 1 αλλά 12 υποψήφιες γραμμές
treksimonew	Ίδια με treksimo 1 αλλά $A=0.05\text{\$/MWh}$, $B=0.00015 \text{ \$/MWh}$
Υποπερίπτωση 3 (case3)	1 χρονική περίοδος (8760h) Μελλοντική συνολική ζήτηση ίση με μέγιστη παραγωγή γεννητριών (1110 MW)
treksimo1max	Ίδια με Υποπερίπτωση 2 treksimo1 αλλά ζήτηση στον ζυγό 3 ίση με 80MW, στον 4 ίση με 190MW και στον 6 ίση με 280MW
treksimo1nvars12	Ίδια με treksimo1max αλλά 12 υποψήφιες γραμμές
treksimo2max	Ίδια με treksimo1max αλλά ζήτηση στον ζυγό 1 ίση με 110MW και στον 3 ίση με 80MW και στον 6 ίση με 280MW
Υποπερίπτωση 4 (case4-3p)	3 χρονικές περιόδους (2190h, 2820h, 3750h)
treksimo1	1 ^η περίοδος: ζήτηση όπως στην Υποπερίπτωση 2-treksimo1 2 ^η περίοδος: ζήτηση όπως στην Υποπερίπτωση 3 - treksimo1max 3 ^η περίοδος: ζήτηση όπως στην 1 ^η περίοδο και στον ζυγό 6 ίση με 280MW $A=0.1 \text{ \$/MWh}$, $B=0.0003\text{\$/MWh}$, $kc=10 \text{ \$/MW year km}$
treksimo2	1 ^η περίοδος: ζήτηση όπως στο treksimo1-3 ^η περίοδο 2 ^η περίοδος: ζήτηση όπως στο treksimo1-2 ^η περίοδο 3 ^η περίοδος: ζήτηση ίση με τη μισή της 1 ^η περιόδου $A=0.1 \text{ \$/MWh}$, $B=0.0003\text{\$/MWh}$, $kc=10 \text{ \$/MW year km}$
treksimo3nvars12	Ίδια με treksimo2 αλλά 12 υποψήφιες γραμμές
treksimo4	Ίδια με treksimo3nvars12 αλλά $A=0.05\text{\$/MWh}$, $B=0.00015 \text{ \$/MWh}$

5.2.1.1 Υποπερίπτωση 1

Στην περίπτωση αυτή οι γεννήτριες έχουν και ελάχιστα όρια (εκτός από μέγιστα), δηλαδή η συνολική ελάχιστη παραγωγή είναι 760MW (όσο η συνολική ζήτηση) και η μέγιστη 1110MW (μαζί με το ζυγό 6).

Ο σχεδιασμός γίνεται για το χρονικό διάστημα ενός έτους (8760 ώρες). Για τα 2 πρώτα τρεξίματα (treskimo1, treksimo2) έχουμε 10 υπονήφιες γραμμές μεταφοράς για να προστεθούν στο υπάρχον δίκτυο ώστε να ικανοποιηθεί η ζήτηση. Από αυτές οι 8 συνδέουν τον ζυγό 6 με το αρχικό δίκτυο και οι υπόλοιπες 2 συνδέουν ζυγούς του αρχικού δικτύου. Για το τρίτο τρέξιμο (treksimo3nvars12) έχουμε 12 υπονήφιες γραμμές, (τις προηγούμενες 10 και άλλες δύο που συνδέουν το ζυγό 6 με το αρχικό δίκτυο).

Τα δεδομένα για το αρχικό δίκτυο (netdata.xls), για το ζυγό 6 και τις υπονήφιες γραμμές μεταφοράς (NEWdata.xls) και για τα 3 τρεξίματα δίνονται στους Πίνακες 5.2, 5.3 και 5.4. Τα στοιχεία που διαφέρουν μεταξύ των πινάκων 5.3, 5.4 φαίνονται με έντονη γραφή.

Πίνακας 5.2: Δεδομένα εισόδου netdata.xls για το case 1 του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	2	10	40	0.4	100
2	1	4	10	60	0.6	80
3	1	5	10	20	0.2	100
4	2	3	10	20	0.2	100
5	2	4	10	40	0.4	100
6	3	5	10	20	0.2	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος (8760h)	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	1	80	50	150	0.1	0.0003
2	2	240	0	0	0	0
3	3	40	165	360	0.1	0.0003
4	4	160	0	0	0	0
5	5	240	0	0	0	0

Πίνακας 5.3: Δεδομένα εισόδου NEWdata.xls για treksimo1, treksimo2 για το case 1 του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	5	10	20	0.2	100
2	2	6	10	30	0.3	100
3	2	6	10	30	0.3	100
4	2	6	10	30	0.3	100
5	2	6	10	30	0.3	100
6	2	6	10	30	0.3	100
7	3	5	10	20	0.2	100
8	4	6	10	30	0.3	100
9	4	6	10	30	0.3	100
10	4	6	10	30	0.3	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος (8760h)	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	6	0	545	600	0.1	0.0003

Πίνακας 5.4: Δεδομένα εισόδου NEWdata.xls για treksimo3nvars12 για το case 1 του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	5	10	20	0.2	100
2	2	6	10	30	0.3	100
3	2	6	10	30	0.3	100
4	2	6	10	30	0.3	100
5	2	6	10	30	0.3	100
6	2	6	10	30	0.3	100
7	3	5	10	20	0.2	100
8	4	6	10	30	0.3	100
9	4	6	10	30	0.3	100
10	4	6	10	30	0.3	100
11	3	6	10	48	0.48	100
12	3	6	10	48	0.48	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος (8760h)	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	6	0	545	600	0.1	0.0003

5.2.1.2 Υποπερίπτωση 2

Στην περίπτωση αυτή οι γεννήτριες έχουν ελάχιστο όριο το 0, δηλαδή η συνολική ελάχιστη παραγωγή είναι 0MW και η μέγιστη 1110MW.

Τα υπόλοιπα είναι ίδια με το Case1. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.5, 5.6 και 5.7

Πίνακας 5.5: Δεδομένα εισόδου netdata.xls για το case 2 του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	2	10	40	0.4	100
2	1	4	10	60	0.6	80
3	1	5	10	20	0.2	100
4	2	3	10	20	0.2	100
5	2	4	10	40	0.4	100
6	3	5	10	20	0.2	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος (8760h)	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	1	80	0	150	0.1	0.0003
2	2	240	0	0	0	0
3	3	40	0	360	0.1	0.0003
4	4	160	0	0	0	0
5	5	240	0	0	0	0

Πίνακας 5.6: Δεδομένα εισόδου NEWdata.xls για treksimo1, treksimo2 για το case 2 του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	5	10	20	0.2	100
2	2	6	10	30	0.3	100
3	2	6	10	30	0.3	100
4	2	6	10	30	0.3	100
5	2	6	10	30	0.3	100
6	2	6	10	30	0.3	100
7	3	5	10	20	0.2	100
8	4	6	10	30	0.3	100
9	4	6	10	30	0.3	100
10	4	6	10	30	0.3	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος (8760h)	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	6	0	0	600	0.1	0.0003

Στο **treksimonew** εκτελείται το **treksimo2** αλλά με συντελεστές κόστους για το ζυγό 6 ίσους με το μισό των ζυγών 1 και 3 ($A=0.05$ και $B=0.00015$).

Πίνακας 5.7: Δεδομένα εισόδου NEWdata.xls για **treksimo3nvars12** για το case 2 του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	5	10	20	0.2	100
2	2	6	10	30	0.3	100
3	2	6	10	30	0.3	100
4	2	6	10	30	0.3	100
5	2	6	10	30	0.3	100
6	2	6	10	30	0.3	100
7	3	5	10	20	0.2	100
8	4	6	10	30	0.3	100
9	4	6	10	30	0.3	100
10	4	6	10	30	0.3	100
11	3	6	10	48	0.48	100
12	3	6	10	48	0.48	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος (8760h)	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	6	0	0	600	0.1	0.0003

5.2.1.3 Υποπερίπτωση 3

Στην περίπτωση αυτή έχουμε μελλοντική ζήτηση ίση με 1110MW δηλ. ίση με τη συνολική μέγιστη παραγωγή των γεννητριών.

Συγκεκριμένα για το treksimo1max στους ζυγούς 3 και 4 το φορτίο αυξάνεται κατά 40MW και 30MW αντίστοιχα, για το treskimo2max στους ζυγούς 1 και 3 το φορτίο αυξάνεται κατά 30MW και 40MW αντίστοιχα. Στο ζυγό 6 έχουμε ζήτηση ίση με 280MW,

Τα δεδομένα φαίνονται στους πίνακες 5.8, 5.9, 5.10 και 5.11.

Πίνακας 5.8: Δεδομένα εισόδου netdata.xls για το treskimo1max από το case 3 του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	2	10	40	0.4	100
2	1	4	10	60	0.6	80
3	1	5	10	20	0.2	100
4	2	3	10	20	0.2	100
5	2	4	10	40	0.4	100
6	3	5	10	20	0.2	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος (8760h)	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	1	80	0	150	0.1	0.0003
2	2	240	0	0	0	0
3	3	80	0	360	0.1	0.0003
4	4	190	0	0	0	0
5	5	240	0	0	0	0

Πίνακας 5.9: Δεδομένα εισόδου NEWdata.xls για για treksimo1max για το case 3 του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	5	10	20	0.2	100
2	2	6	10	30	0.3	100
3	2	6	10	30	0.3	100
4	2	6	10	30	0.3	100
5	2	6	10	30	0.3	100
6	2	6	10	30	0.3	100
7	3	5	10	20	0.2	100
8	4	6	10	30	0.3	100
9	4	6	10	30	0.3	100
10	4	6	10	30	0.3	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος (8760h)	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	6	280	0	600	0.1	0.0003

Πίνακας 5.10: Δεδομένα εισόδου NEWdata.xls για treksimoInvars12 για το case 3 του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	5	10	20	0.2	100
2	2	6	10	30	0.3	100
3	2	6	10	30	0.3	100
4	2	6	10	30	0.3	100
5	2	6	10	30	0.3	100
6	2	6	10	30	0.3	100
7	3	5	10	20	0.2	100
8	4	6	10	30	0.3	100
9	4	6	10	30	0.3	100
10	4	6	10	30	0.3	100
11	3	6	10	48	0.48	100
12	3	6	10	48	0.48	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος (8760h)	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	6	280	0	600	0.1	0.0003

Πίνακας 5.11: Δεδομένα εισόδου netdata.xls για το treksimo2max από το case 3 του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	2	10	40	0.4	100
2	1	4	10	60	0.6	80
3	1	5	10	20	0.2	100
4	2	3	10	20	0.2	100
5	2	4	10	40	0.4	100
6	3	5	10	20	0.2	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος (8760h)	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	1	110	0	150	0.1	0.0003
2	2	240	0	0	0	0
3	3	80	0	360	0.1	0.0003
4	4	160	0	0	0	0
5	5	240	0	0	0	0

5.2.1.4 Υποπερίπτωση 4-3p

Στην περίπτωση αυτή έχουμε 3 περιόδους ζήτησης, συνολικής διάρκειας ενός έτους.

Για το 1^ο τρέξιμο (treksimo1) στην πρώτη περίοδο η ζήτηση είναι η ίδια όπως στο case 2, στη δεύτερη είναι μέγιστη (όπως στο case 3 - treskimo1max) και στην τρίτη είναι όπως στην πρώτη περίοδο αλλά με επιπλέον ζήτηση στο ζυγό 6, 280MW. Τα δεδομένα για το τρέξιμο αυτό παρουσιάζονται στους πίνακες 5.12 και 5.13.

Για το 2^ο τρέξιμο (treksimo2) στην πρώτη περίοδο έχουμε τη ζήτηση της 3^{ης} περιόδου από το treskimo1, στη δεύτερη περίοδο έχουμε την ίδια με τη 2^η περίοδο από το treksimo1 και στην τρίτη περίοδο έχουμε ζήτηση ίση με τη μισή της πρώτης. Αυτά φαίνονται στους πίνακες 5.14 και 5.15.

Για το 3^ο τρέξιμο (treksimo3nvars12) έχουμε τα ίδια με το 2^ο τρέξιμο με τη διαφορά ότι έχουμε τις 2 παραπάνω υπονήφιες γραμμές μεταφοράς. Τα δεδομένα βρίσκονται στον πίνακα 5.16.

Πίνακας 5.12: Δεδομένα εισόδου netdata3p.xls για το treksimo1 από το case 4-3p του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης ke (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	2	10	40	0.4	100
2	1	4	10	60	0.6	80
3	1	5	10	20	0.2	100
4	2	3	10	20	0.2	100
5	2	4	10	40	0.4	100
6	3	5	10	20	0.2	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 3 περίοδοι 2190h 2820h 3750h			Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	1	80	80	80	0	150	0.1	0.0003
2	2	240	240	240	0	0	0	0
3	3	40	80	40	0	360	0.1	0.0003
4	4	160	190	160	0	0	0	0
5	5	240	240	240	0	0	0	0

Πίνακας 5.13: Δεδομένα εισόδου NEWdata3p.xls για το treksimo1 από το case 4-3p του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	5	10	20	0.2	100
2	2	6	10	30	0.3	100
3	2	6	10	30	0.3	100
4	2	6	10	30	0.3	100
5	2	6	10	30	0.3	100
6	2	6	10	30	0.3	100
7	3	5	10	20	0.2	100
8	4	6	10	30	0.3	100
9	4	6	10	30	0.3	100
10	4	6	10	30	0.3	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 3 περίοδοι 2190h 2820h 3750h			Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	6	0	280	280	0	600	0.1	0.0003

Πίνακας 5.14: Δεδομένα εισόδου netdata3p.xls για το treksimo2 από το case 4-3p του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	2	10	40	0.4	100
2	1	4	10	60	0.6	80
3	1	5	10	20	0.2	100
4	2	3	10	20	0.2	100
5	2	4	10	40	0.4	100
6	3	5	10	20	0.2	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 3 περίοδοι 2190h 2820h 3750h			Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	1	80	80	40	0	150	0.1	0.0003
2	2	240	240	120	0	0	0	0
3	3	40	80	20	0	360	0.1	0.0003
4	4	160	190	80	0	0	0	0
5	5	240	240	120	0	0	0	0

Πίνακας 5.15: Δεδομένα εισόδου NEWdata3p.xls για το treksimo2 από το case 4-3p του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	5	10	20	0.2	100
2	2	6	10	30	0.3	100
3	2	6	10	30	0.3	100
4	2	6	10	30	0.3	100
5	2	6	10	30	0.3	100
6	2	6	10	30	0.3	100
7	3	5	10	20	0.2	100
8	4	6	10	30	0.3	100
9	4	6	10	30	0.3	100
10	4	6	10	30	0.3	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 3 περίοδοι 2190h 2820h 3750h			Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	6	280	280	140	0	600	0.1	0.0003

Πίνακας 5.16: Δεδομένα εισόδου NEWdata3p.xls για treksimo3nvars12 για το case 4-3p του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	5	10	20	0.2	100
2	2	6	10	30	0.3	100
3	2	6	10	30	0.3	100
4	2	6	10	30	0.3	100
5	2	6	10	30	0.3	100
6	2	6	10	30	0.3	100
7	3	5	10	20	0.2	100
8	4	6	10	30	0.3	100
9	4	6	10	30	0.3	100
10	4	6	10	30	0.3	100
11	3	6	10	48	0.48	100
12	3	6	10	48	0.48	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 3 περίοδοι 2190h 2820h 3750h			Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	6	280	280	140	0	600	0.1	0.0003

Για το 4^ο τρέξιμο (treksimo4) έχουμε τα ίδια με το 3^ο τρέξιμο με τη διαφορά ότι οι συντελεστές κόστους του ζυγού 6 είναι το μισό από αυτούς των 1 και 3 ζυγών. Τα δεδομένα βρίσκονται στους πίνακες 5.17, 5.18.

Πίνακας 5.17: Δεδομένα εισόδου netdata3p.xls για το treksimo4 από το case 4-3p του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	2	10	40	0.4	100
2	1	4	10	60	0.6	80
3	1	5	10	20	0.2	100
4	2	3	10	20	0.2	100
5	2	4	10	40	0.4	100
6	3	5	10	20	0.2	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 3 περίοδοι 2190h 2820h 3750h			Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	1	80	80	40	0	150	0.1	0.0003
2	2	240	240	120	0	0	0	0
3	3	40	80	20	0	360	0.1	0.0003
4	4	160	190	80	0	0	0	0
5	5	240	240	120	0	0	0	0

Πίνακας 5.18: Δεδομένα εισόδου NEWdata3p.xls για treksimo4 για το case 4-3p του δικτύου των 6 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	5	10	20	0.2	100
2	2	6	10	30	0.3	100
3	2	6	10	30	0.3	100
4	2	6	10	30	0.3	100
5	2	6	10	30	0.3	100
6	2	6	10	30	0.3	100
7	3	5	10	20	0.2	100
8	4	6	10	30	0.3	100
9	4	6	10	30	0.3	100
10	4	6	10	30	0.3	100
11	3	6	10	48	0.48	100
12	3	6	10	48	0.48	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 3 περίοδοι 2190h 2820h 3750h			Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	6	280	280	140	0	600	0.05	0.00015

5.2.2 Δεδομένα γενετικού αλγορίθμου

Τα δεδομένα του γενετικού αλγορίθμου βρίσκονται στο αρχείο **genpar.dat**.

Μήκος χρωμοσώματος - Size of chromosome (NVARs)

Μέγεθος πληθυσμού - Size of population (POPSIZE)

Πλήθος γενεών - No. of generations (MAXGENS)

Πιθανότητα μετάλλαξης - Mutation Probability (PMUTATION)

Πιθανότητα επιχiasμού - Crossover Probability (PXOVER)

Παράμετρος επιλογής - Selective pressure(q)

Ποινή - Penalty (PENALTY)

Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στους πίνακες 5.19 και 5.20.

Πίνακας 5.19: Δεδομένα για treksimo1, treksimo2, treksimo1max, treksimo2max, treksimonew

----- GENETIC ALGORITHM PARAMETERS -----
Size of chromosome (NVARs)= 10
Size of population (POPSIZE)= 30
No. of generations (MAXGENS)= 50
Mutation Probability (PMUTATION)= 0.05
Crossover Probability (PXOVER)= 0.9
Selective pressure(q)= 3
Penalty (PENALTY)= 10000

Πίνακας 5.20: Δεδομένα για treksimo3nvars12, treksimo1nvars12, treksimo4

----- GENETIC ALGORITHM PARAMETERS -----
Size of chromosome (NVARs)= 12
Size of population (POPSIZE)= 30
No. of generations (MAXGENS)= 50
Mutation Probability (PMUTATION)= 0.05
Crossover Probability (PXOVER)= 0.9
Selective pressure(q)= 3
Penalty (PENALTY)= 10000

Η επιλογή για τις κατάλληλες παραμέτρους της μετάλλαξης και του επιχiasμού έγιναν μετά από δοκιμές με διάφορες τιμές και βάση του διαστήματος τιμών που αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Οι τιμές για την PMUTATION κυμαίνονται στο διάστημα [0.04, 0.08] και για την PXOVER οι τιμές είναι υψηλές, με την 0.9 καταλληλότερη. Επειδή ο χώρος των λύσεων είναι περιορισμένος, θέλουμε να αυξηθεί το exploitation για το λόγο αυτό επιλέγουμε την q ίση με 3.

5.2.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται με τη μορφή πινάκων στο αρχείο εξόδου results.xls αλλά και με τη μορφή των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.1. Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται καταγραφή και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της εκτέλεσης του αλγορίθμου για το μικρό σύστημα των 6 ζυγών.

Οι υποψήφιες γραμμές που τελικά επιλέγονται ως βέλτιστη λύση από τον αλγόριθμο φαίνονται στην πρόρη σειρά κάθε πίνακα με έντονη γραφή.

5.2.3.1 Υποπερίπτωση 1

Τα αποτελέσματα του προγράμματος για το **case1** αποθηκεύονται στο αρχείο **results.xls**.

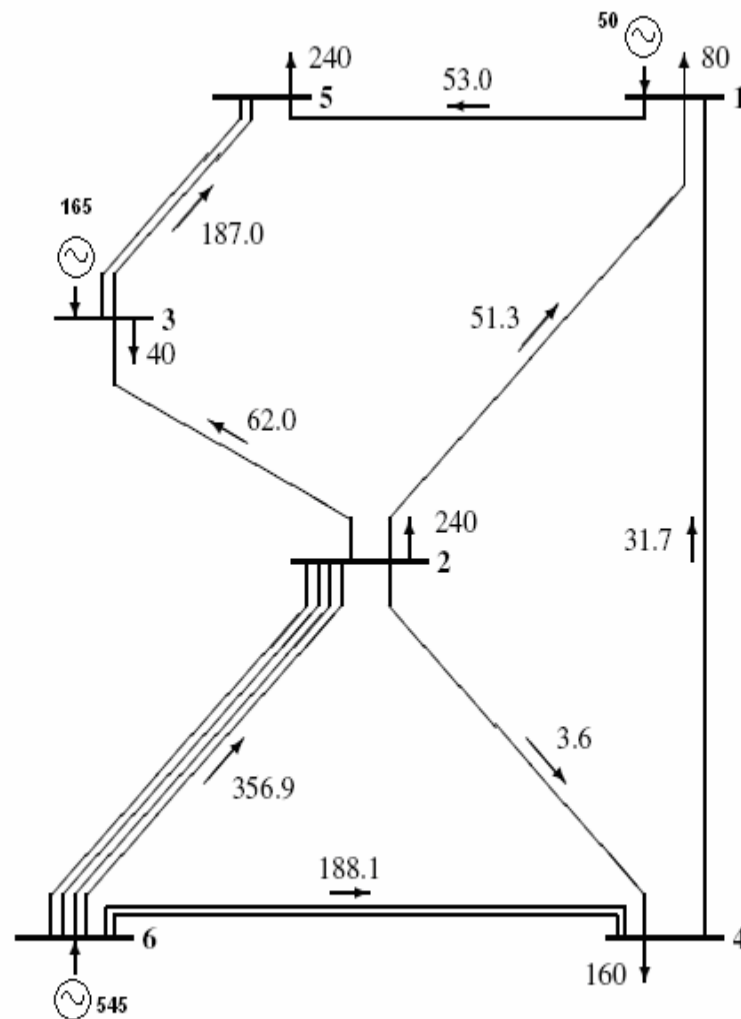
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το treksimo1 του case1 φαίνονται στον Πίνακα 5.21

Για το treksimo2 τα αποτελέσματα είναι περίπου τα ίδια.

Πίνακας 5.21: Αποτελέσματα για το Case 1- treksimo1

Case 1— treksimo1— results.xls										
Υποψήφιες νέες γραμμές	1-5	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-5	4-6	4-6	4-6
Βέλτιστη λύση (best chrome)	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)		155.252352			Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)			1360010.604		
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)	Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)	Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)				
1-2	51.25115	100	-51.2511	50	50	150				
1-4	31.74793	80	-31.7479	0	0	0				
1-5	52.99908	100	52.99908	165	165	360				
2-3	62.00092	100	62.00092	0	0	0				
2-4	3.629255	100	3.629255	0	0	0				
3-5	93.50046	100	93.50046	545	545	600				
2-6	89.22033	100	-89.2203							
2-6	89.22033	100	-89.2203							
2-6	89.22033	100	-89.2203							
2-6	89.22033	100	-89.2203							
3-5	93.50046	100	93.50046							
4-6	94.05934	100	-94.0593							
4-6	94.05934	100	-94.0593							
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)								210		
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)								3.500533		

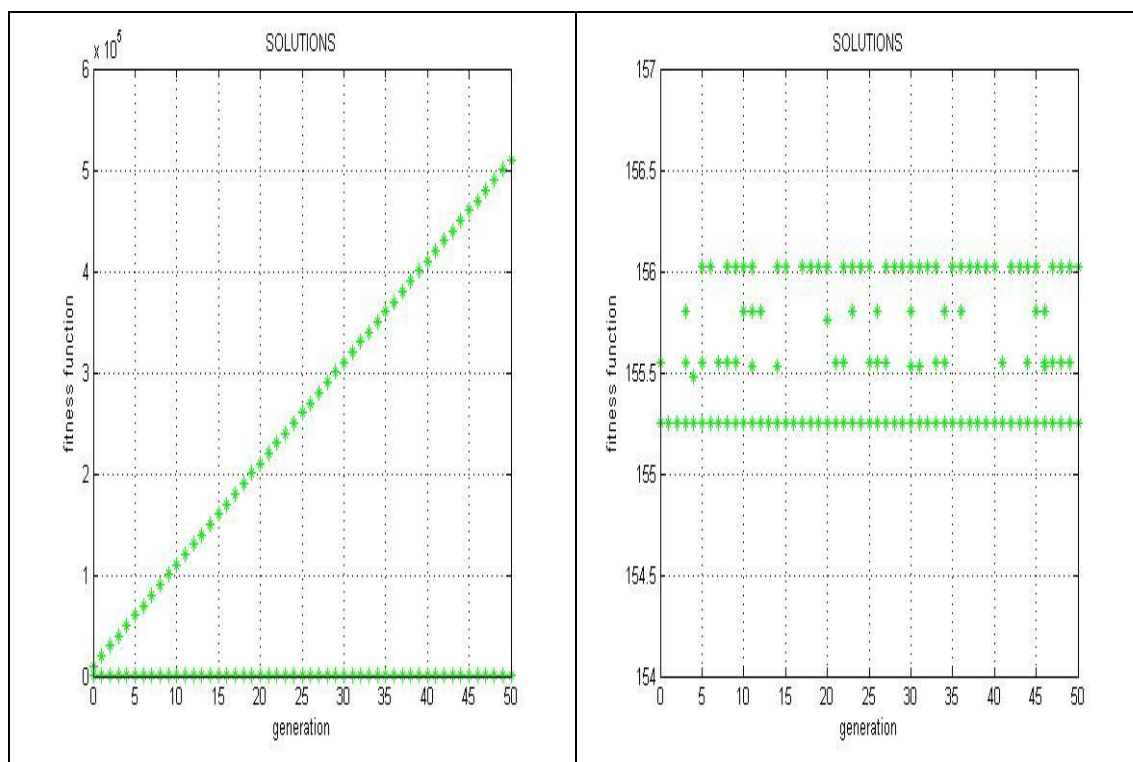
Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι το βέλτιστο δίκτυο που προκύπτει για την περίπτωση αυτή είναι αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2



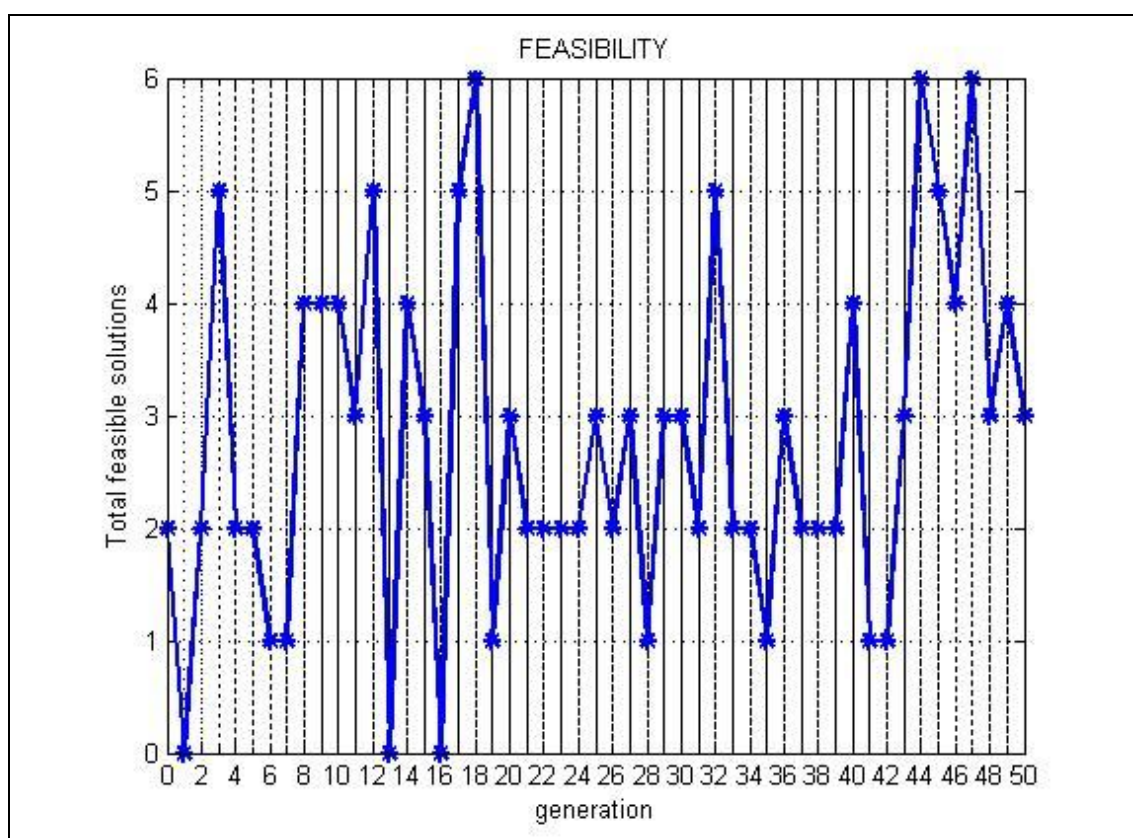
Σχήμα 5.2: Βέλτιστο δίκτυο Garver 6 ζυγών για το case1-treskimo1

Όπως παρατηρούμε και από την εικόνα το βέλτιστο δίκτυο προκύπτει αν προστεθούν 4 γραμμές μεταξύ του ζυγού 6 και του ζυγού 2, 2 γραμμές μεταξύ του 6 και του 4 και 1 γραμμή μεταξύ 3 και 5.

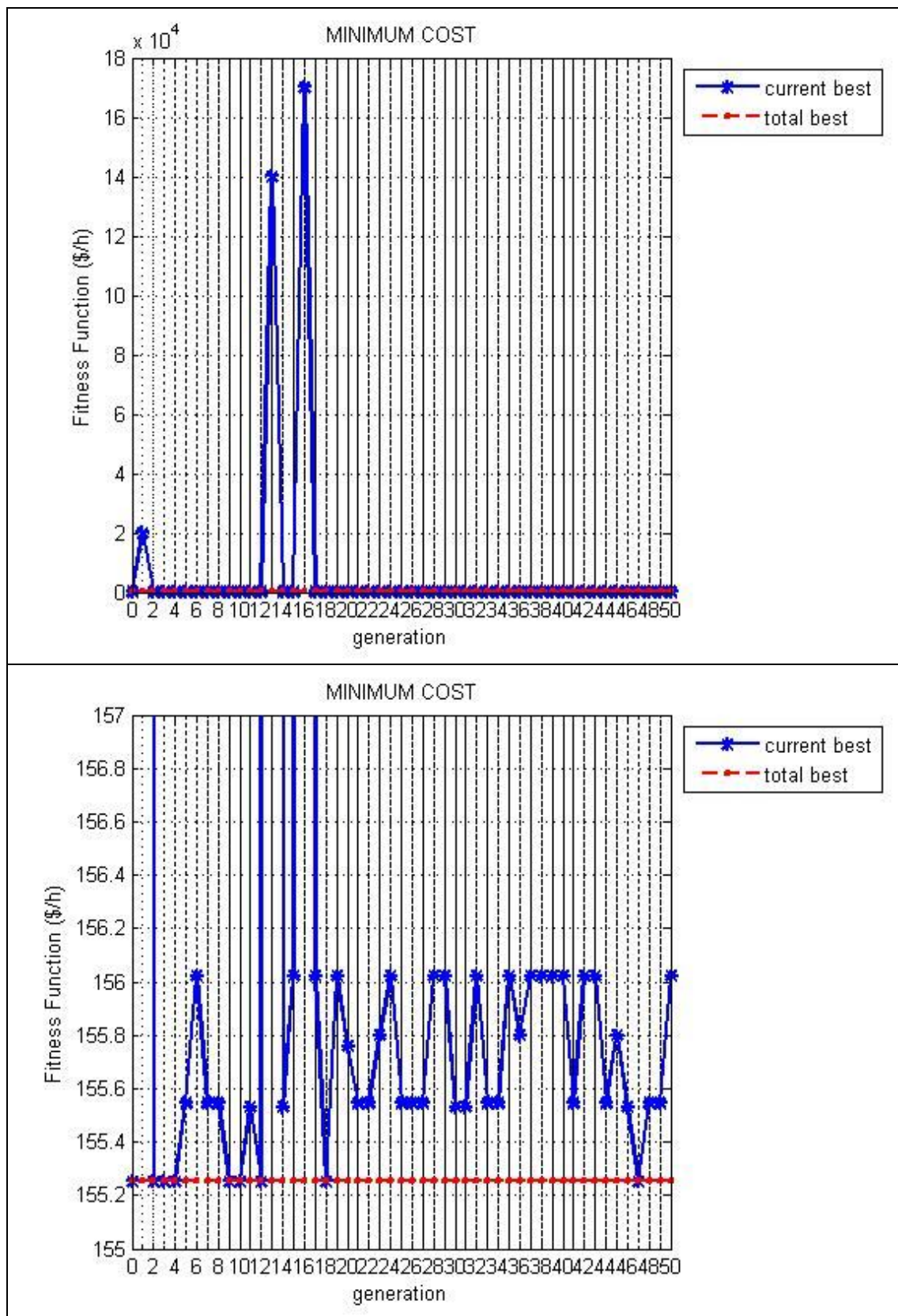
Αναλυτικά η πορεία του αλγορίθμου και τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.3 – 5.10



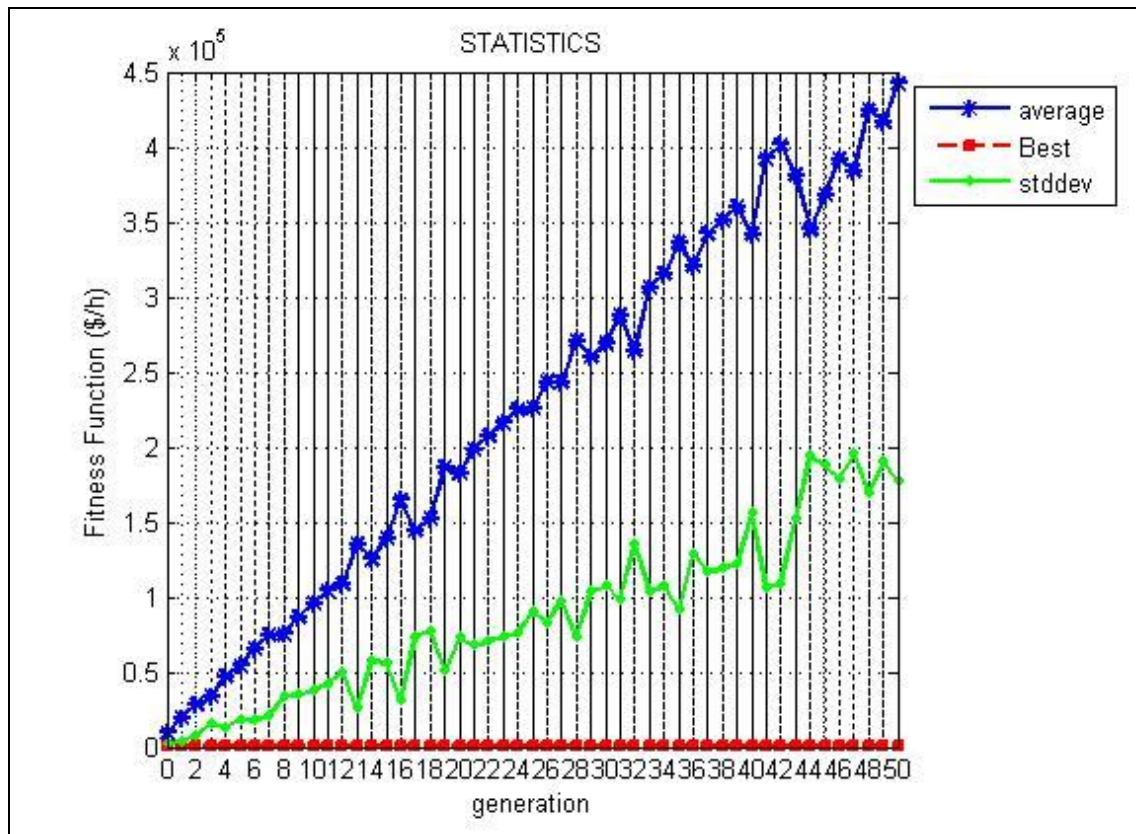
Σχήμα 5.3 : SOLUTIONS, Διάγραμμα 1 (figure1) για case1- treksimo1



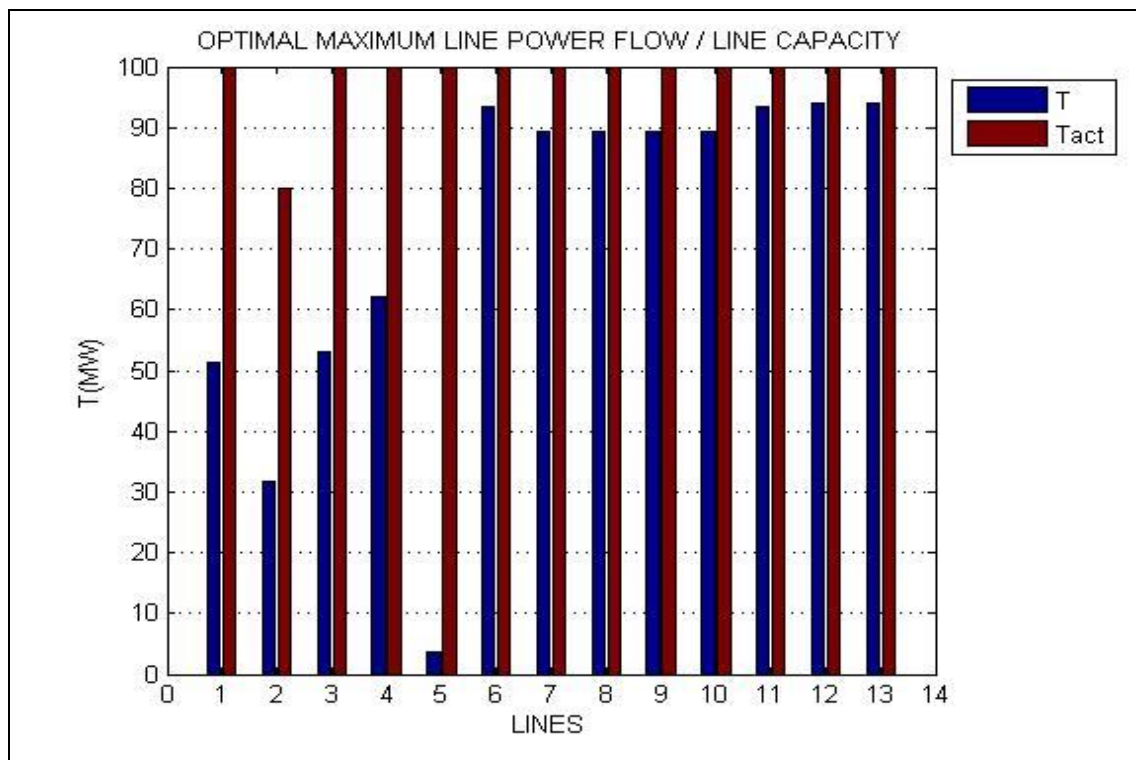
Σχήμα 5.4 : FEASIBILITY, Διάγραμμα 2 (figure2) για case1-treksimo1



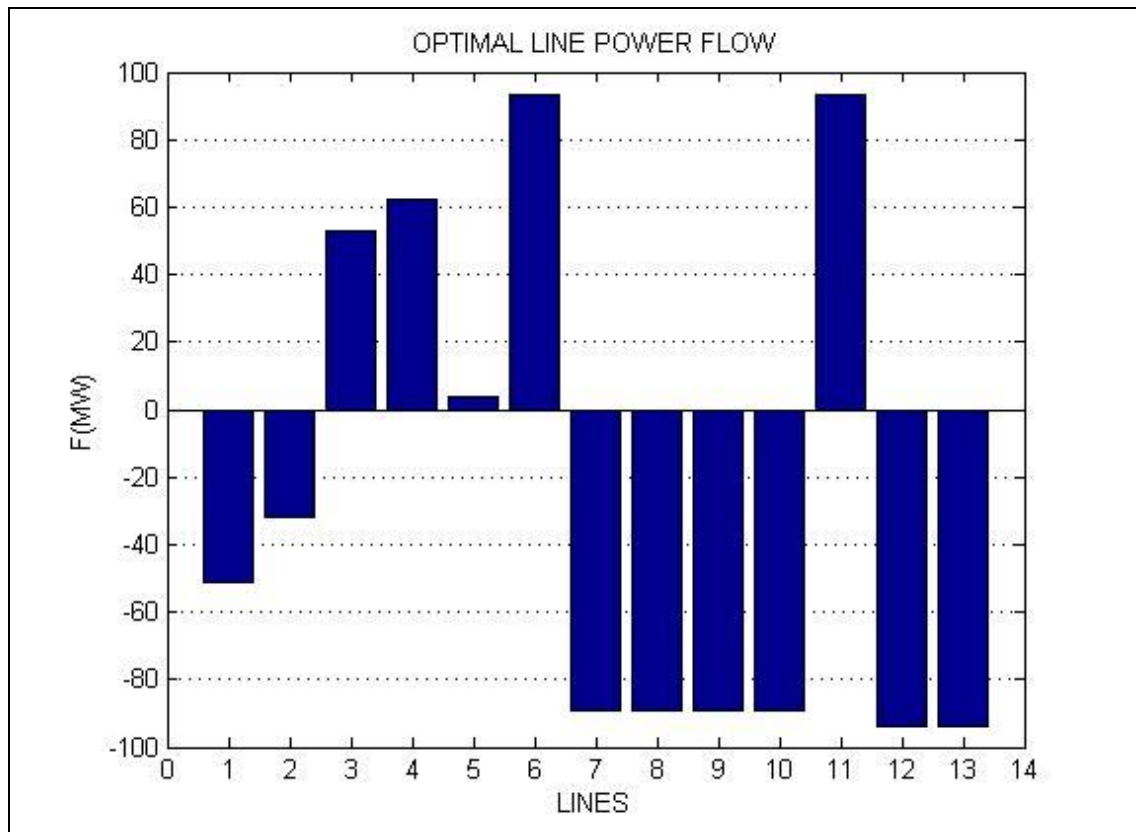
Σχήμα 5.5 : MINIMUM COST, Διάγραμμα 3 (figure3) για case1-treksimo1



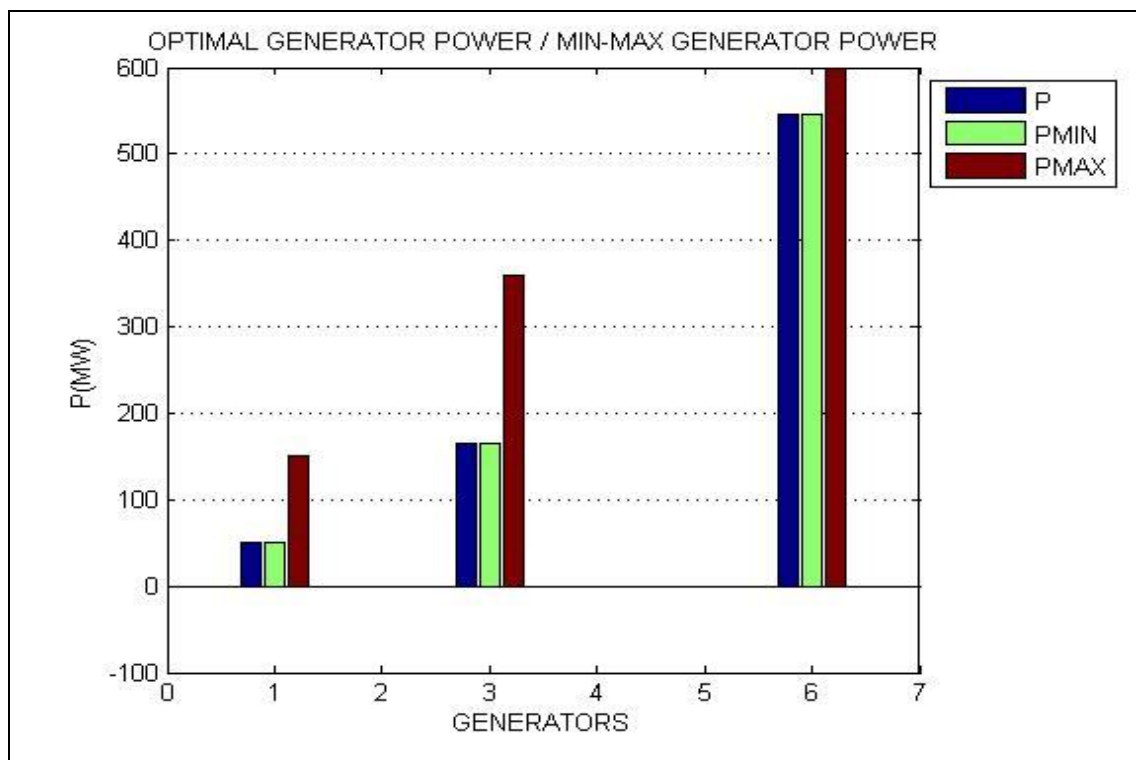
Σχήμα 5.6 : STATISTICS, Διάγραμμα 4 (figure4) για case1-treksimol



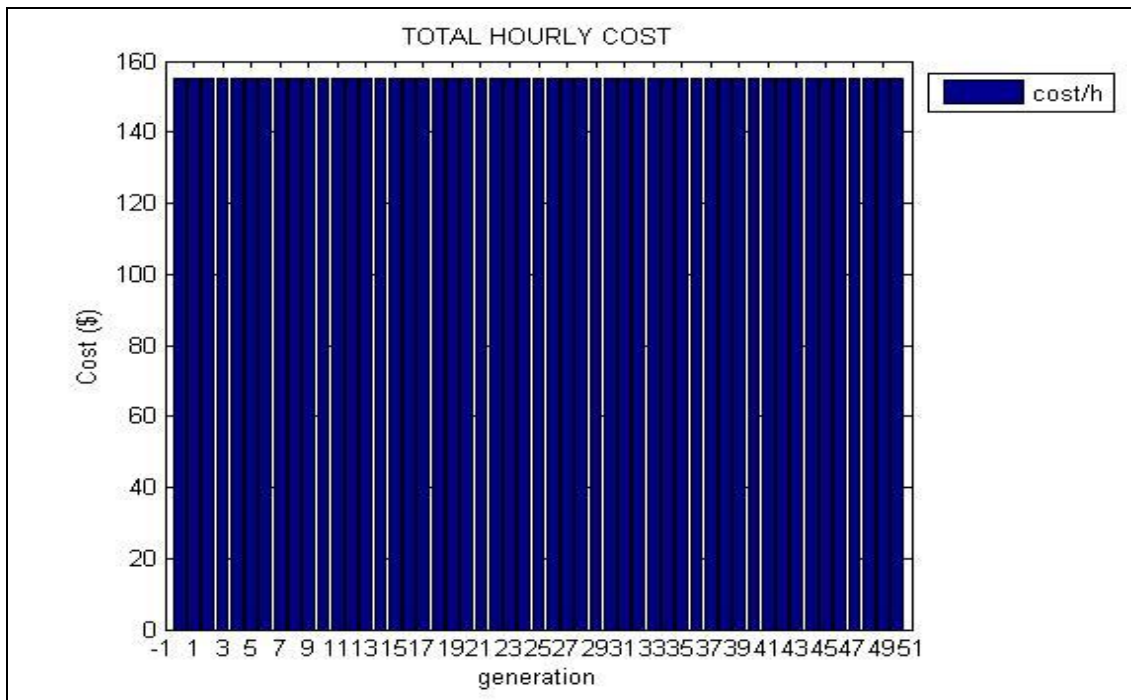
Σχήμα 5.7 : OPTIMAL MAXIMUM LINE POWER FLOW/LINE CAPACITY, Διάγραμμα 5 (figure5) για case1-treksimol



Σχήμα 5.8 : OPTIMAL LINE POWER FLOW, Διάγραμμα 6 (figure6) για case1-treksimol



Σχήμα 5.9 : OPTIMAL GENERATOR POWER/MIN-MAX GENERATOR POWER
Διάγραμμα 7 (figure7) για case1-treksimol



Σχήμα 5.10 : TOTAL HOURLY COST, Διάγραμμα 8 (figure8) για case1-treksimol

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από το Σχήμα 5.4 προκύπτει ότι οι εφικτές λύσεις σε κάθε γενιά είναι έως 6, καθώς το σύστημα είναι μικρό και ο χώρος των λύσεων περιορισμένος.

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται ότι το βέλτιστο επιτυγχάνεται από την 1^η γενιά, για τον ίδιο λόγο, όπως και για το ότι ο αρχικός πληθυσμός είναι αρκετά μεγάλος.

Από το Σχήμα 5.6 παρατηρούμε ότι όπου έχουμε μείωση του μέσου όρου (average) έχουμε αύξηση της τυπικής απόκλισης. Αυτό εξηγείται καθώς οι περισσότερες λύσεις που προκύπτουν είναι μη εφικτές (λόγω παραβίασης των περιορισμών των ορίων-capacities-των γραμμών) και έτσι ο μέσος όρος της αντικειμενικής είναι υψηλός λόγω της ποινής-Penalty που αυξάνει γραμμικά με τις γενεές. Έτσι όταν σε μια γενιά έχουμε περισσότερες εφικτές λύσεις τότε μειώνεται ο μέσος όρος της αντικειμενικής, αλλά αυξάνεται η τυπική απόκλιση καθώς οι περισσότερες λύσεις εξακολουθούν να είναι οι μη εφικτές.

Στο Σχήμα 5.7 βλέπουμε ότι βέλτιστες ικανότητες μεταφοράς των νέων γραμμών πλησιάζουν τα όρια των γραμμών αυτών (capacities) και αυτό συμβαίνει αφενός επειδή η ζήτηση στους ζυγούς 2, 4 και 5 είναι υψηλή σε σχέση με τους άλλους ζυγούς και αφετέρου επειδή η παραγωγή ουσιαστικά «εξαναγκάζεται» να γίνει από το ζυγό 6 (λόγω περιορισμού για το ελάχιστο όριο λειτουργίας) άρα οι γραμμές που συνδέονται στον 6 έχουν υψηλό φορτίο. Επειδή υπάρχουν οι περιορισμοί για τα capacities των γραμμών, χρειάζονται περισσότερες από μια γραμμές μεταφοράς για τη σύνδεση των κόμβων με υψηλή ζήτηση ώστε αυτή να ικανοποιηθεί και να μην έχουμε υπερφόρτωση των γραμμών.

Στο σχήμα 5.8 φαίνονται οι ροές πραγματικής ισχύος. Όπου το πρόσημο είναι αρνητικό σημαίνει ότι η ροή είναι αντίθετη από αυτή που δηλώσαμε αρχικά, πχ στη γραμμή 1-2 η ροή είναι από τον κόμβο 2 προς τον 1.

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 5.9, η παραγωγή των γεννητριών είναι η ελάχιστη (σύνολο 760MW), όση χρειάζεται δηλαδή για να ικανοποιηθεί η συνολική ζήτηση. Το γεγονός ότι η ελάχιστη δυνατή παραγωγή του ζυγού 6 είναι 545MW και η μέγιστη 600MW εξαναγκάζει τον αλγόριθμο να επιλέξει τις περισσότερες γραμμές επέκτασης από το ζυγό 6, το οποίο είναι και λογικό καθώς ο 6 προστίθεται για την κάλυψη της ζήτησης.

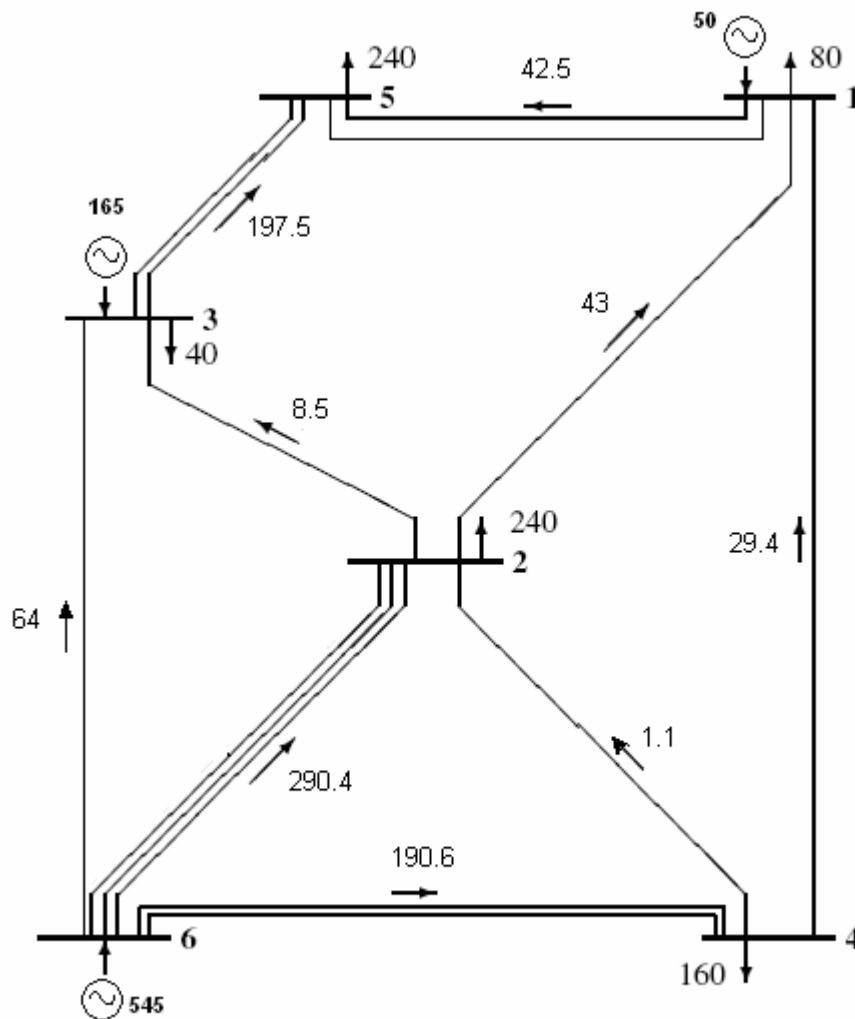
Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται ότι το ελάχιστο κόστος επιτυγχάνεται από την πρώτη γενιά.

Για το treskimo3nvars12, όπου έχουμε 12 υποψήφιες γραμμές τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.22 και τα Σχήματα 5.12 ως 5.19.

Πίνακας 5.22: Αποτελέσματα για το Case 1- treksimo3nvars12

Case 1— treksimo3nvars12												
Υποψήφιες νέες γραμμές	1-5	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-5	4-6	4-6	4-6	3-6	3-6
Βέλτιστη λύση (best chrome)	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)			154.6987593			Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)			1355161.131			
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)	Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)	Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)						
1-2	43.02159	100	-43.0216	50	50	150						
1-4	29.43675	80	-29.4368	0	0	0						
1-5	21.22917	100	21.22917	165	165	360						
2-3	8.501525	100	8.501525	0	0	0						
2-4	1.133537	100	-1.13354	0	0	0						
3-5	98.77083	100	98.77083	545	545	600						
1-5	21.22917	100	21.22917									
2-6	96.79653	100	-96.7965									
2-6	96.79653	100	-96.7965									
2-6	96.79653	100	-96.7965									
3-5	98.77083	100	98.77083									
4-6	95.28514	100	-95.2851									
4-6	95.28514	100	-95.2851									
3-6	64.04013	100	-64.0401									
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)									232.844			
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)									3.880733			

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι το βέλτιστο δίκτυο που προκύπτει για την περίπτωση αυτή είναι αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11

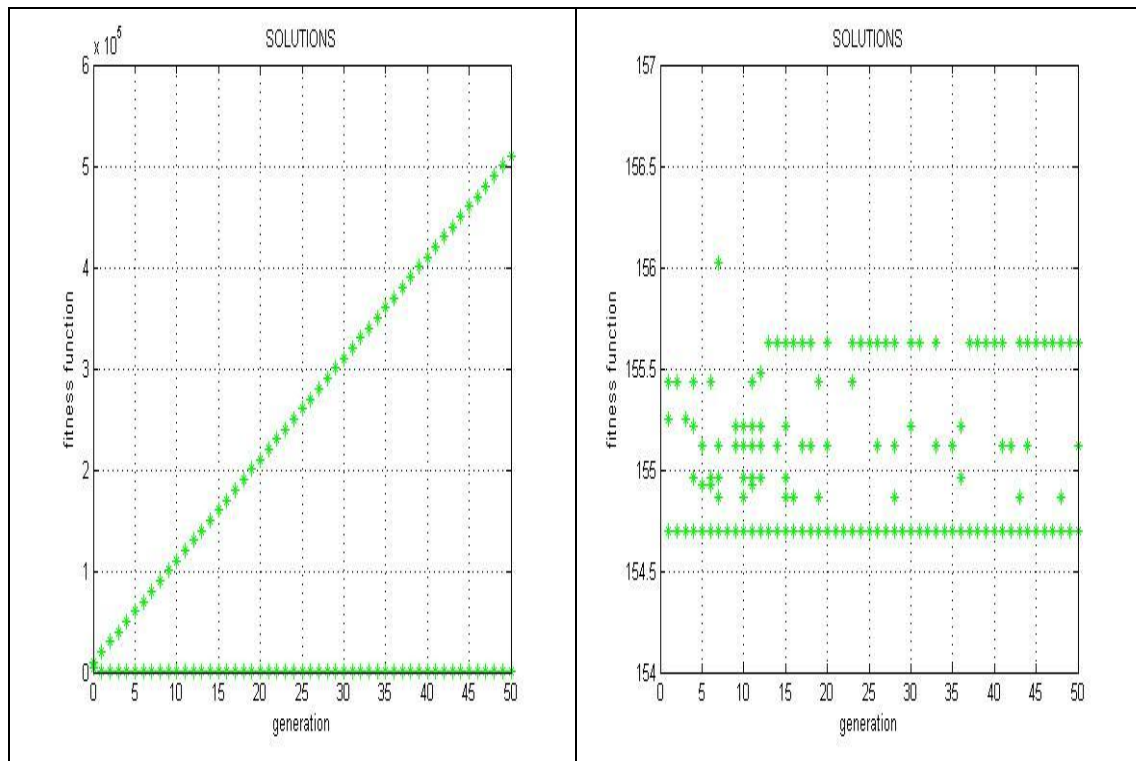


Σχήμα 5.11: Βέλτιστο δίκτυο Garver 6 ζυγών για το case1-treskimo3nvars12

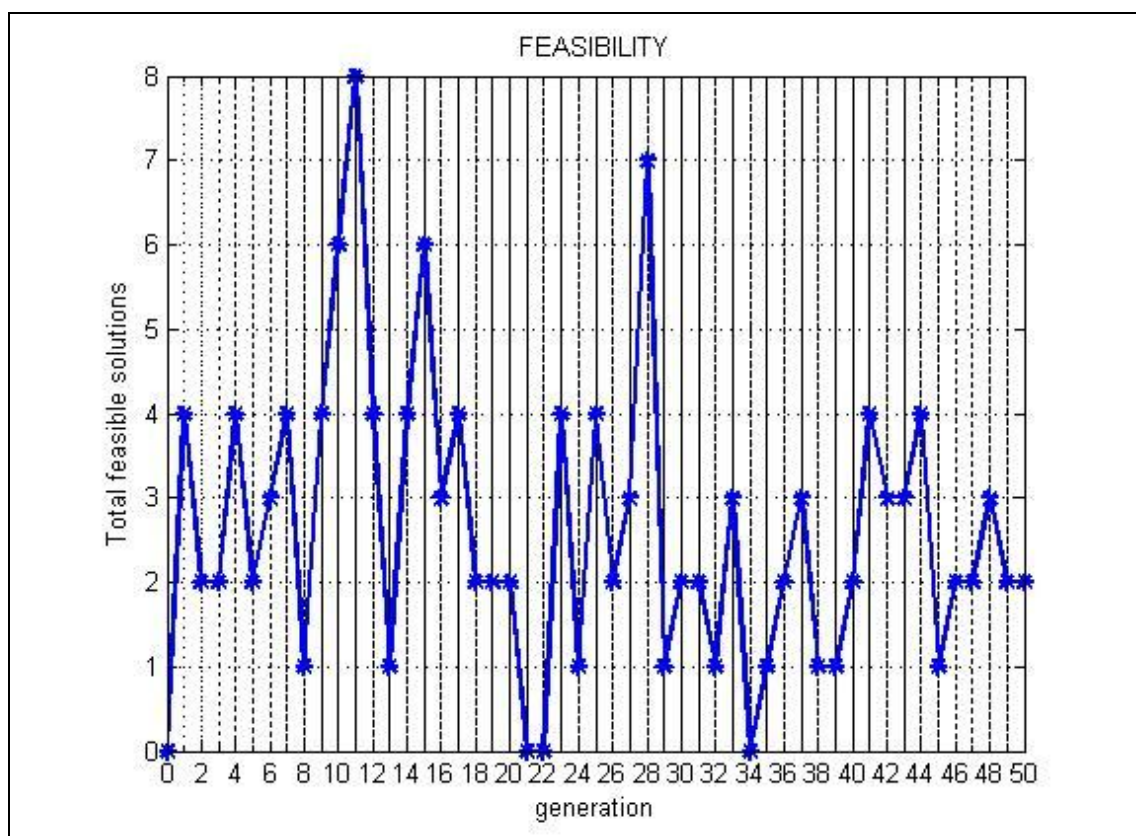
Όπως παρατηρούμε και από την εικόνα το βέλτιστο δίκτυο προκύπτει αν προστεθεί 1 γραμμή μεταξύ 1 και 5, 3 γραμμές μεταξύ του ζυγού 6 και του ζυγού 2, 2 γραμμές μεταξύ του 6 και του 4, 1 γραμμή μεταξύ 3 και 5 και 1 γραμμή μεταξύ 6 και 3.

Το δίκτυο αυτό έχει λίγο καλύτερη τιμή για την αντικειμενική, δηλ. χαμηλότερο κόστος από το δίκτυο του 1^{ου} και 2^{ου} τρεξίματος. Το κόστος στην περίπτωση του 3^{ου} τρεξίματος είναι 154,69 \$/h ενώ το προηγούμενο ήταν 155,25\$/h.

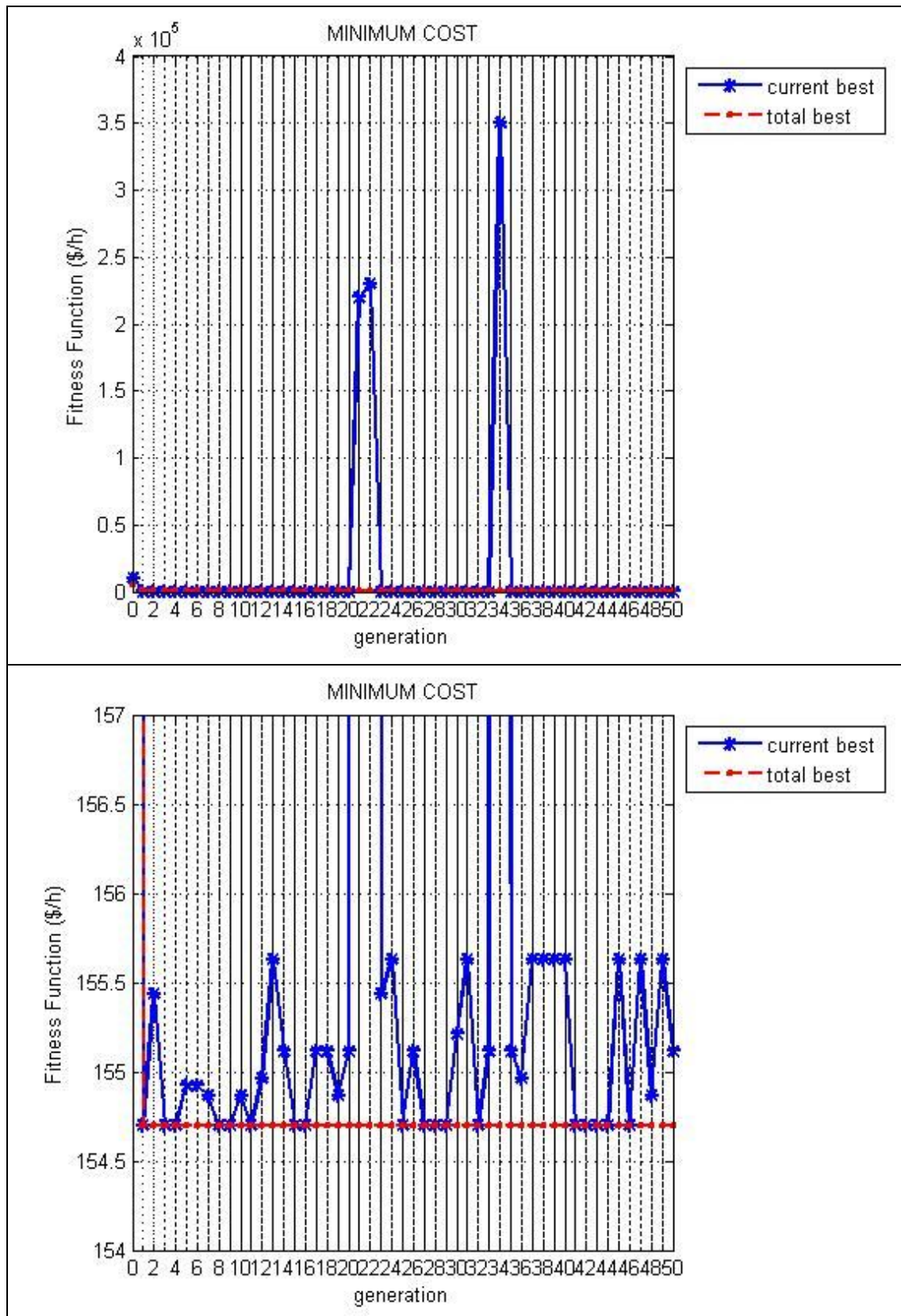
Αναλυτικά η πορεία του αλγορίθμου και τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.12 – 5.19



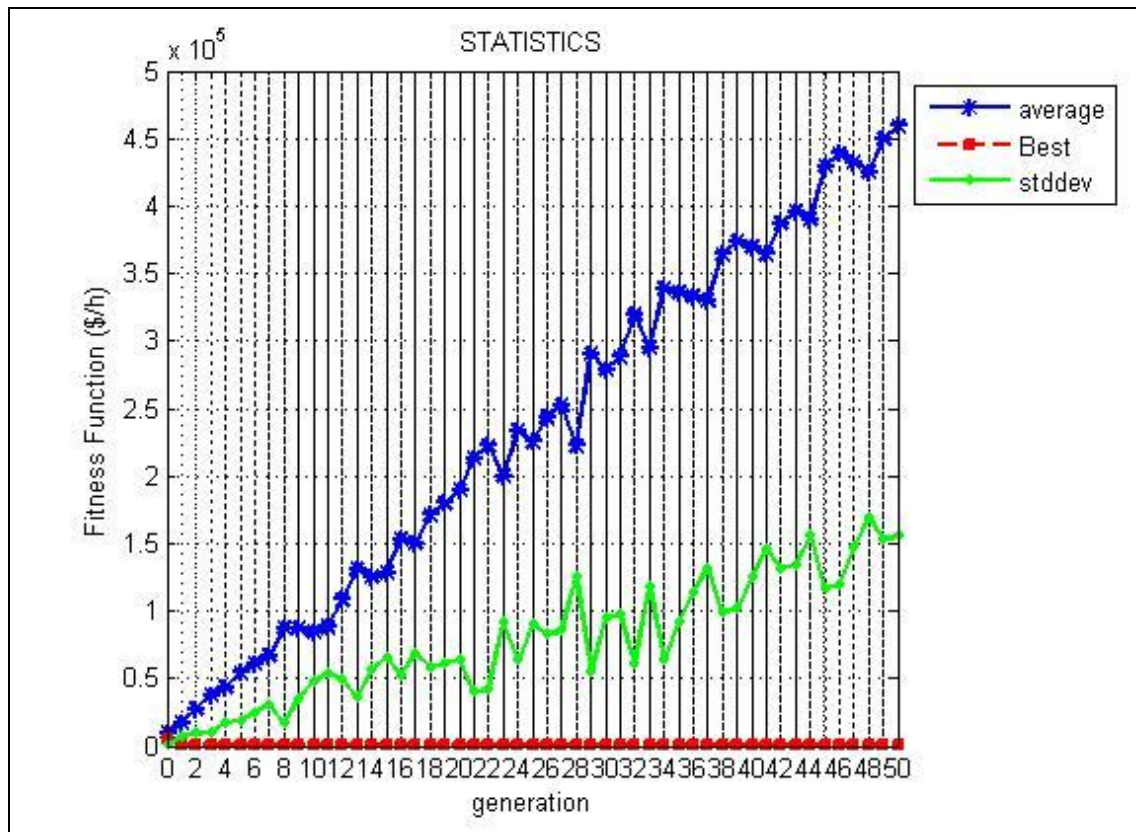
Σχήμα 5.12 : SOLUTIONS, Διάγραμμα 1 (figure1) για case1- treksimo3nvars12



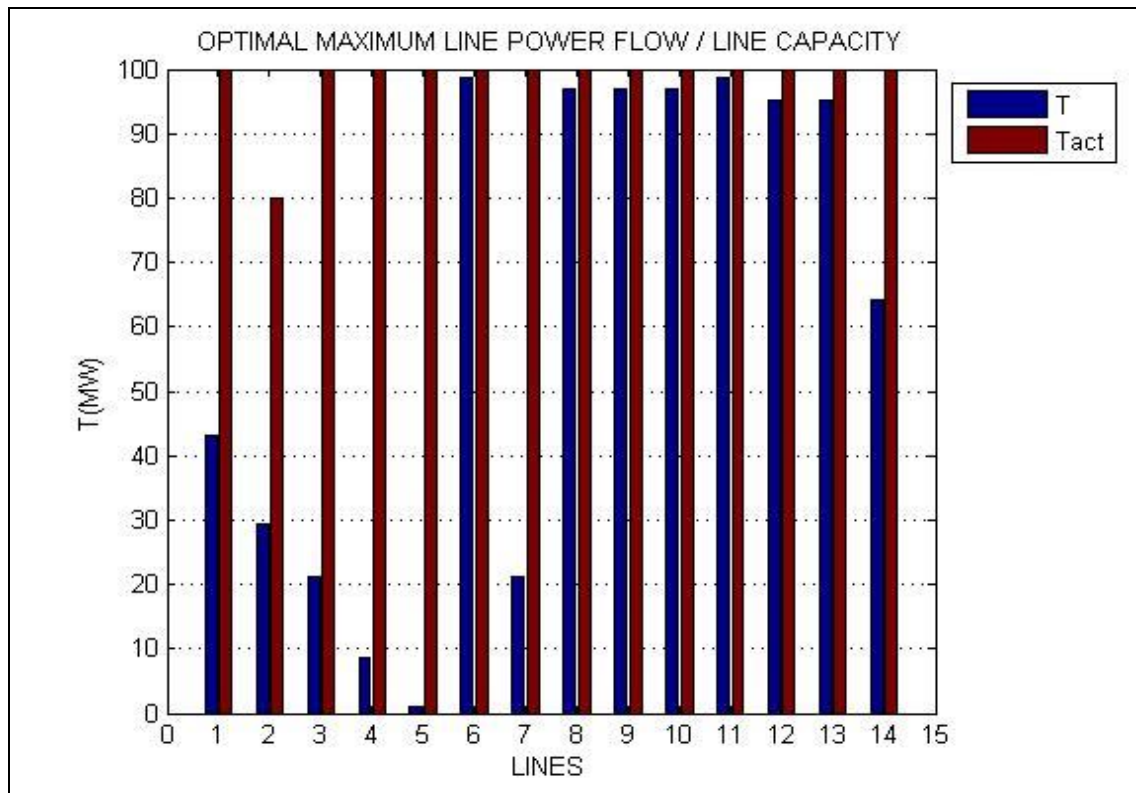
Σχήμα 5.13 : FEASIBILITY, Διάγραμμα 2 (figure2) για case1-treksimo3nvars12



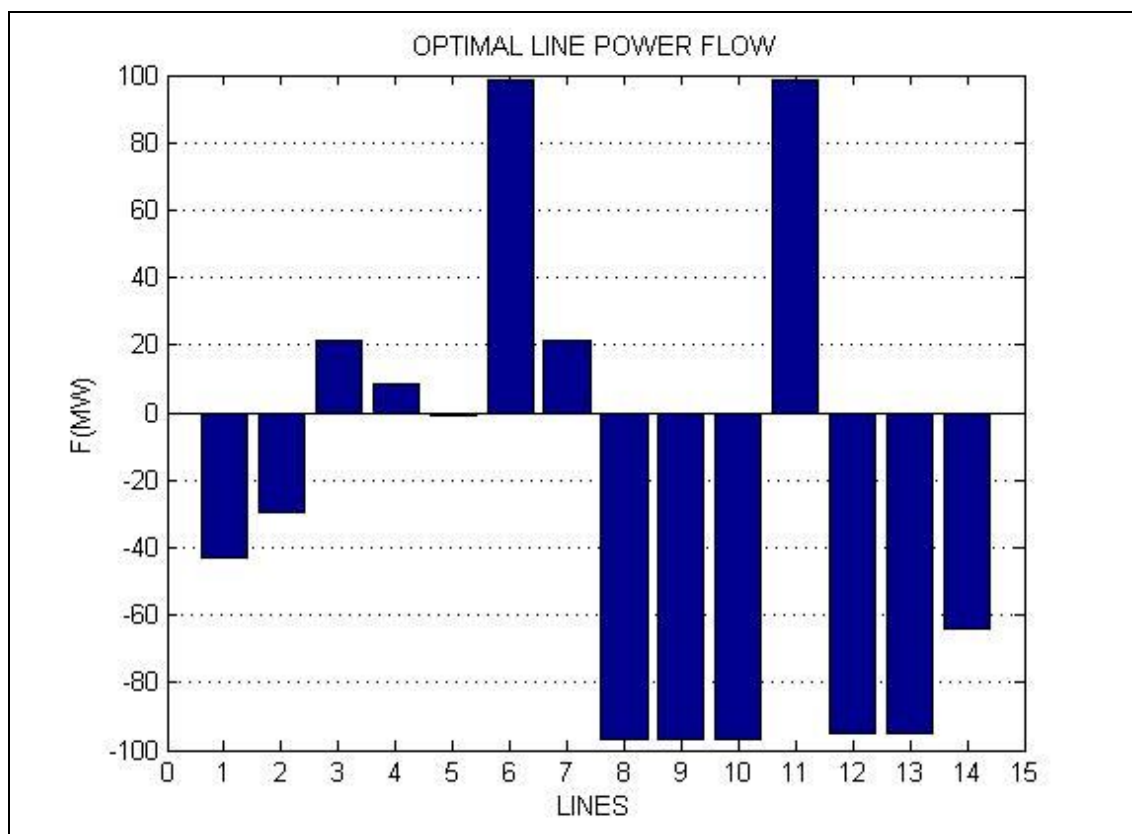
Σχήμα 5.14 : MINIMUM COST, Διάγραμμα 3 (figure3) για case1-treksimo3nvars12



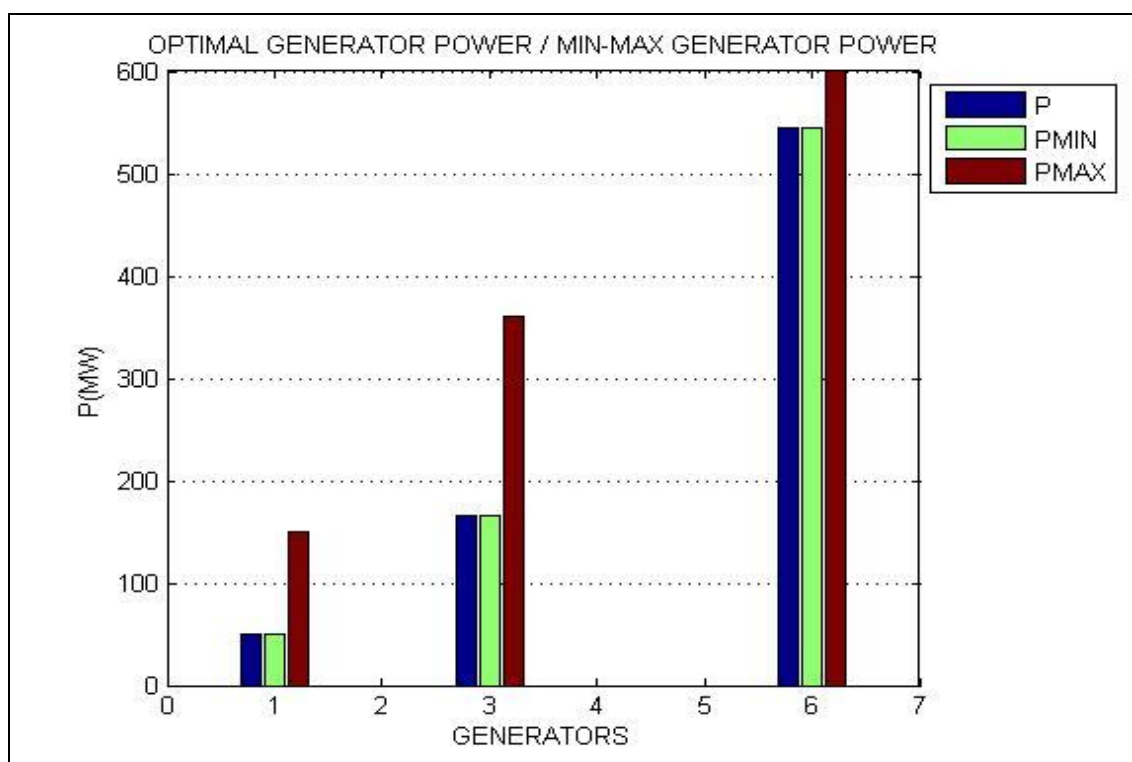
Σχήμα 5.15 : STATISTICS, Διάγραμμα 4 (figure4) για case1-treksimo3nvars12



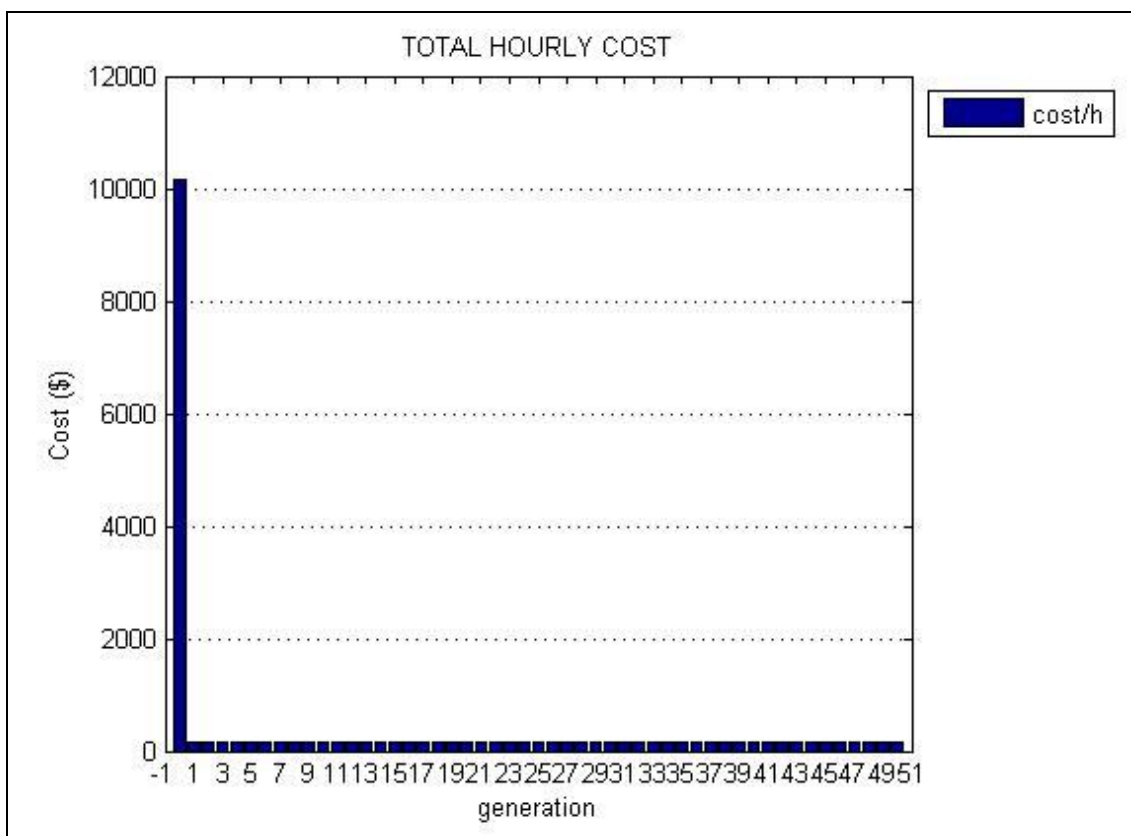
Σχήμα 5.16 : OPTIMAL MAXIMUM LINE POWER FLOW/LINE CAPACITY, Διάγραμμα 5 (figure5) για case1-treksimo3nvars12



Σχήμα 5.17 : OPTIMAL LINE POWER FLOW, Διάγραμμα 6 (figure6) για case1-treksimo3nvars12



Σχήμα 5.18 : OPTIMAL GENERATOR POWER/MIN-MAX GENERATOR POWER
Διάγραμμα 7 (figure7) για case1-treksimo3nvars12



Σχήμα 5.19 : TOTAL HOURLY COST, Διάγραμμα 8 (figure8) για case1-treksimo3nvars12

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα συμπεράσματα για τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με τα προηγούμενα τρεξίματα, τόσο για τις ικανότητες των γραμμών μεταφοράς όσο και για τις ισχύς παραγωγής των γεννητριών. Η μόνη διαφορά είναι η διαφορετική βέλτιστη λύση που προκύπτει από την προσθήκη των 2 νέων υποψήφιων γραμμών μεταφοράς στη λίστα, με συνέπεια να αλλάξει το βέλτιστο μελλοντικό δίκτυο.

5.2.3.2 Υποπερίπτωση 2

Τα αποτελέσματα του προγράμματος για το **case2** αποθηκεύονται στον αντίστοιχο φάκελο (case2) στο αρχείο **results.xls**.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το treksimo2 του case2 φαίνονται στον Πίνακα 5.23. Στο case2, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.2.1.2, δεν έχουμε περιορισμό για τα κάτω όρια λειτουργίας των γεννητριών (εκτός του ότι πρέπει να είναι θετικά).

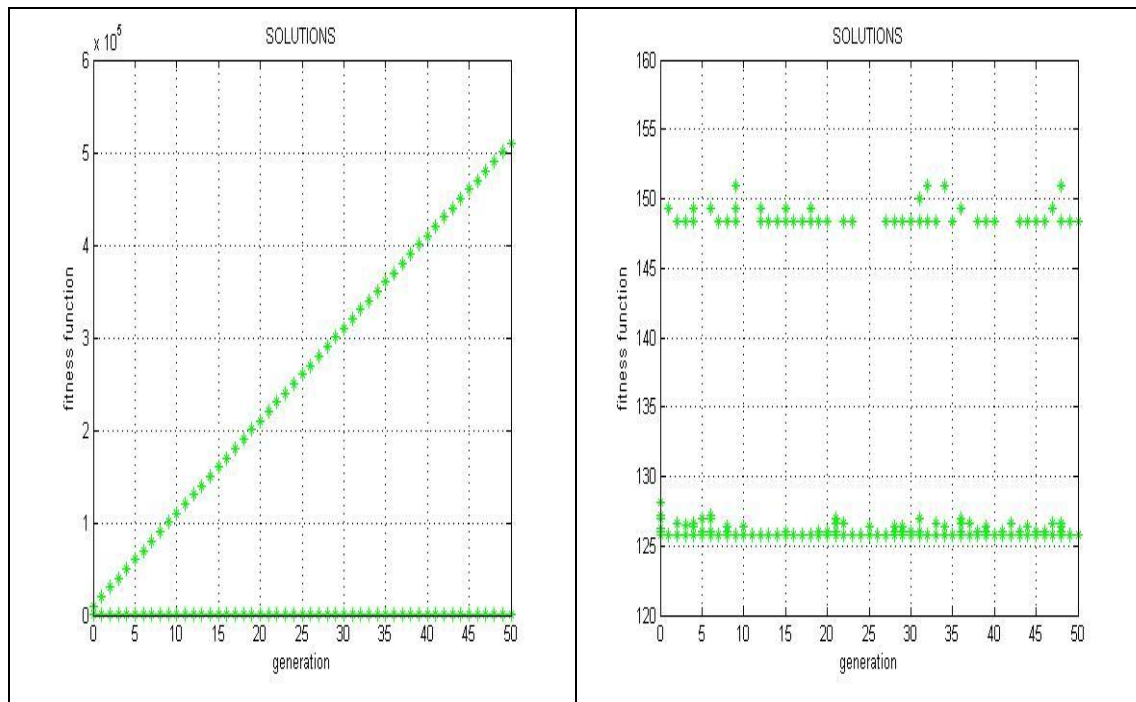
Πίνακας 5.23: Αποτελέσματα για το Case 2- treksimo2

Case 2— treksimo2— results.xls										
Υποψήφιες νέες γραμμές	1-5	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-5	4-6	4-6	4-6
Βέλτιστη λύση (best_chrome)	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)		125.8402283		Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)				1102360.4		
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)	Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)	Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)				
1-2	7.5	100	7.5	150	0	150				
1-4	5	80	5	0	0	0				
1-5	28.75	100	28.75	300	0	360				
2-3	77.5	100	-77.5	0	0	0				
2-4	1.74E-30	100	2.22E-30	0	0	0				
3-5	91.25	100	91.25	310	0	600				
1-5	28.75	100	28.75							
2-6	51.66667	100	-51.6667							
2-6	51.66667	100	-51.6667							
2-6	51.66667	100	-51.6667							
3-5	91.25	100	91.25							
4-6	51.66667	100	-51.6667							
4-6	51.66667	100	-51.6667							
4-6	51.66667	100	-51.6667							
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)								296.375		
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)								4.939583		

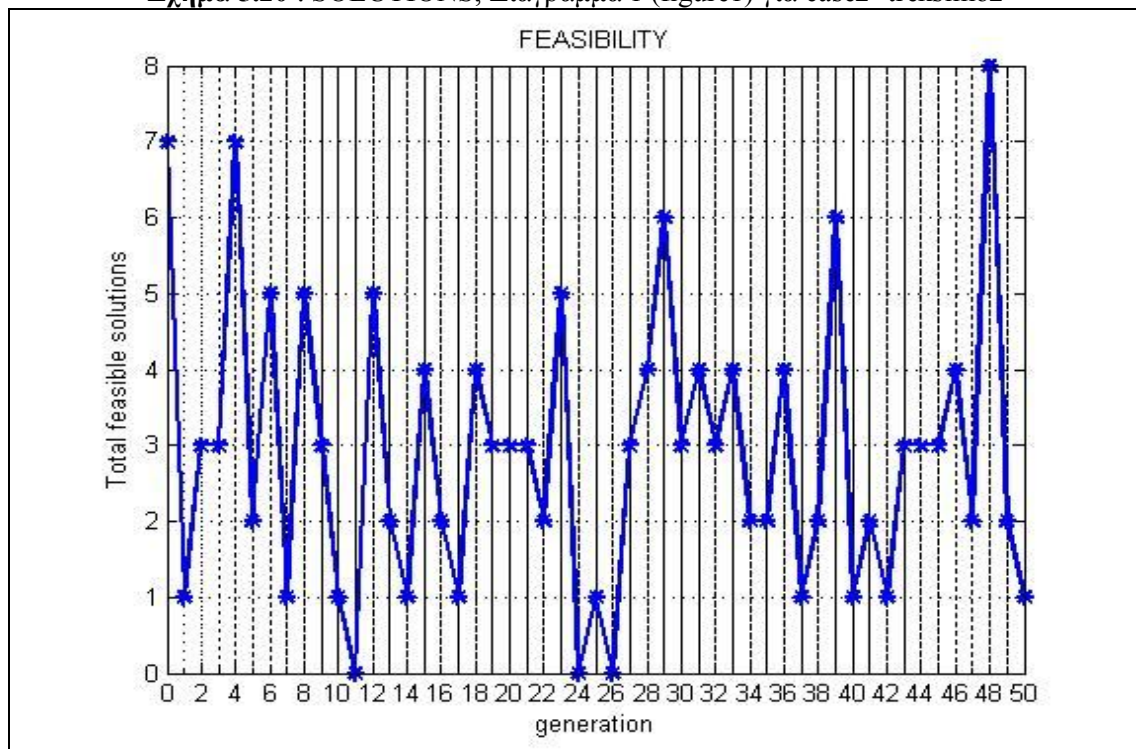
Το βέλτιστο δίκτυο προκύπτει αν προστεθούν συνολικά 8 γραμμές: 1 γραμμή μεταξύ 1 και 5, 3 γραμμές μεταξύ του ζυγού 6 και του ζυγού 2, 3 γραμμές μεταξύ του 6 και του 4 και 1 γραμμή μεταξύ 3 και 5.

Το δίκτυο αυτό έχει καλύτερη τιμή για την αντικειμενική από το case1. Το κόστος εδώ είναι περίπου 126\$/h και αυτό οφείλεται στο ότι οι γεννήτριες δεν έχουν ελάχιστα όρια λειτουργίας, οπότε οι γραμμές μεταφοράς είναι πιο ομοιόμορφα φορτισμένες..

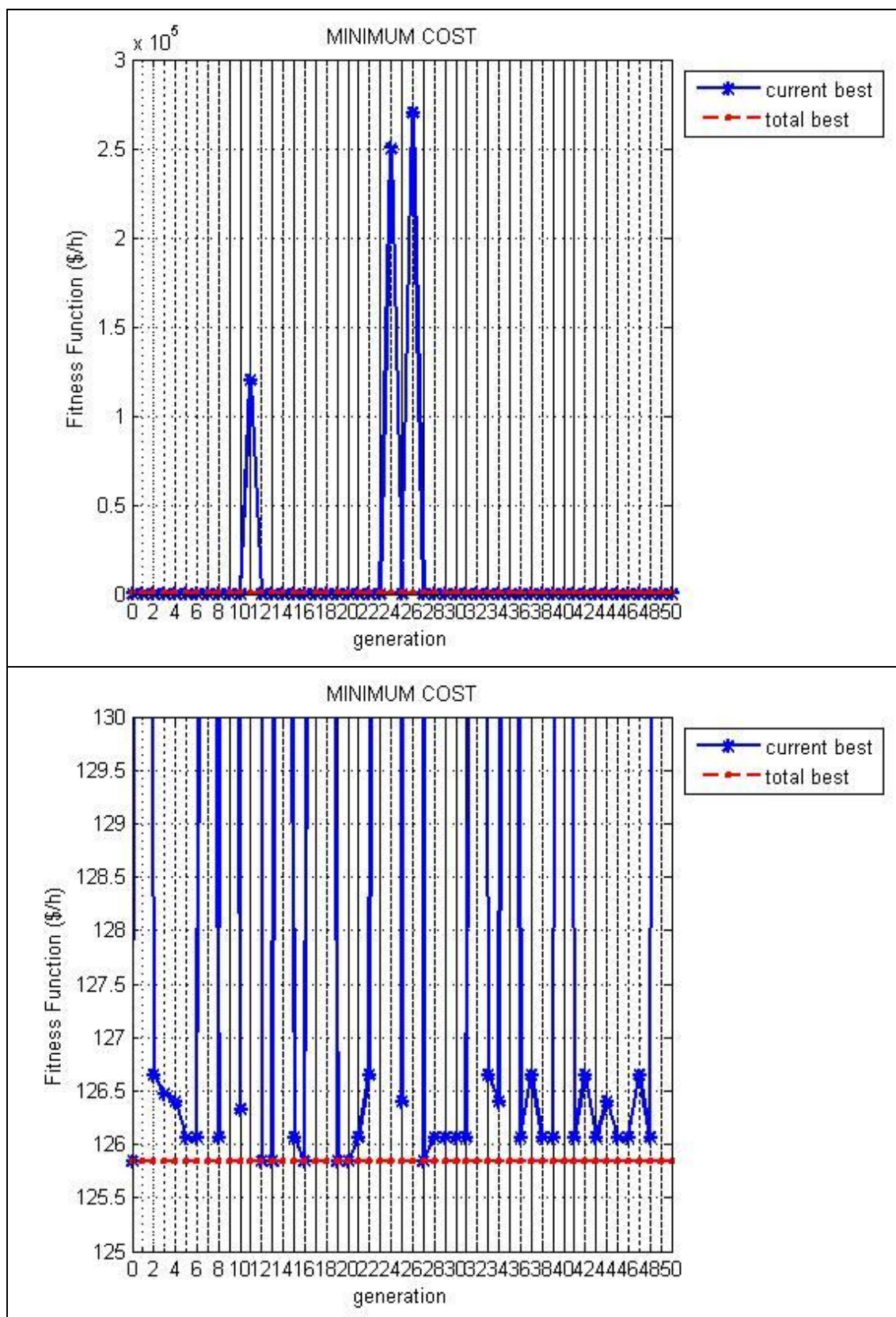
Αναλυτικά η πορεία του αλγορίθμου και τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.20 – 5.27



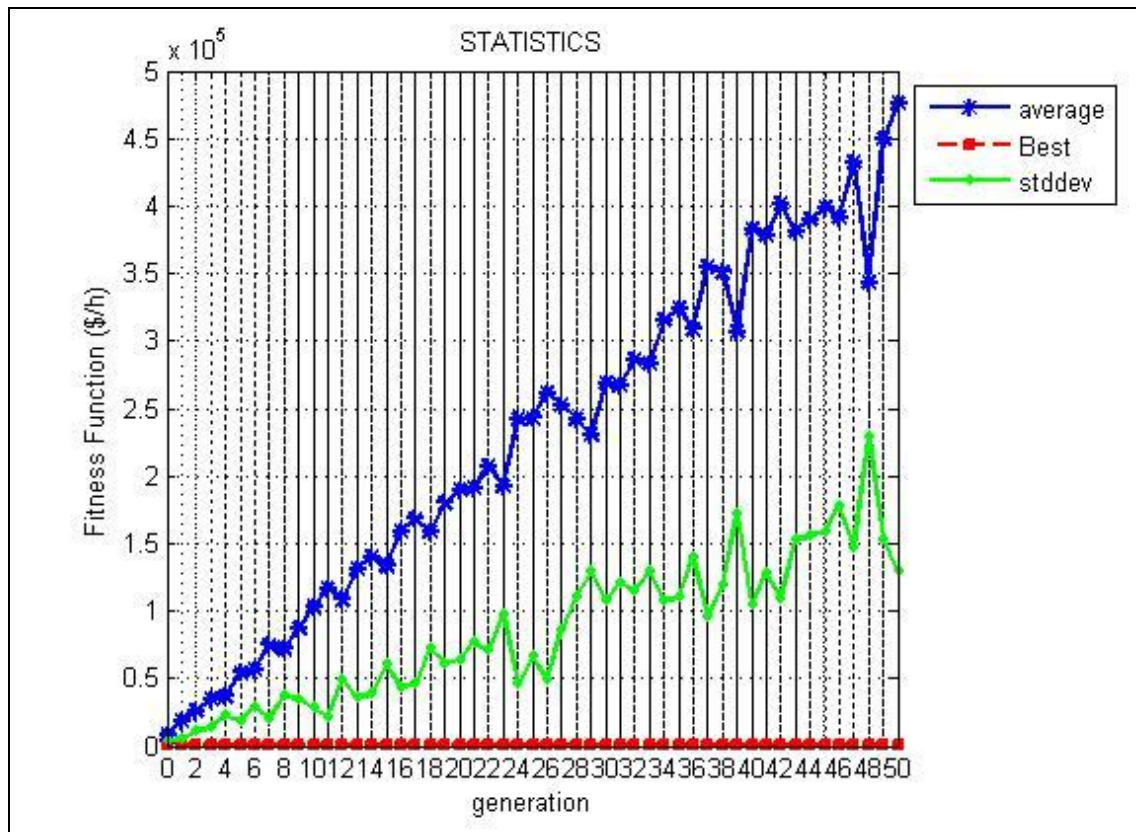
Σχήμα 5.20 : SOLUTIONS, Διάγραμμα 1 (figure1) για case2- treksimo2



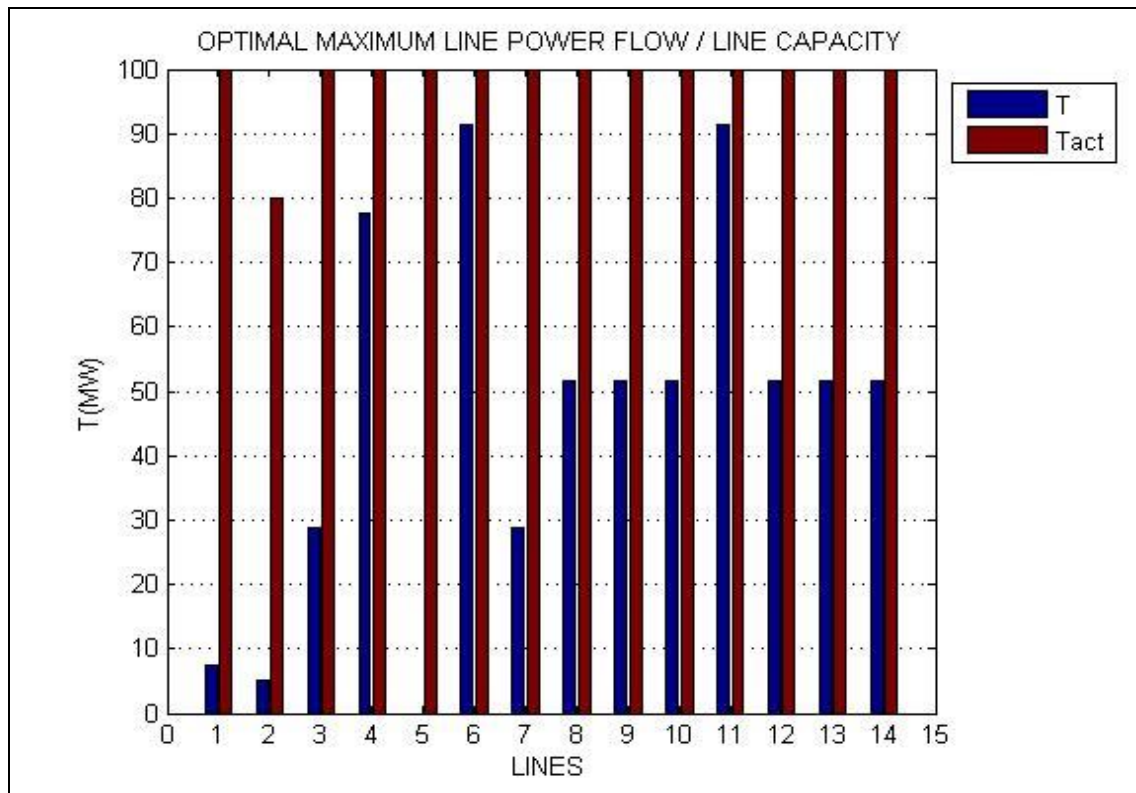
Σχήμα 5.21 : FEASIBILITY, Διάγραμμα 2 (figure2) για case2-treksimo2



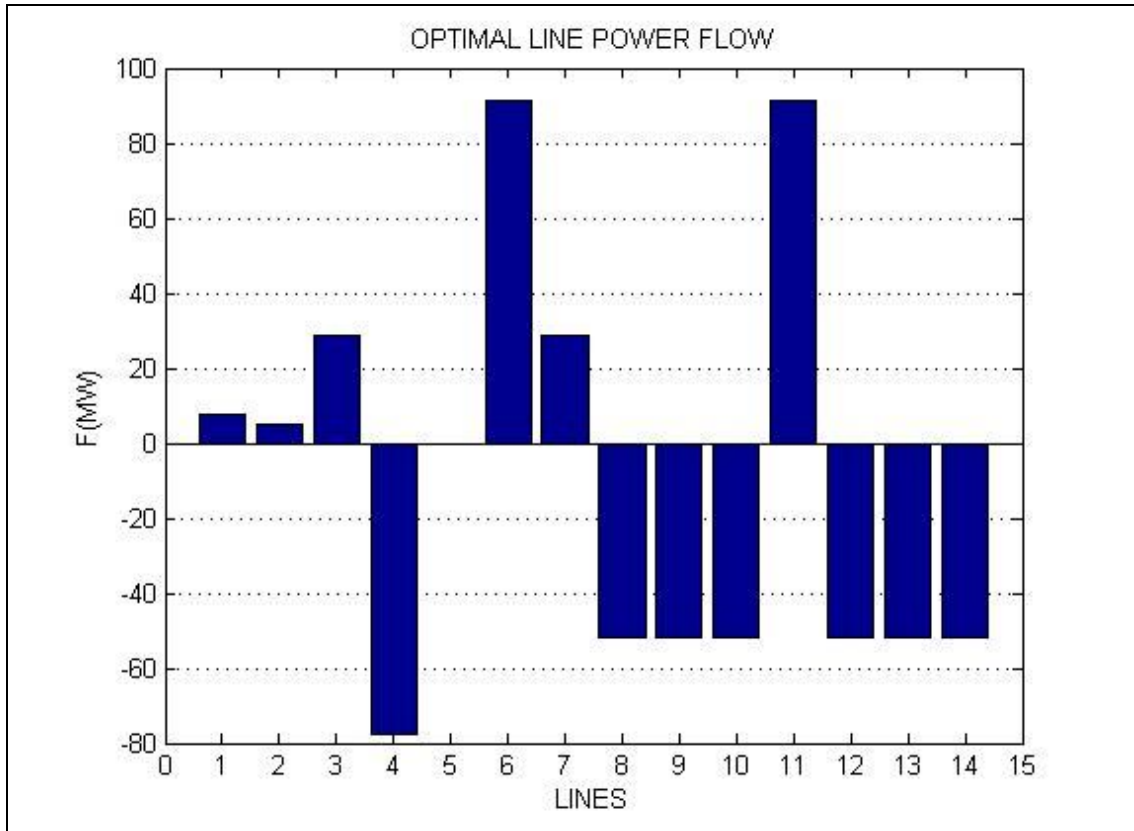
Σχήμα 5.22 : MINIMUM COST, Διάγραμμα 3 (figure3) για case2-treksimo2



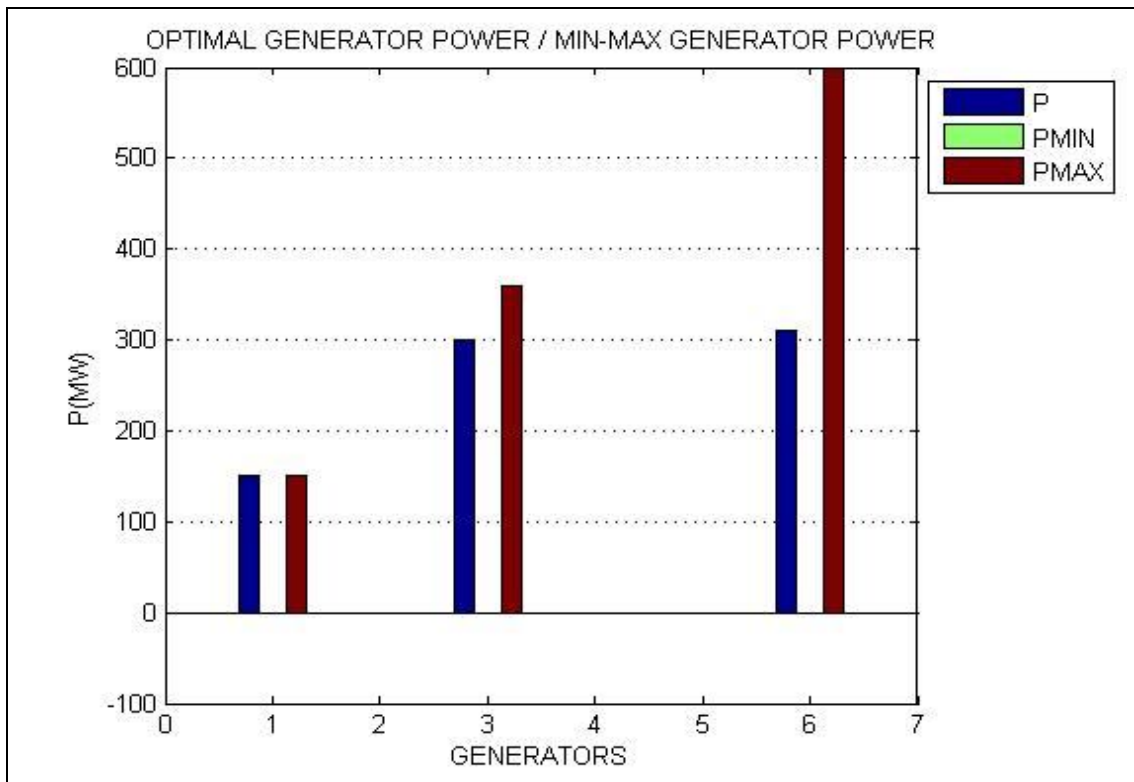
Σχήμα 5.23 : STATISTICS, Διάγραμμα 4 (figure4) για case2-treksimo2



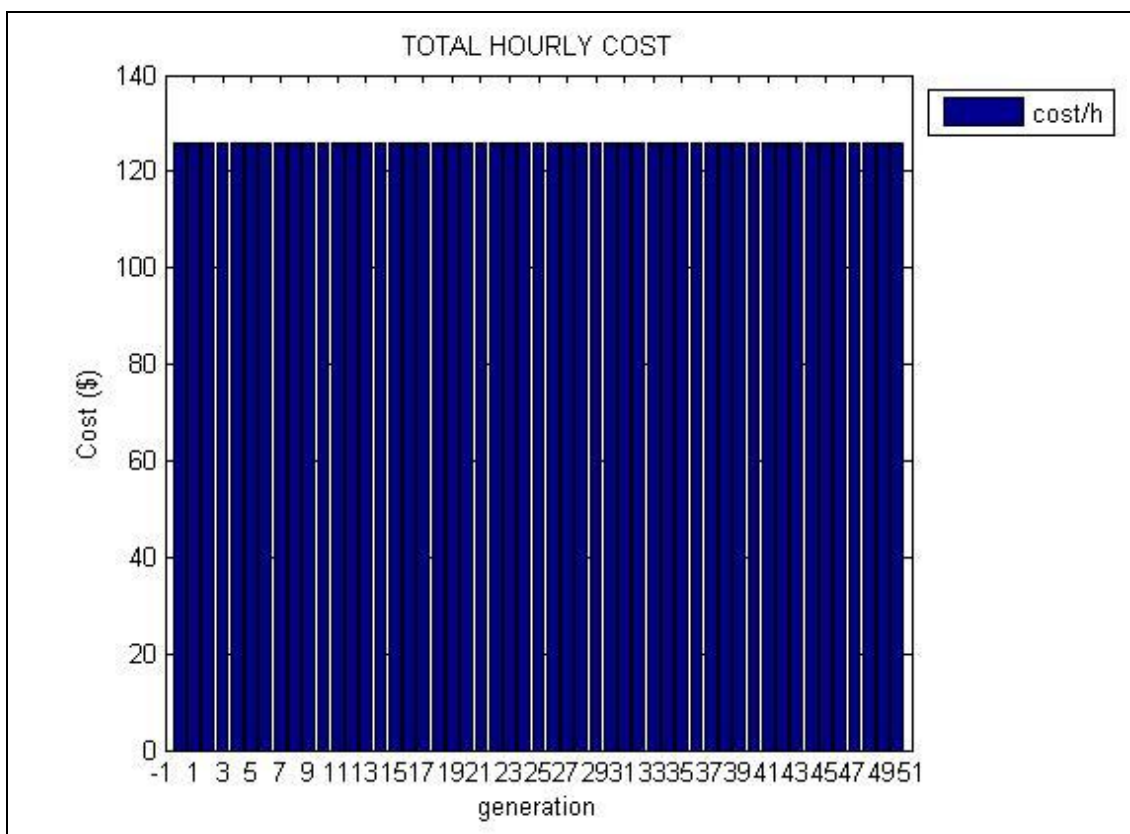
Σχήμα 5.24 : OPTIMAL MAXIMUM LINE POWER FLOW/LINE CAPACITY, Διάγραμμα 5 (figure5) για case2-treksimo2



Σχήμα 5.25 : OPTIMAL LINE POWER FLOW, Διάγραμμα 6 (figure6) για case2-treksimo2



Σχήμα 5.26 : OPTIMAL GENERATOR POWER/MIN-MAX GENERATOR POWER
Διάγραμμα 7 (figure7) για case2-treksimo2



Σχήμα 5.27 : TOTAL HOURLY COST, Διάγραμμα 8 (figure8) για case2-treksimo2

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από το Σχήμα 5.21 προκύπτει ότι εδώ οι εφικτές λύσεις σε κάθε γενιά είναι ως 8, το οποίο είναι λογικό καθώς δεν υπάρχουν οι περιορισμοί για τα κάτω όρια, που μειώνουν το πλήθος των εφικτών λύσεων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.20 οι λύσεις κυμαίνονται στις περιοχές της αντικειμενικής 125-130 και 147-153.

Στο Σχήμα 5.22 φαίνεται ότι το βέλτιστο επιτυγχάνεται στην 1^η γενιά.

Στο Σχήμα 5.24 βλέπουμε ότι βέλτιστες ικανότητες μεταφοράς των νέων γραμμών είναι περίπου στα μισά των ορίων τους (capacities) εκτός από τις 2 γραμμές που συνδέουν το ζυγό 3 και τον 5, όπου οι βέλτιστες ικανότητες είναι ίσες με τα όρια.

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 5.25, η παραγωγή των γεννητριών είναι για τις 1 και 3 γεννήτριες λίγο κάτω από το μέγιστο και για την 6 περίπου στο μισό του μέγιστου. Έτσι η μελλοντική γεννήτρια παράγει ισχύ στο μισό της μέγιστης αφού δεν υπάρχει ο περιορισμός για παραγωγή άνω των 545MW.

Για το treskimo3nvars12, όπου έχουμε 12 υποψήφιες γραμμές τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.24.

Πίνακας 5.24: Αποτελέσματα για το Case 2- treksimo3nvars12

Case 2— treksimo3nvars12— results.xls												
Υποψήφιες νέες γραμμές	1-5	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-5	4-6	4-6	4-6	3-6	3-6
Βέλτιστη λύση (best chrome)	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)			125.8402283			Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)			1102360.4			
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)		Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)		Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)		Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)			
1-2	7.5	100	7.5		150		0		150			
1-4	5	80	5		0		0		0			
1-5	28.75	100	28.75		300		0		360			
2-3	77.5	100	-77.5		0		0		0			
2-4	0	100	3.94E-30		0		0		0			
3-5	91.25	100	91.25		310		0		600			
1-5	28.75	100	28.75									
2-6	77.5	100	-77.5									
2-6	77.5	100	-77.5									
3-5	91.25	100	91.25									
4-6	77.5	100	-77.5									
4-6	77.5	100	-77.5									
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)									235.141			
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)									3.919017			

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Εδώ το βέλτιστο δίκτυο προκύπτει αν προστεθούν συνολικά 6 γραμμές: 1 γραμμή μεταξύ 1 και 5, 2 γραμμές μεταξύ του ζυγού 6 και του ζυγού 2, 2 γραμμές μεταξύ του 6 και του 4 και 1 γραμμή μεταξύ 3 και 5. Ουσιαστικά η λύση είναι η λύση του 2^{ου} τρεξίματος αν αφαιρεθούν μια γραμμή 2-6 και μια 4-6.

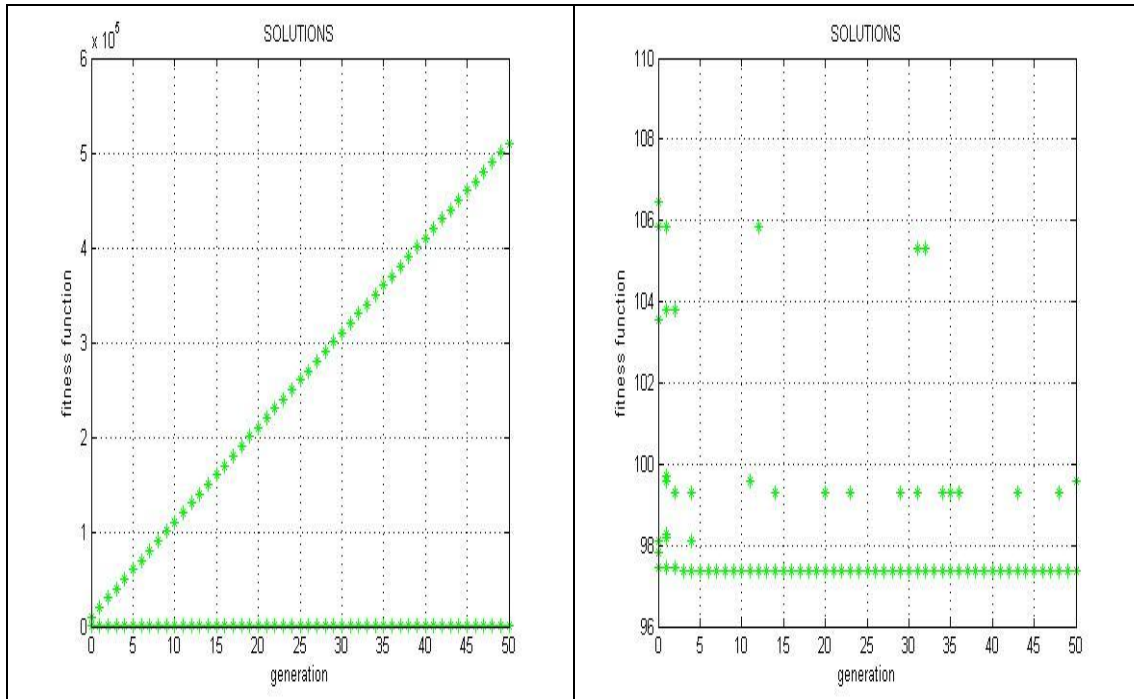
Παρόλο που έχουν αφαιρεθεί 2 γραμμές σε σύγκριση με τη λύση του 2^{ου} τρεξίματος, το δίκτυο αυτό έχει ίδια τιμή για την αντικειμενική με το treksimo2. Αυτό οφείλεται στο ότι έχει αυξηθεί το φορτίο των εναπομείναντων γραμμών, δηλ. οι βέλτιστες ικανότητες μεταφοράς πλησιάζουν τα $\frac{3}{4}$ του capacity των γραμμών.

Για το treskimonew, όπου έχουμε στο ζυγό 6 συντελεστή κόστους το μισό σε σχέση με τους ζυγούς 1,3. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.25.

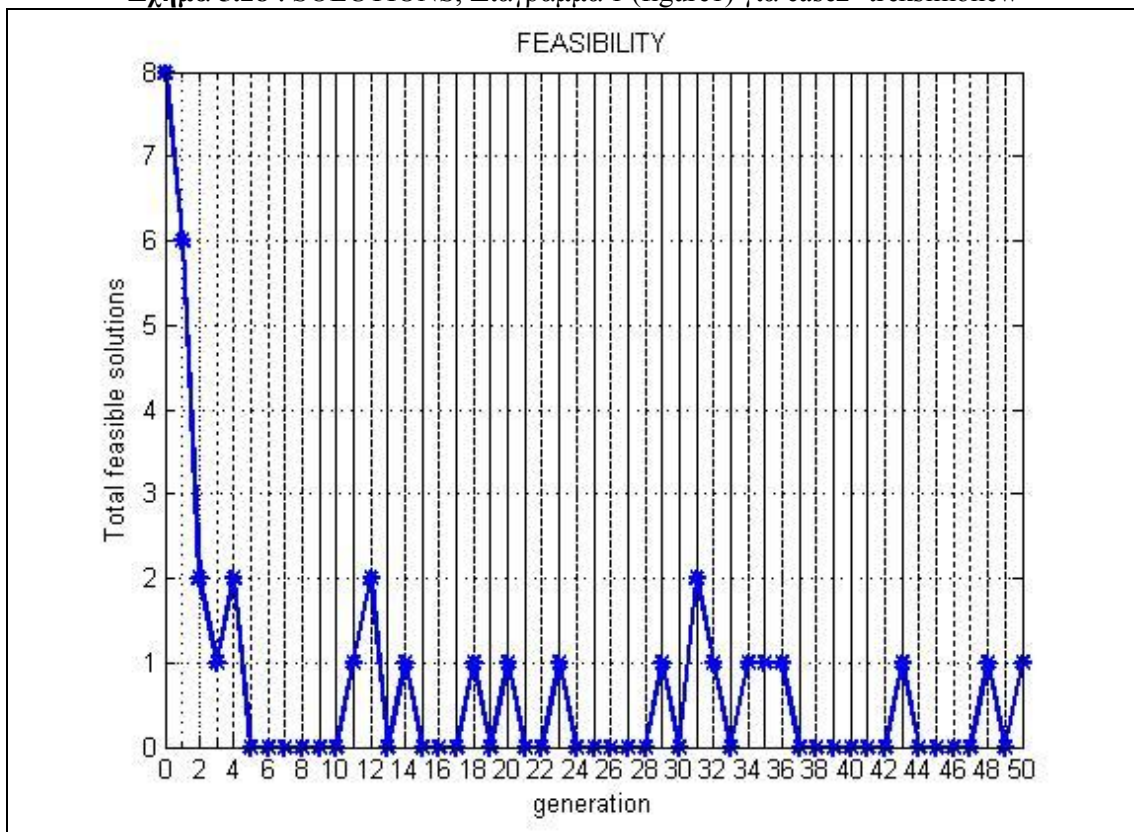
Πίνακας 5.25: Αποτελέσματα για το Case 2- treksimonew

Case 2— treksimonew— results.xls										
Υποψήφιες νέες γραμμές	1-5	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-5	4-6	4-6	4-6
Βέλτιστη λύση (best chrome)	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)		97.37525495			Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)			853007.2333		
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)	Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)	Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)				
1-2	3.333333	100	-3.333333	150	0	150				
1-4	2.222222	80	-2.222222	0	0	0				
1-5	75.55556	100	75.55556	204.4444	0	360				
2-3	1.14E-15	100	-3.8E-16	0	0	0				
2-4	1.79E-14	100	-1.7E-14	0	0	0				
3-5	82.22222	100	82.22222	405.5556	0	600				
2-6	81.11111	100	-81.1111							
2-6	81.11111	100	-81.1111							
2-6	81.11111	100	-81.1111							
3-5	82.22222	100	82.22222							
4-6	81.11111	100	-81.1111							
4-6	81.11111	100	-81.1111							
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)								211.657		
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)								3.527617		

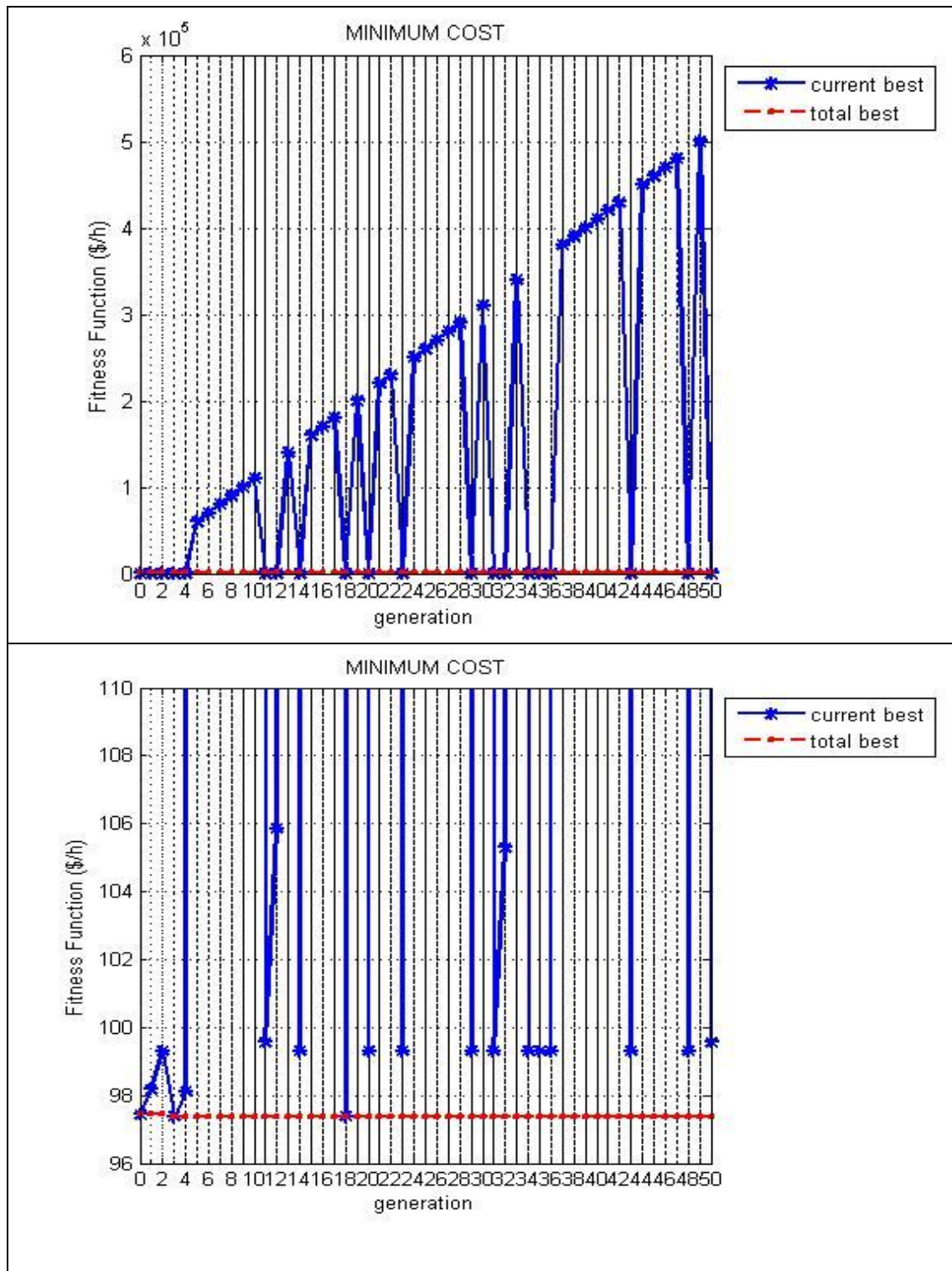
Αναλυτικά η πορεία του αλγορίθμου και τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.28 – 5.35



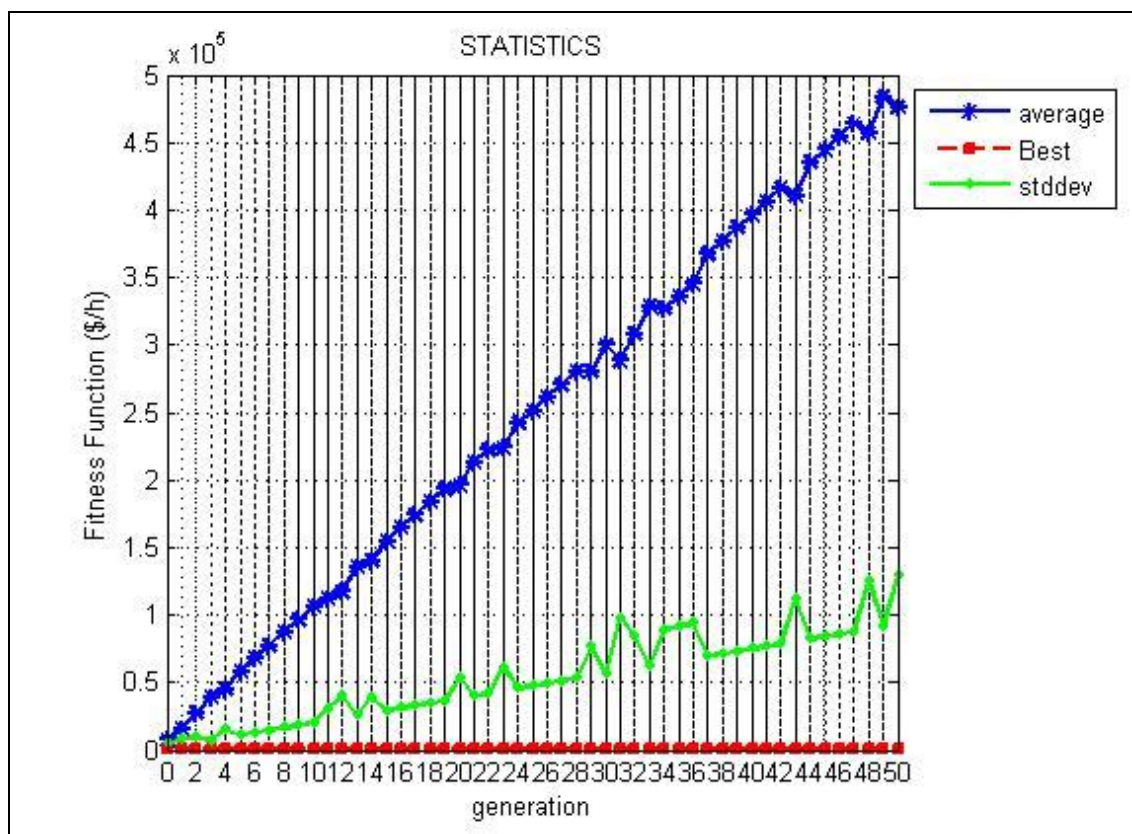
Σχήμα 5.28 : SOLUTIONS, Διάγραμμα 1 (figure1) για case2- treksimonew



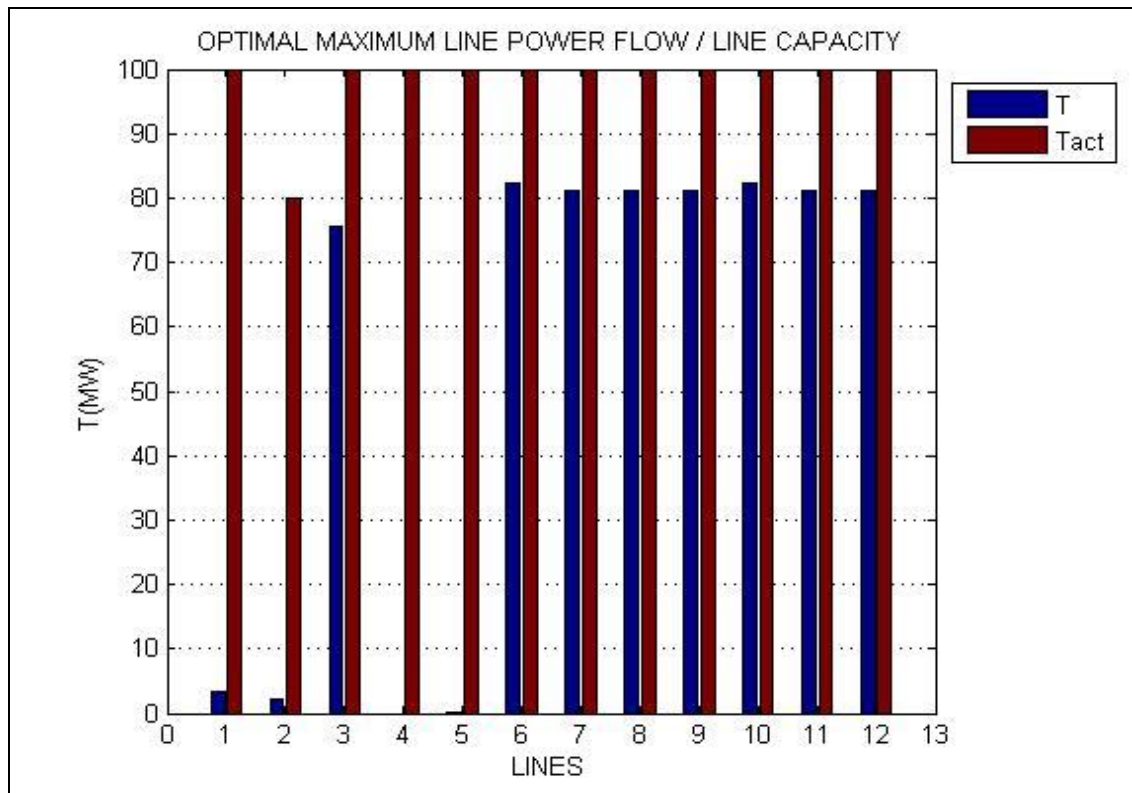
Σχήμα 5.29 : FEASIBILITY, Διάγραμμα 2 (figure2) για case2-treksimonew



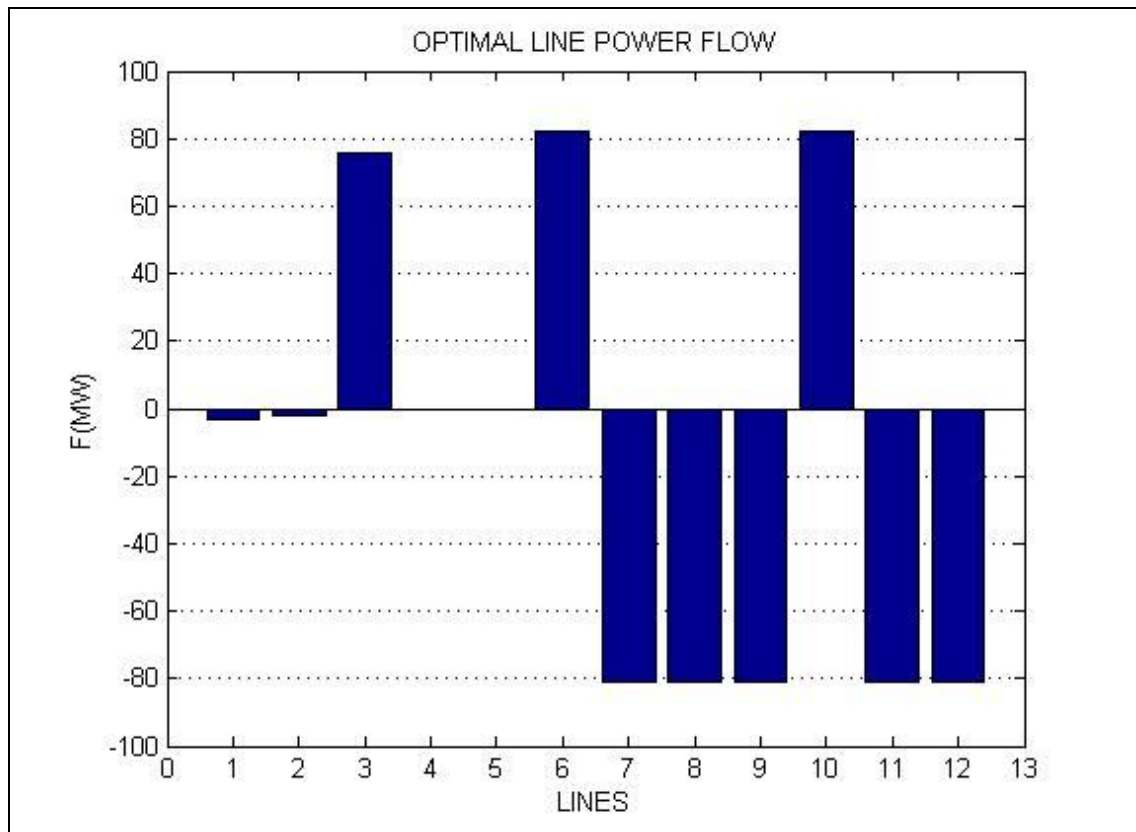
Σχήμα 5.30 : MINIMUM COST, Διάγραμμα 3 (figure3) για case2-treksimonev



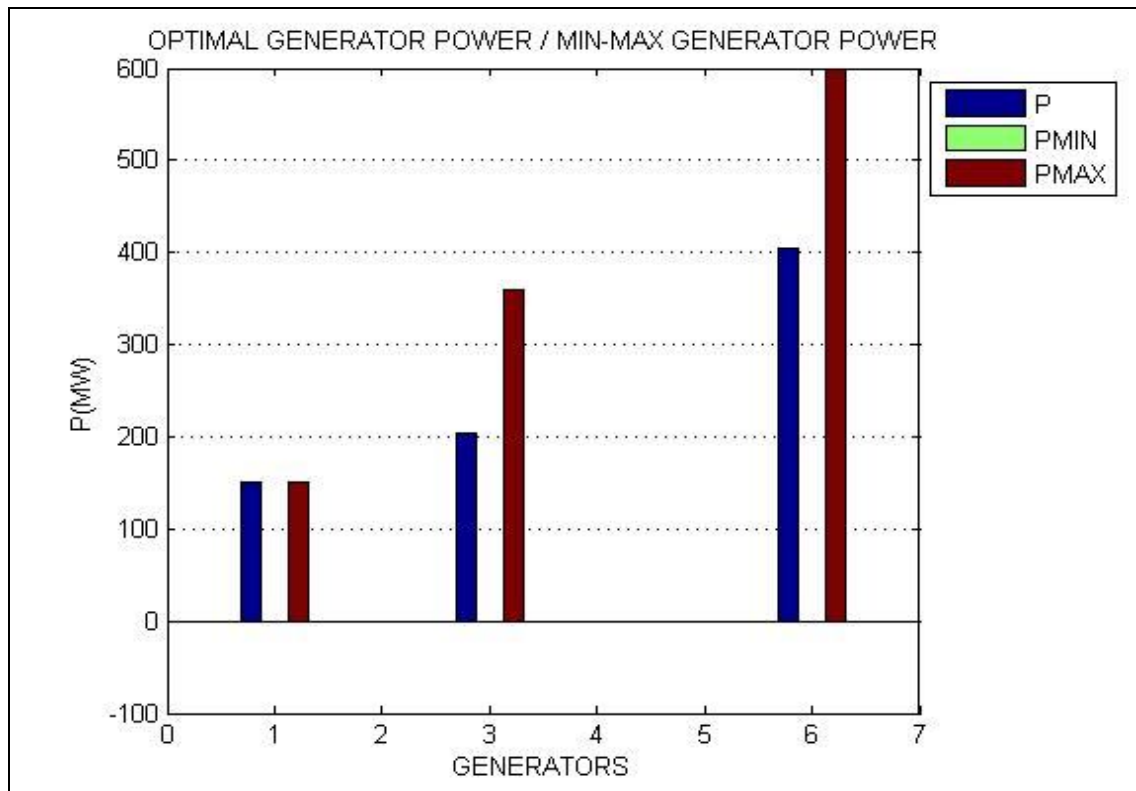
Σχήμα 5.31 : STATISTICS, Διάγραμμα 4 (figure4) για case2-treksimonew



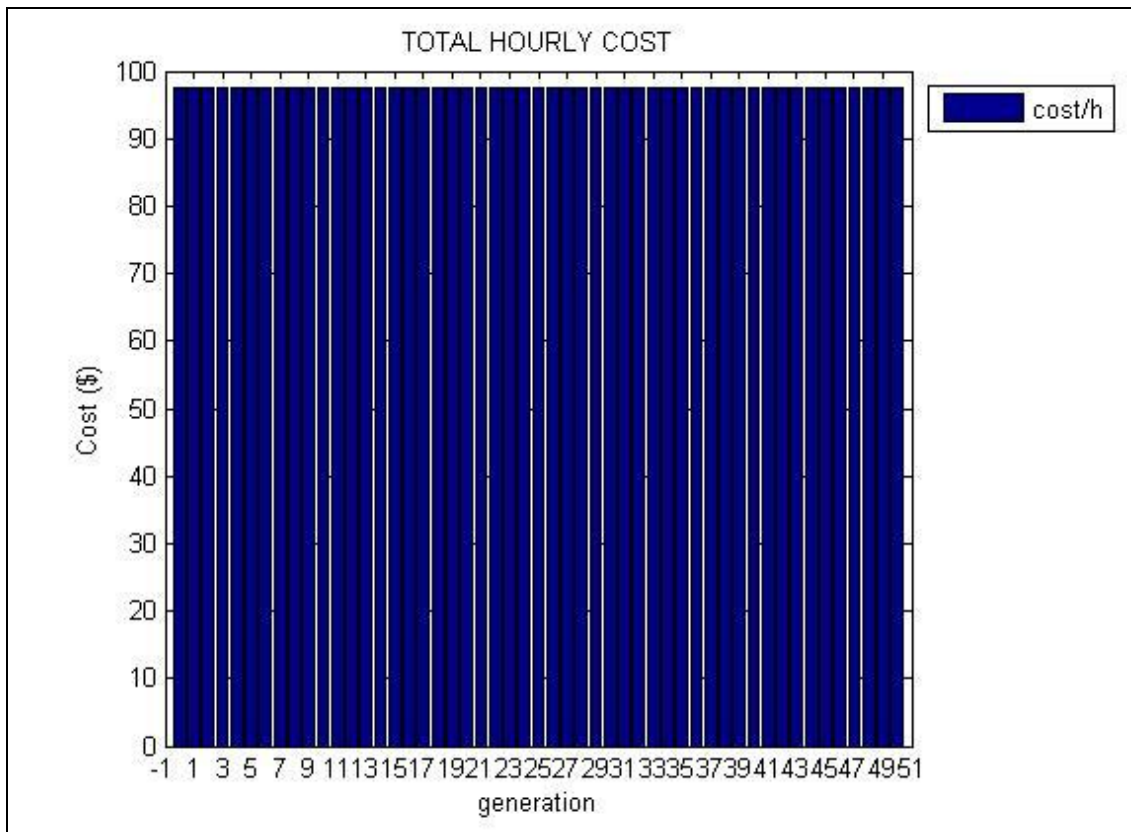
Σχήμα 5.32 : OPTIMAL MAXIMUM LINE POWER FLOW/LINE CAPACITY, Διάγραμμα 5 (figure5) για case2-treksimonew



Σχήμα 5.33 : OPTIMAL LINE POWER FLOW, Διάγραμμα 6 (figure6) για case2-treksimonew



Σχήμα 5.34 : OPTIMAL GENERATOR POWER/MIN-MAX GENERATOR POWER
Διάγραμμα 7 (figure7) για case2-treksimonew



Σχήμα 5.35 : TOTAL HOURLY COST, Διάγραμμα 8 (figure8) για case2-treksimonew

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Συγκρίνοντας με το treskimo2 όπου οι συντελεστές κόστους για κάθε γεννήτρια είναι οι ίδιοι παρατηρούμε τα εξής:

Το βέλτιστο δίκτυο προκύπτει αν προστεθούν συνολικά 6 γραμμές: 3 γραμμές μεταξύ του ζυγού 6 και του ζυγού 2, 2 γραμμές μεταξύ του 6 και του 4 και 1 γραμμή μεταξύ 3 και 5, δηλ. 2 λιγότερες από το 2^ο τρέξιμο.

Από το Σχήμα 5.28 προκύπτει ότι εδώ οι εφικτές λύσεις σε κάθε γενιά είναι λιγότερες (μέγιστο τις 2).

Στο Σχήμα 5.32 βλέπουμε ότι βέλτιστες ικανότητες μεταφοράς των νέων γραμμών είναι αυξημένες σε σχέση με το 2^ο τρέξιμο, που δικαιολογείται λόγω του ότι προστέθηκαν 2 λιγότερες γραμμές σε σχέση με το 2^ο τρέξιμο.

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 5.34, η παραγωγή των γεννητριών είναι για τη γεννήτρια 1 ίδια με το 2^ο τρέξιμο (150MW), για την 3 γεννήτρια χαμηλότερη (γύρω στα 200MW ενώ πριν ήταν 300MW) και για την 6 υψηλότερη (400MW ενώ πριν 300MW). Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της μείωσης του συντελεστή κόστους της γεννήτριας 6, οπότε οι λύσεις κατευθύνονται προς τα εκεί που μειώνεται το κόστος.

Τέλος έχουμε και μείωση του συνολικού κόστους στα 97\$/h σε σχέση με τα 125\$/h του 2^{ου} τρεξίματος.

5.2.3.3 Υποπερίπτωση 3

Τα αποτελέσματα του προγράμματος για το **case3** αποθηκεύονται στον αντίστοιχο φάκελο (case3) στο αρχείο **results.xls**.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το treksimolmax του case3 φαίνονται στον Πίνακα 5.26.

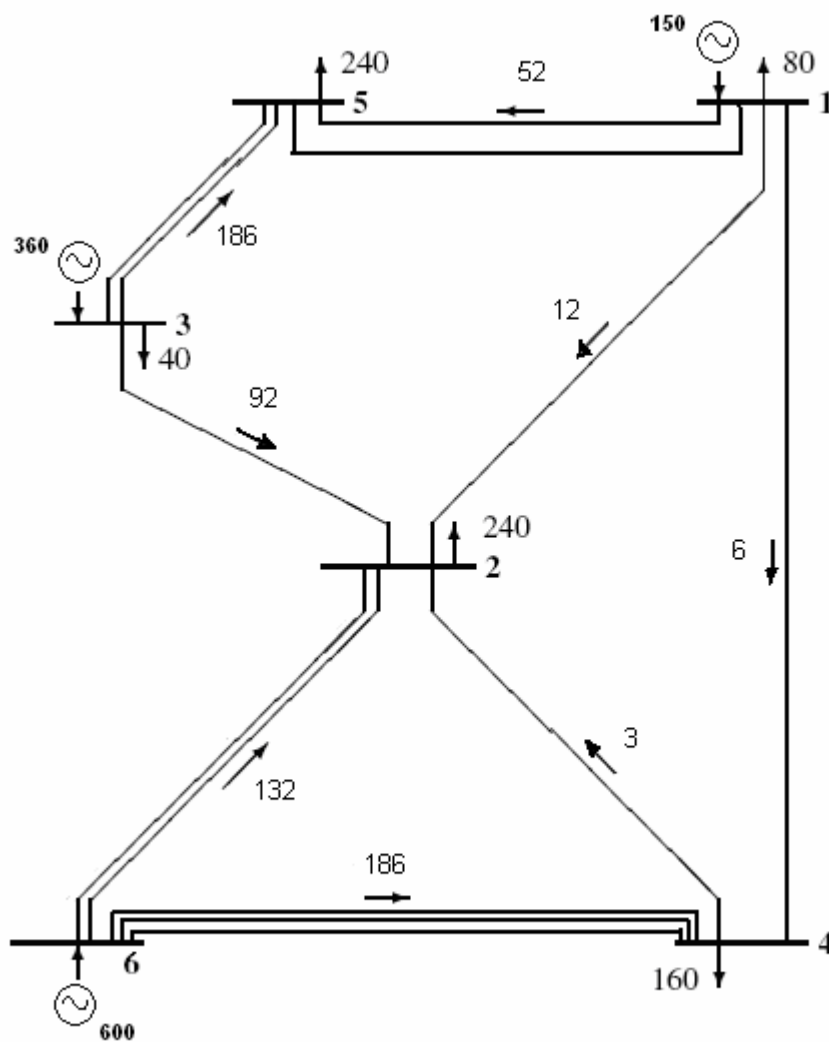
Για το treksimolnvars12 τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια, δηλ. ο αλγόριθμος βρίσκει την ίδια βέλτιστη λύση.

Στο case3, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.2.1.3, έχουμε συνολική ζήτηση ίση με το μέγιστη συνολική παραγωγή των γεννητριών δηλ. ίση με 1110MW.

Πίνακας 5.26: Αποτελέσματα για το Case 3- treksimolmax,

Case 3— treksimo1max										
Υποψήφιες νέες γραμμές	1-5	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-5	4-6	4-6	4-6
Βέλτιστη λύση (best chrome)	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)		207.4515444		Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)				1817275.529		
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)	Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)	Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)				
1-2	12.01613	100	12.01613	150	0	150				
1-4	5.967742	80	5.967742	0	0	0				
1-5	26.00806	100	26.00806	360	0	360				
2-3	92.01613	100	-92.0161	0	0	0				
2-4	3.064516	100	-3.06452	0	0	0				
3-5	93.99194	100	93.99194	600	0	600				
1-5	26.00806	100	26.00806							
2-6	66.45161	100	-66.4516							
2-6	66.45161	100	-66.4516							
3-5	93.99194	100	93.99194							
4-6	62.36559	100	-62.3656							
4-6	62.36559	100	-62.3656							
4-6	62.36559	100	-62.3656							
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)					220.39					
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)					3.674217					

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι το βέλτιστο δίκτυο που προκύπτει για την περίπτωση αυτή είναι αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.36

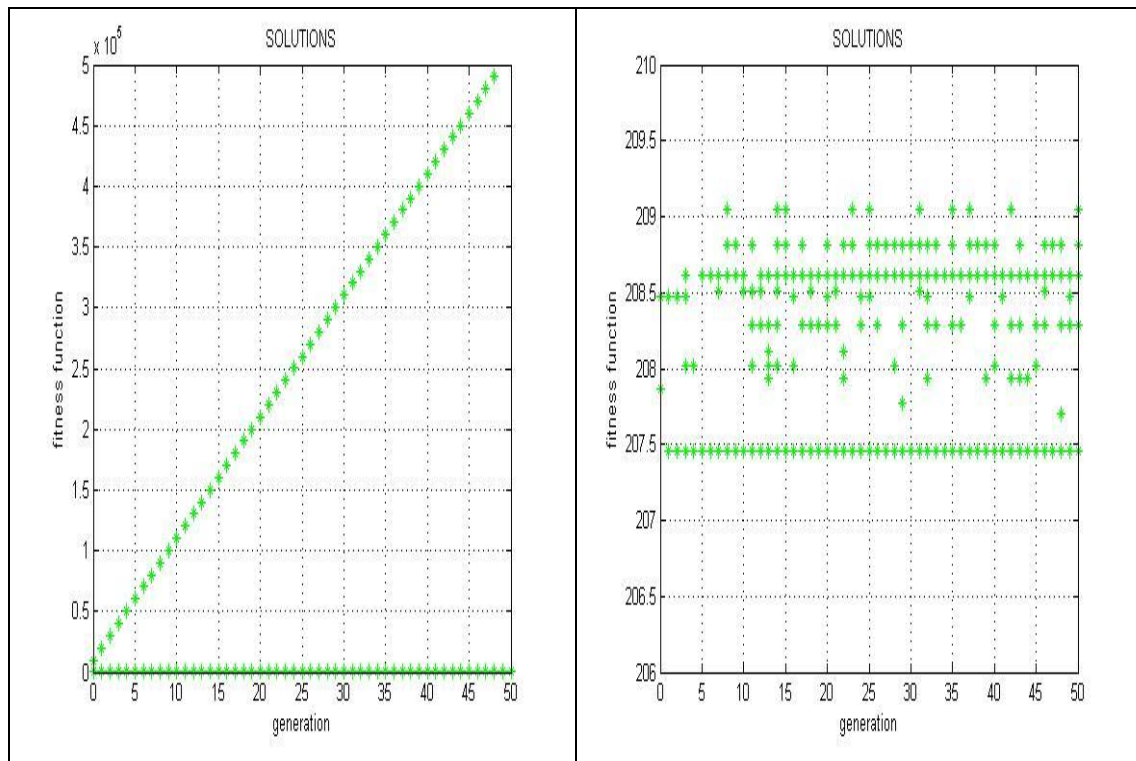


Σχήμα 5.36: Βέλτιστο δίκτυο Garver 6 ζυγών για το case3-treskimo1max

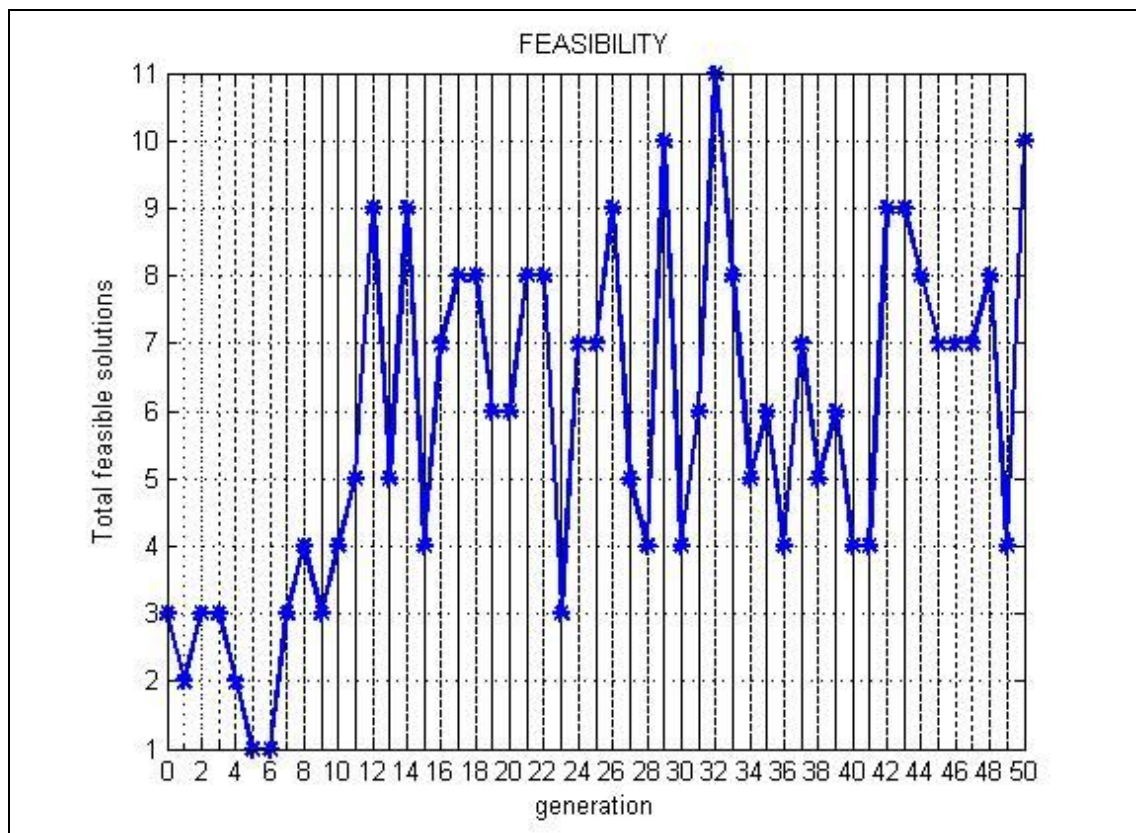
Όπως παρατηρούμε και από την εικόνα το βέλτιστο δίκτυο προκύπτει αν προστεθεί 1 γραμμή μεταξύ 1 και 5, 2 γραμμές μεταξύ του ζυγού 6 και του ζυγού 2, 3 γραμμές μεταξύ του 6 και του 4 και 1 γραμμή μεταξύ 3 και 5.

Όπως προκύπτει και από τα αποτελέσματα, το δίκτυο αυτό όντως έχει μέγιστη παραγωγή, δηλ. οι γεννήτριες δουλεύουν στα όρια τους, έτσι ώστε να ικανοποιηθεί η αυξημένη ζήτηση.

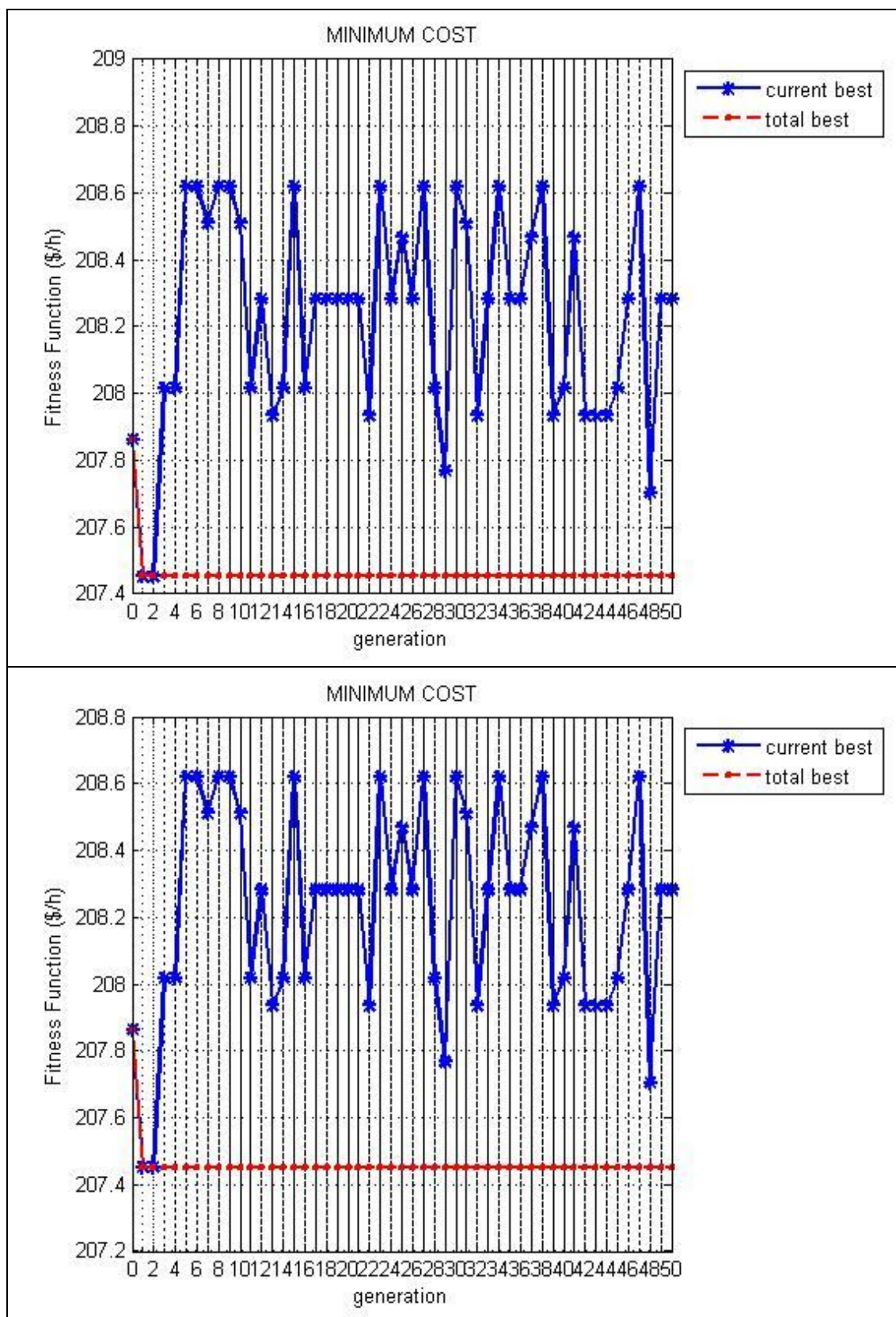
Αναλυτικά η πορεία του αλγορίθμου και τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.37 – 5.44



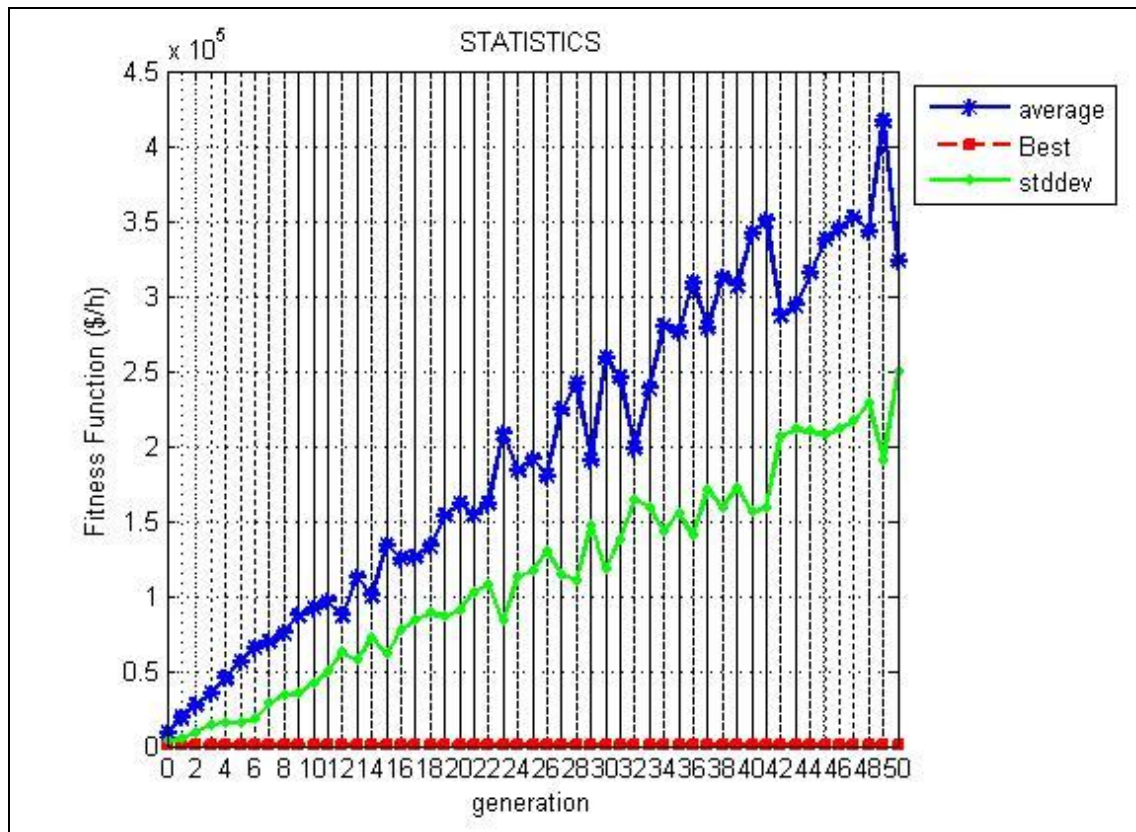
Σχήμα 5.37 : SOLUTIONS, Διάγραμμα 1 (figure1) για case3- treksimo1max



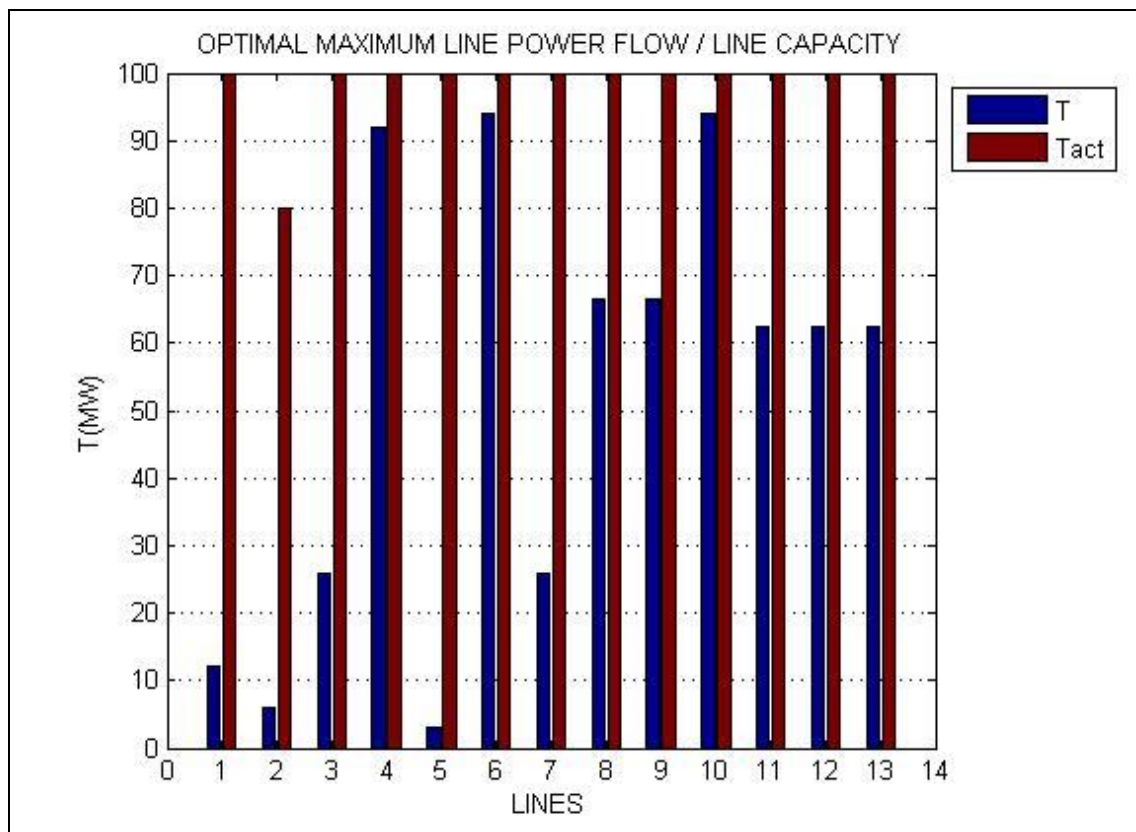
Σχήμα 5.38 : FEASIBILITY, Διάγραμμα 2 (figure2) για case3-treksimo1max



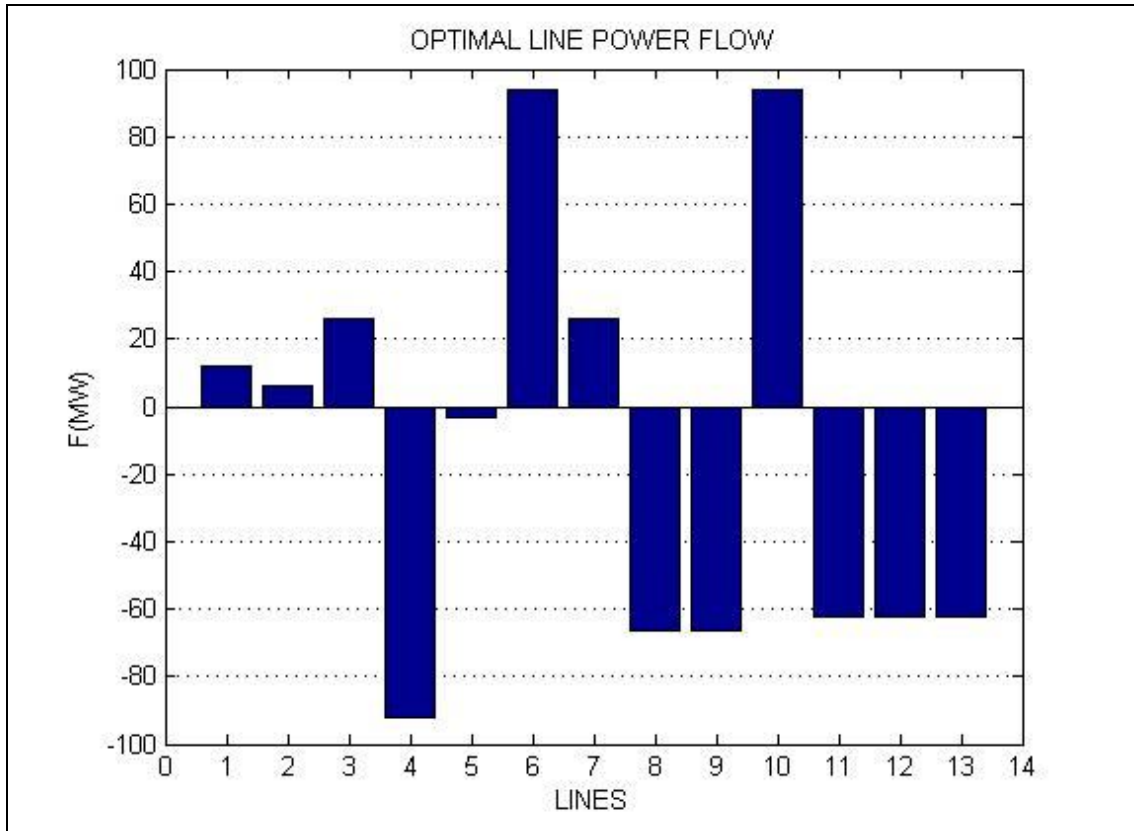
Σχήμα 5.39 : MINIMUM COST, Διάγραμμα 3 (figure3) για case3-treksimolmax



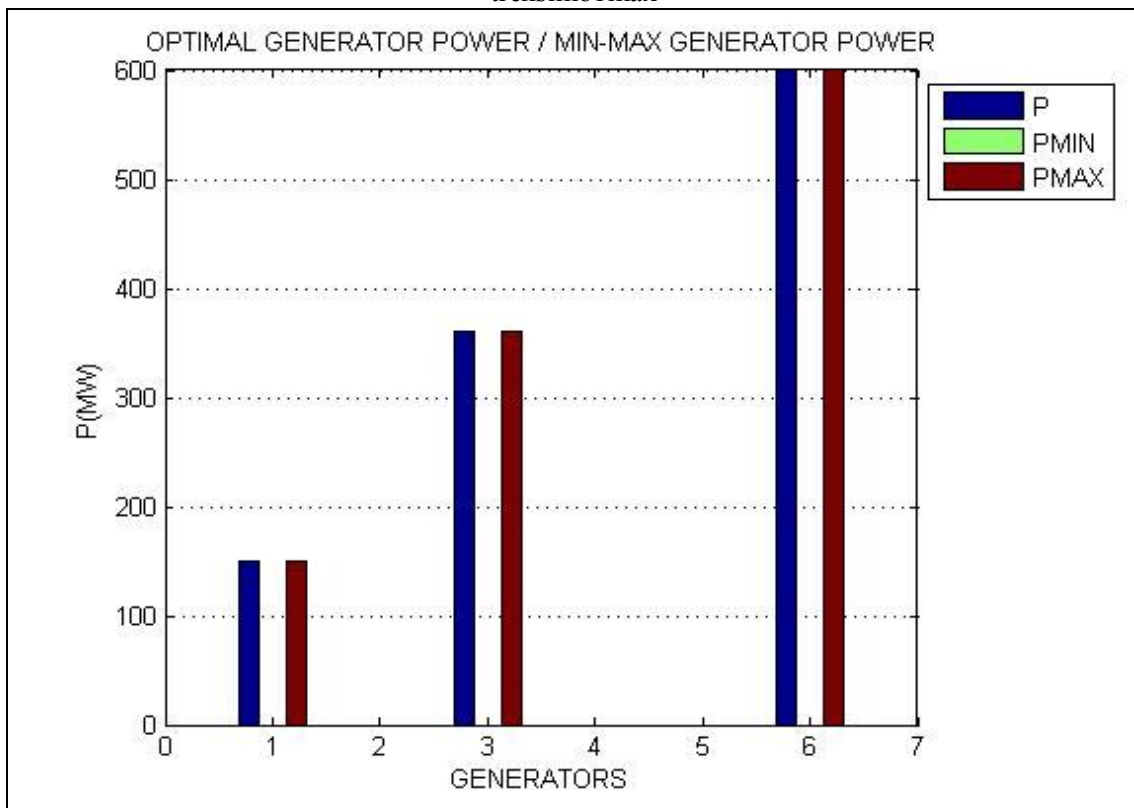
Σχήμα 5.40 : STATISTICS, Διάγραμμα 4 (figure4) για case3-treksimolmax



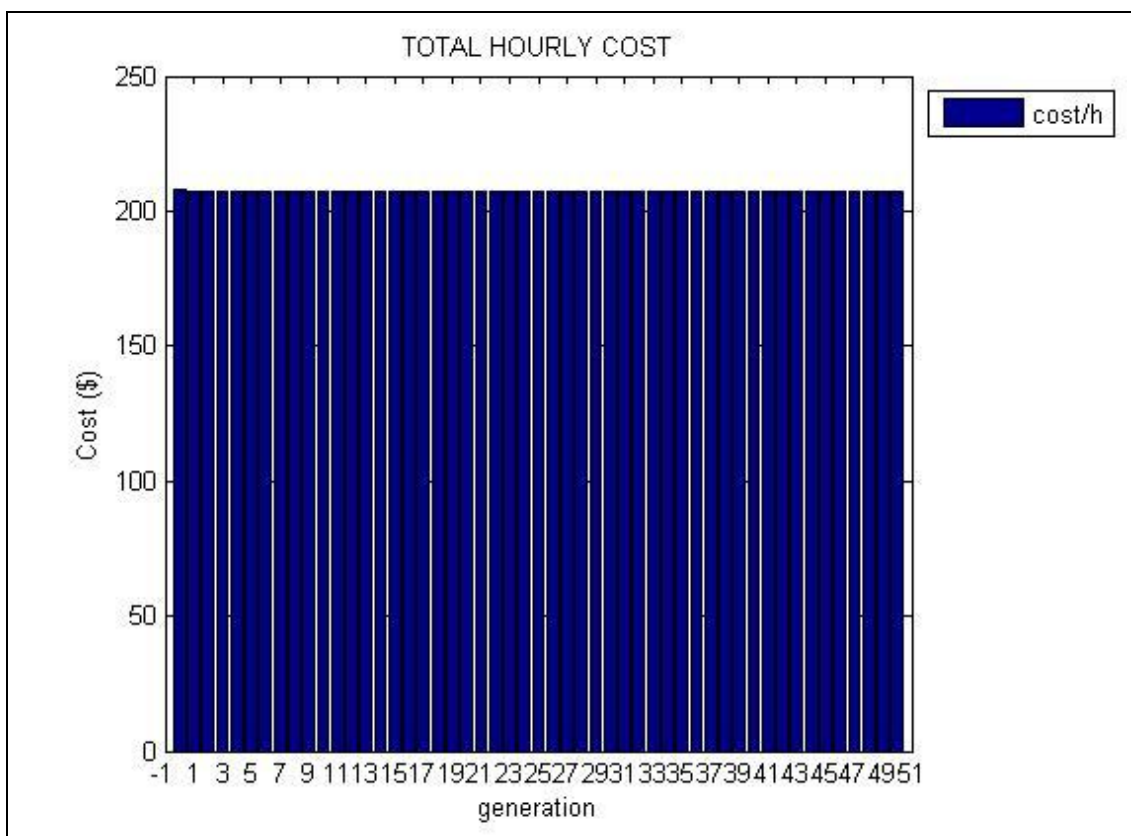
Σχήμα 5.41 : OPTIMAL MAXIMUM LINE POWER FLOW/LINE CAPACITY, Διάγραμμα 5 (figure5) για case3-treksimolmax



Σχήμα 5.42 : OPTIMAL LINE POWER FLOW, Διάγραμμα 6 (figure6) για case3-treksimo1max



Σχήμα 5.43 : OPTIMAL GENERATOR POWER/MIN-MAX GENERATOR POWER
Διάγραμμα 7 (figure7) για case3-treksimo1max



Σχήμα 5.44 : TOTAL HOURLY COST, Διάγραμμα 8 (figure8) για case3-treksimo1max

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.37 οι λύσεις κυμαίνονται στις περιοχές της αντικειμενικής 207-209.5 \$/h.

Από το Σχήμα 5.38 προκύπτει ότι εδώ οι εφικτές λύσεις σε κάθε γενιά είναι ως 11.

Στο Σχήμα 5.39 φαίνεται ότι το βέλτιστο επιτυγχάνεται στην 1^η γενιά.

Στο Σχήμα 5.41 βλέπουμε ότι βέλτιστες ικανότητες μεταφοράς των νέων γραμμών κυμαίνονται σε λογικά όρια αν πάρουμε υπόψη το αυξημένο φορτίο και το ότι οι γεννήτριες δουλεύουν στα όρια τους.

Όπως παρατηρούμε και από το Σχήμα 5.43, η παραγωγή των γεννητριών είναι η μέγιστη, ίση με το άνω όριο για κάθε γεννήτρια, όπως ήταν αναμενόμενο.

Για το treskimo2max, όπου έχουμε πάλι ζήτηση ίση με τη μέγιστη παραγωγή των γεννητριών αλλά διαφορετικά κατανομημένη στους ζυγούς, τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.27.

Πίνακας 5.27: Αποτελέσματα για το Case 3- treksimo2max

Case 3— treksimo2max										
Υποψήφιες νέες γραμμές	1-5	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-5	4-6	4-6	4-6
Βέλτιστη λύση (best chrome)	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h cost)		206.0798402		Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y cost)				1805259.4		
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)	Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)	Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)		Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)			
1-2	6.58E-14	100	-1.3E-14	150	0		150			
1-4	6.76E-14	80	-3.9E-15	0	0		0			
1-5	20	100	20	360	0		360			
2-3	80	100	-80	0	0		0			
2-4	6.76E-14	100	-2E-14	0	0		0			
3-5	100	100	100	600	0		600			
1-5	20	100	20							
2-6	80	100	-80							
2-6	80	100	-80							
3-5	100	100	100							
4-6	80	100	-80							
4-6	80	100	-80							
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)								221.531		
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)								3.69245		

Εδώ το βέλτιστο δίκτυο προκύπτει αν προστεθεί 1 γραμμή μεταξύ 1 και 5, 2 γραμμές μεταξύ του ζυγού 6 και του ζυγού 2, 2 γραμμές μεταξύ του 6 και του 4 και 1 γραμμή μεταξύ 3 και 5, δηλ. 1 γραμμή 4-6 λιγότερη σε σχέση με το προηγούμενο τρέξιμο. Η αντικειμενική είναι λίγο καλύτερη εδώ, τα επίπεδα των ικανοτήτων μεταφοράς είναι λίγο πιο αυξημένα και οι γεννήτριες δουλεύουν στα όρια τους όπως και στην προηγούμενη περίπτωση.

5.2.3.4 Υποπερίπτωση 4-3p

Τα αποτελέσματα του προγράμματος για το **case4-3p** αποθηκεύονται στον αντίστοιχο φάκελο (case4-3p) στο αρχείο **results3p.xls**.

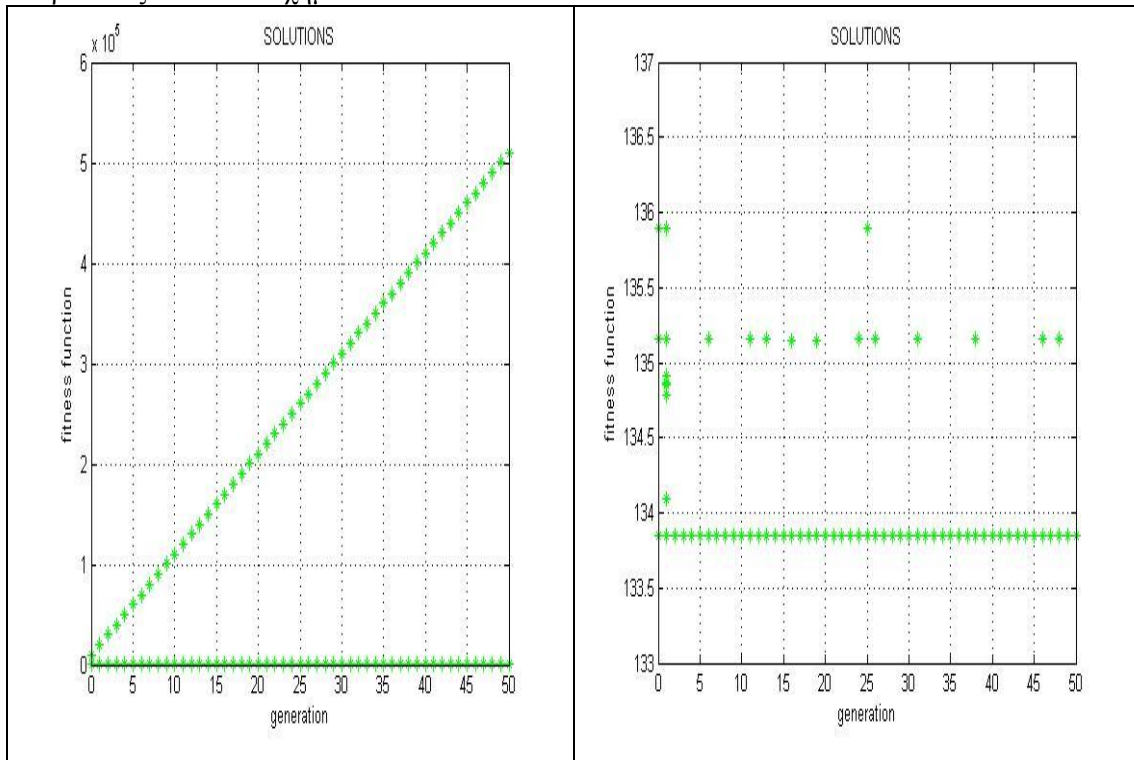
Στο case4-3p, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.2.1.4, έχουμε 3 χρονικές περιόδους ζήτησης, όπου στην 1^η περίοδο η ζήτηση είναι η ίδια με το case2, στη 2^η περίοδο η ζήτηση είναι ίση με το case3-treksimo1 (ίση με τη μέγιστη συνολική παραγωγή) και στην 3^η περίοδο όπως στην πρώτη περίοδο με επιπλέον ζήτηση 280MW στο ζυγό 6.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 5.28.

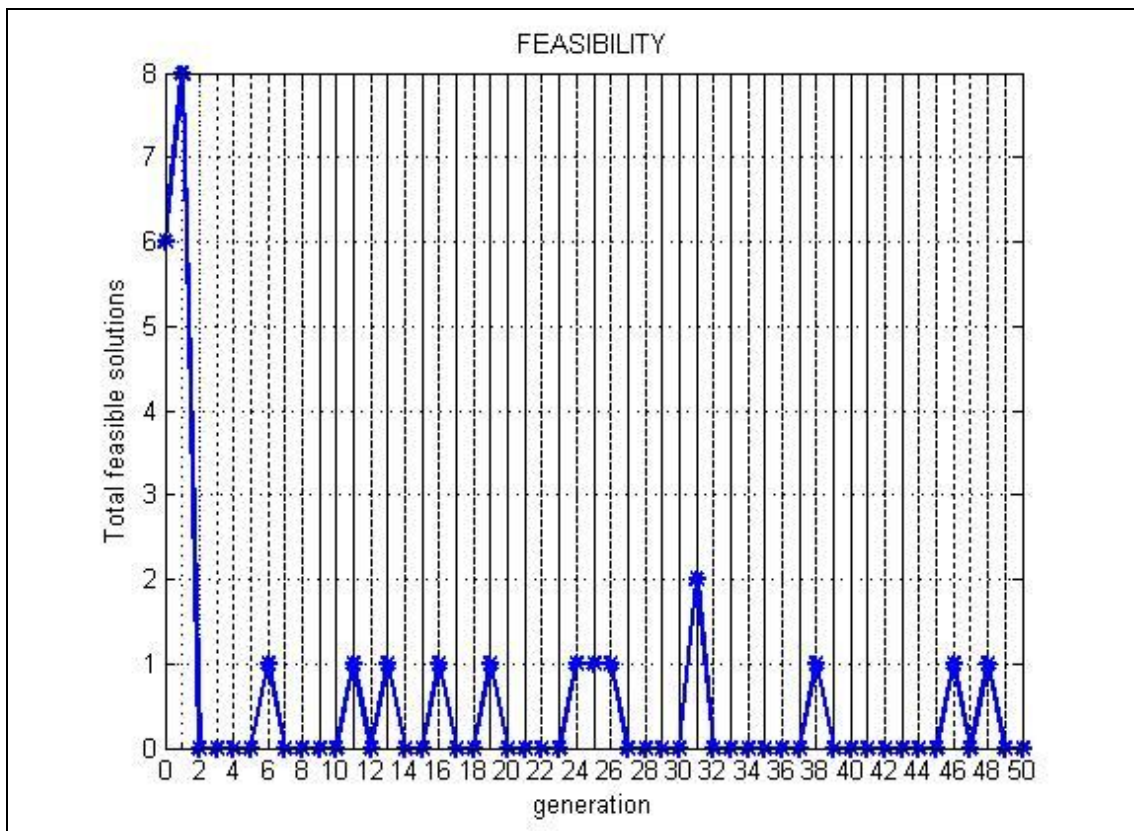
Πίνακας 5.28: Αποτελέσματα για το Case 4-3p- treksimol

Case 4-3p — treksimol										
Υποψήφιες νέες γραμμές	1-5	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-5	4-6	4-6	4-6
Βέλτιστη λύση (best_chrome)	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)		133.8482				Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)			1172510	
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)			Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)			Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)
1-2	9.264706	100	5.955882	9.264706	5.955882	150	150	150	0	150
1-4	11.47059	80	3.088235	11.47059	3.088235	0	0	0	0	0
1-5	30.47794	100	30.47794	24.63235	30.47794	290	360	290	0	360
2-3	89.26471	100	-70.9559	-89.2647	-70.9559	0	0	0	0	0
2-4	7.941176	100	-1.32353	7.941176	-1.32353	0	0	0	0	0
3-5	95.36765	100	89.52206	95.36765	89.52206	320	600	600	0	600
1-5	30.47794	100	30.47794	24.63235	30.47794					
2-6	80.88235	100	-80.8824	-74.7059	-80.8824					
2-6	80.88235	100	-80.8824	-74.7059	-80.8824					
3-5	95.36765	100	89.52206	95.36765	89.52206					
4-6	85.29412	100	-79.1176	-85.2941	-79.1176					
4-6	85.29412	100	-79.1176	-85.2941	-79.1176					
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)					708.859					
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)					11.8151					

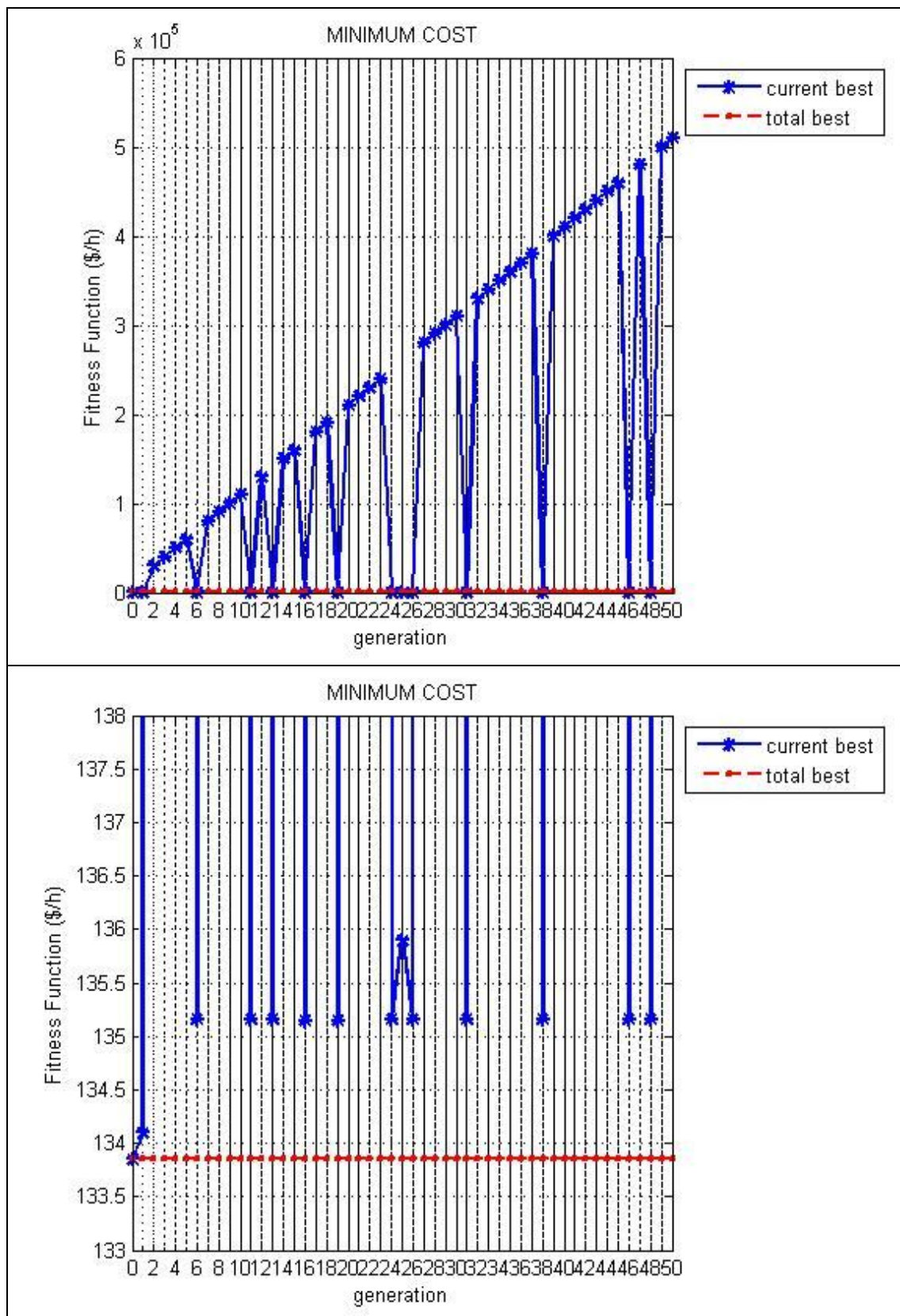
Το βέλτιστο δίκτυο εδώ προκύπτει αν προστεθεί 1 γραμμή μεταξύ 1 και 5, 2 γραμμές μεταξύ του ζυγού 6 και του ζυγού 2, 2 γραμμές μεταξύ του 6 και του 4 και 1 γραμμή μεταξύ 3 και 5. Αναλυτικά η πορεία του αλγορίθμου και τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.45 – 5.52



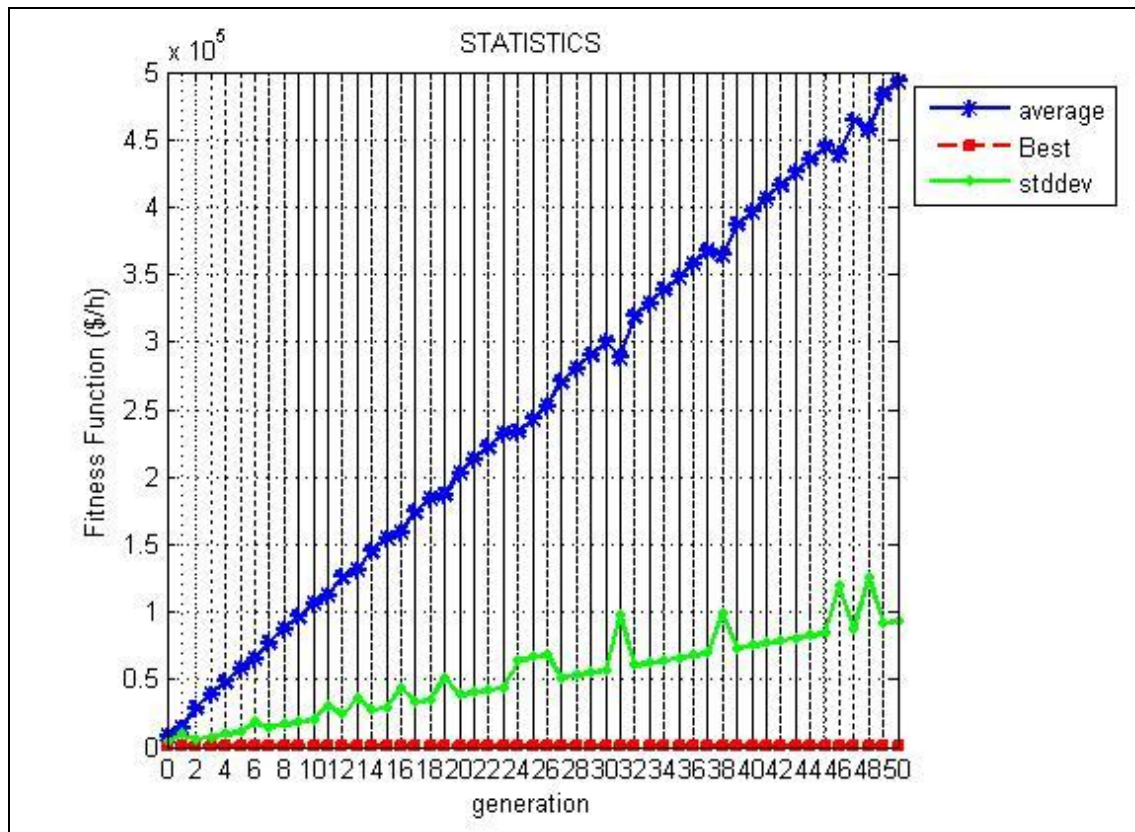
Σχήμα 5.45 : SOLUTIONS, Διάγραμμα 1 (figure1) για case4-3p - treksimol



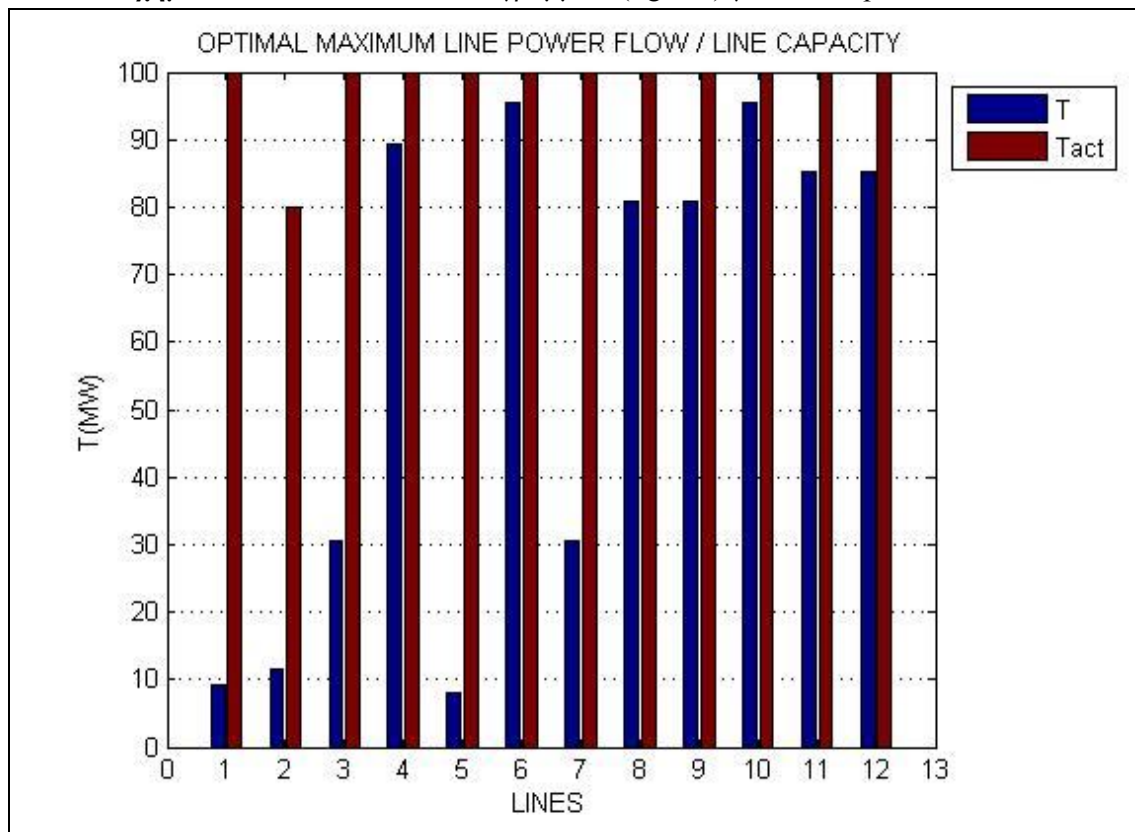
Σχήμα 5.46 : FEASIBILITY, Διάγραμμα 2 (figure2) για case4-3p – treksimol



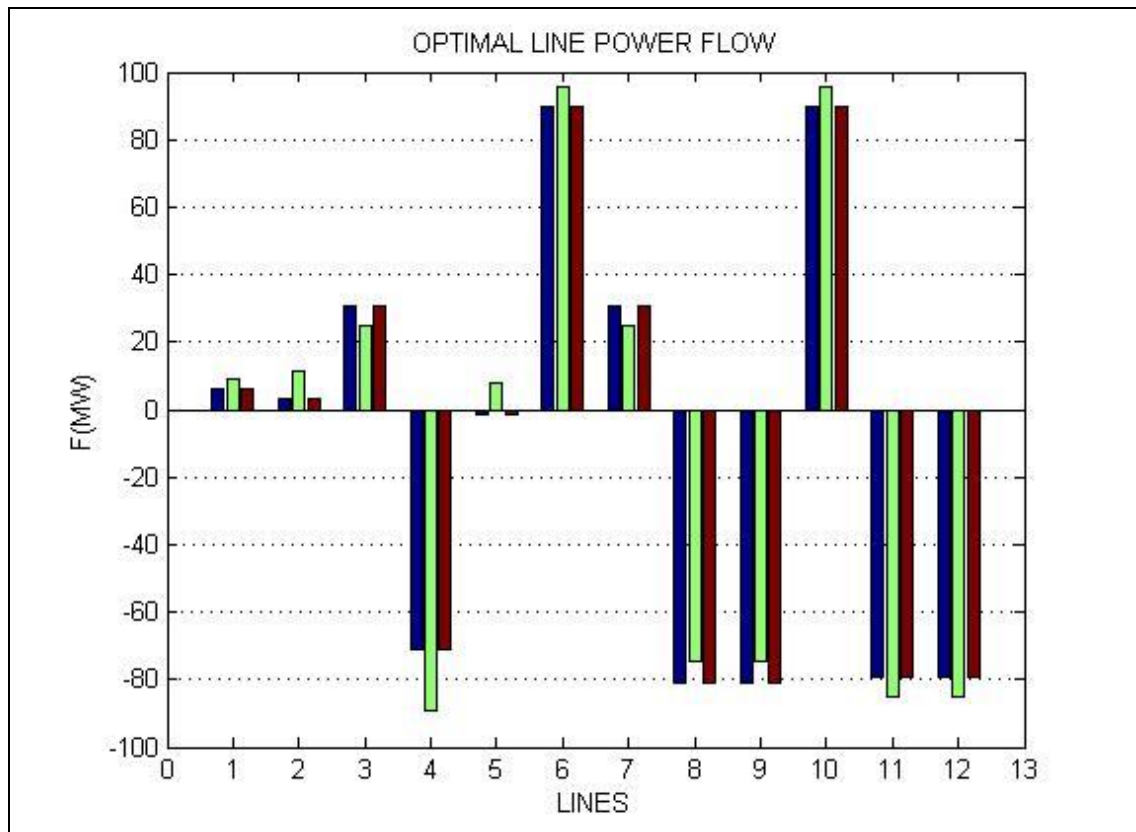
Σχήμα 5.47 : MINIMUM COST, Διάγραμμα 3 (figure3) για case4-3p - treksimo1



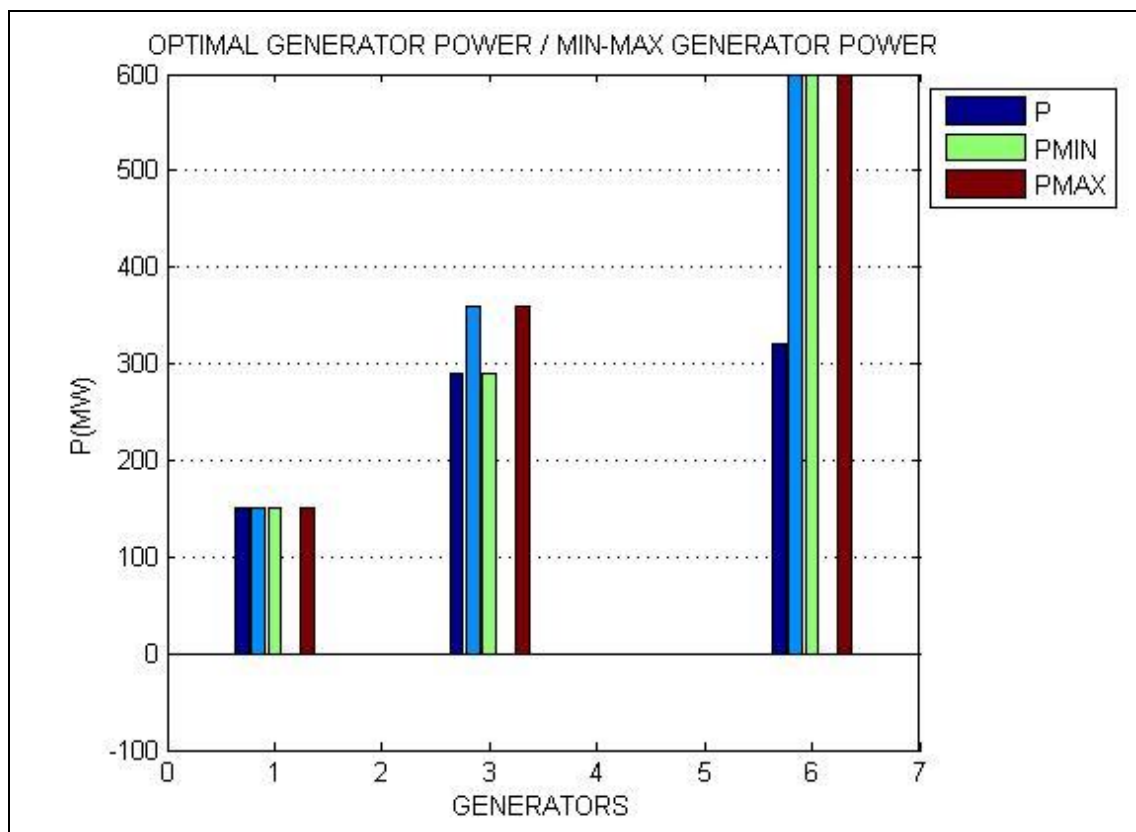
Σχήμα 5.48 : STATISTICS, Διάγραμμα 4 (figure4) για case4-3p - treksimol



Σχήμα 5.49 : OPTIMAL MAXIMUM LINE POWER FLOW/LINE CAPACITY, Διάγραμμα 5 (figure5) για case4-3p - treksimol

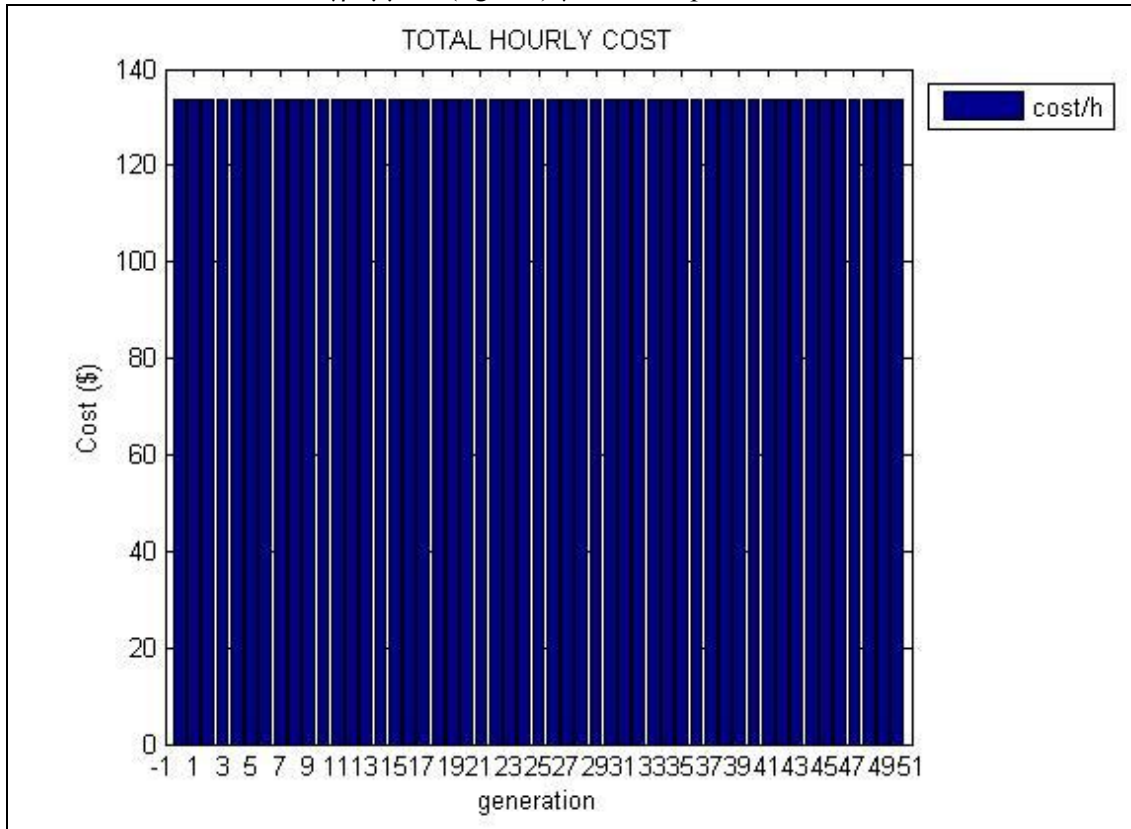


Σχήμα 5.50 : OPTIMAL LINE POWER FLOW, Διάγραμμα 6 (figure6) για case4-3p - treksim1



Σχήμα 5.51 : OPTIMAL GENERATOR POWER/MIN-MAX GENERATOR POWER

Διάγραμμα 7 (figure7) για case4-3p - treksimol



Σχήμα 5.52 : TOTAL HOURLY COST, Διάγραμμα 8 (figure8) για case4-3p - treksimol

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.45 οι λύσεις κυμαίνονται στις περιοχές της αντικειμενικής 133.5-136 \$/h.

Από το Σχήμα 5.46 προκύπτει ότι εδώ οι εφικτές λύσεις σε κάθε γενιά είναι ως 2.

Στο Σχήμα 5.47 φαίνεται ότι το βέλτιστο επιτυγχάνεται από την 1^η γενιά.

Στο Σχήμα 5.49 βλέπουμε ότι βέλτιστες ικανότητες μεταφοράς των νέων γραμμών είναι αυξημένες κυρίως λόγω της αυξημένης ζήτησης της 2^{ης} περιόδου, το οποίο είναι εμφανές και από το Σχήμα 5.46 όπου φαίνονται οι ροές για κάθε περίοδο χωριστά..

Από το Σχήμα 5.51, όπου φαίνονται οι παραγωγές για κάθε χρονική περίοδο και τα όρια αυτών, βλέπουμε ότι η παραγωγή των γεννητριών είναι η μέγιστη στη 2^η περίοδο, ίση με το άνω όριο για κάθε γεννήτρια.

Το κόστος είναι γύρω στα 133\$/h, όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 5.52, δηλ. λίγο αυξημένο σε σχέση με το case 2 (125.8\$/h), και καλύτερο σε σχέση με το case 3 (207.4\$/h).

Για το treksimo2 τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.29.

Πίνακας 5.29: Αποτελέσματα για το Case 4-3p - treksimo2

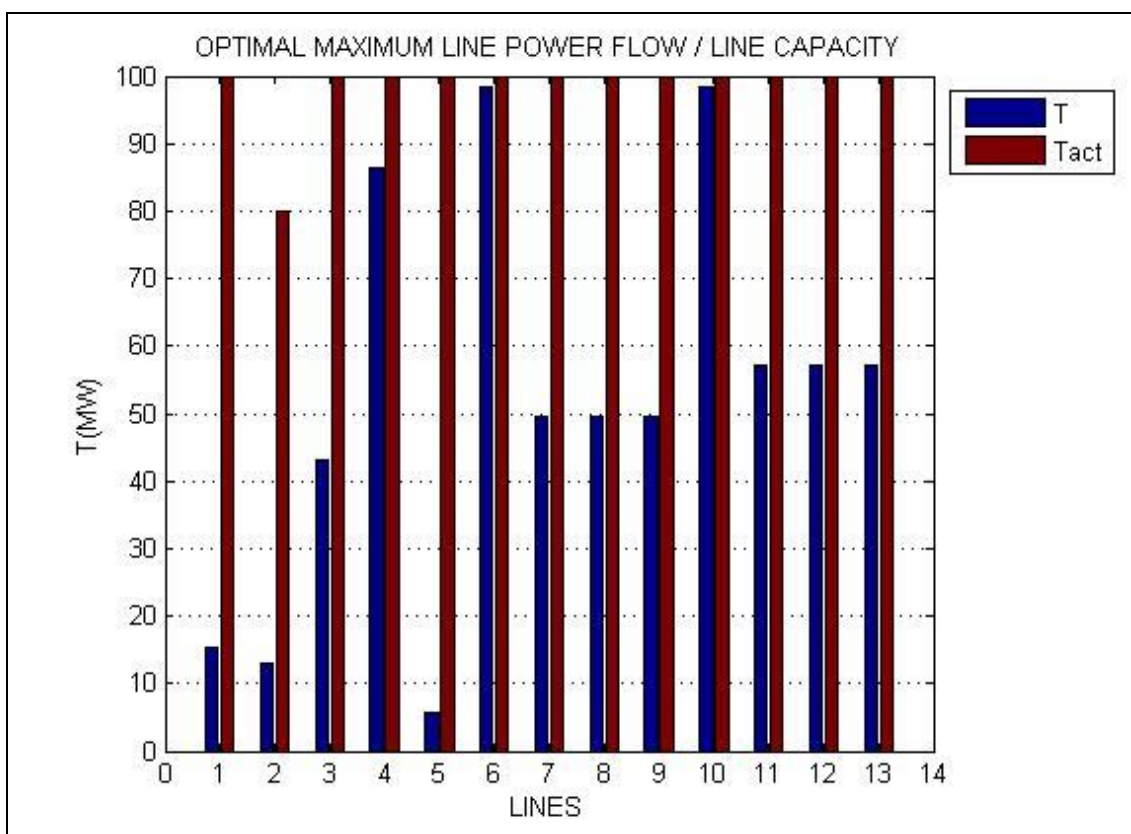
Case 4-3p — treksimo2										
Υποψήφιες νέες γραμμές	1-5	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-5	4-6	4-6	4-6
Βέλτιστη λύση (best_chrome)	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)		152.4305				Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)			1335291	
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)			Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)			Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)
1-2	15.45492	100	15.45492	13.87597	15.45492	150	150	87.7193	0	150
1-4	13.02326	80	11.44431	13.02326	13.02326	0	0	0	0	0
1-5	43.10078	100	43.10078	43.10078	19.24113	323.1579	360	182.807	0	360
2-3	86.25867	100	-86.2587	-83.1008	-62.0481	0	0	0	0	0
2-4	5.658915	100	1.711546	5.658915	4.079967	0	0	0	0	0
3-5	98.44961	100	98.44961	98.44961	50.37944	566.8421	600	249.4737	0	600
2-6	49.56072	100	-46.666	-49.5607	-15.5256					
2-6	49.56072	100	-46.666	-49.5607	-15.5256					
2-6	49.56072	100	-46.666	-49.5607	-15.5256					
3-5	98.44961	100	98.44961	98.44961	50.37944					
4-6	57.10594	100	-48.948	-57.1059	-20.9656					
4-6	57.10594	100	-48.948	-57.1059	-20.9656					
4-6	57.10594	100	-48.948	-57.1059	-20.9656					
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)					951.172					
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)					15.85287					

Το βέλτιστο δίκτυο εδώ προκύπτει αν προστεθούν 3 γραμμές μεταξύ του ζυγού 6 και του ζυγού 2, 3 γραμμές μεταξύ του 6 και του 4 και 1 γραμμή μεταξύ 3 και 5. Για το treskimo3nvars12 τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.30.

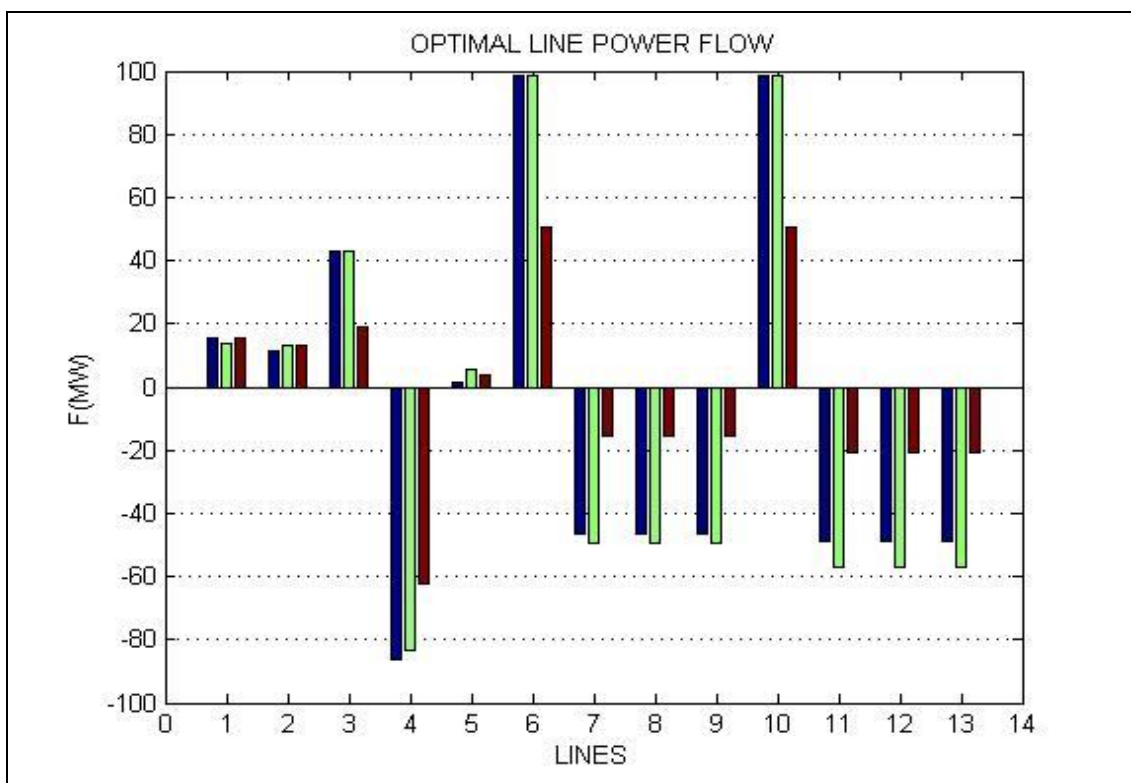
Πίνακας 5.30: Αποτελέσματα για το Case 4-3p - treksimo3nvars12

Case 4-3p — treksimo3nvars12												
Υποψήφιες νέες γραμμές	1-5	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-5	4-6	4-6	4-6	3-6	3-6
Βέλτιστη λύση (best chrome)	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)		152.4305				Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)				1335291		
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)			Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)			Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)		
1-2	15.45492	100	15.45492	13.87597	15.45492	150	150	87.7193	0	150		
1-4	13.02326	80	11.44431	13.02326	13.02326	3.2E-15	2.27E-14	4.07E-29	0	0		
1-5	43.10078	100	43.10078	43.10078	19.24113	323.1579	360	182.807	0	360		
2-3	86.25867	100	-86.2587	-83.1008	-62.0481	1.4E-15	4.81E-13	-7.5E-30	0	0		
2-4	5.658915	100	1.711546	5.658915	4.079967	-1.8E-29	1.52E-13	-8.9E-30	0	0		
3-5	98.44961	100	98.44961	98.44961	50.37944	566.8421	600	249.4737	0	600		
2-6	49.56072	100	-46.666	-49.5607	-15.5256							
2-6	49.56072	100	-46.666	-49.5607	-15.5256							
2-6	49.56072	100	-46.666	-49.5607	-15.5256							
3-5	98.44961	100	98.44961	98.44961	50.37944							
4-6	57.10594	100	-48.948	-57.1059	-20.9656							
4-6	57.10594	100	-48.948	-57.1059	-20.9656							
4-6	57.10594	100	-48.948	-57.1059	-20.9656							
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)						987.719						
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)						16.46198						

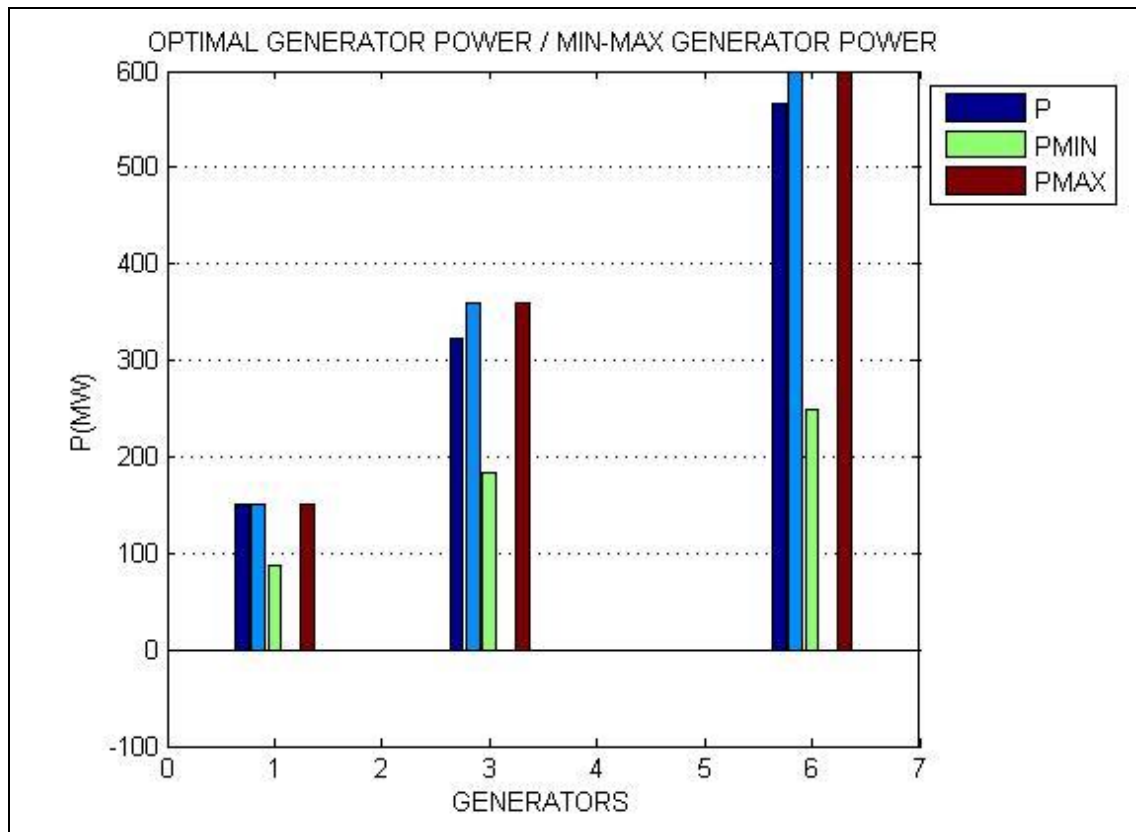
Τα αποτελέσματα για τα T, P, F παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.53-5.55



Σχήμα 5.53 : OPTIMAL MAXIMUM LINE POWER FLOW/LINE CAPACITY, Διάγραμμα 5 (figure5) για case4-3p - treksimo3nvars12



Σχήμα 5.54 : OPTIMAL LINE POWER FLOW, Διάγραμμα 6 (figure6) για case4-3p - treksimo3nvars12



Σχήμα 5.55 : OPTIMAL GENERATOR POWER/MIN-MAX GENERATOR POWER
Διάγραμμα 7 (figure7) για case4-3p - treksimo3nvars12

Τα αποτελέσματα για το τρέξιμο αυτό είναι ίδια με το προηγούμενο (treksimo 2), δηλ. η προσθήκη 2 νέων υποψήφιων γραμμών στη λίστα δεν επέφερε διαφοροποίηση στη βέλτιστη λύση καθώς δεν επιλέχθηκαν οι γραμμές αυτές για να προστεθούν στο υπάρχον δίκτυο.

Για το treskimo4 τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.31.

Εδώ έχουμε την προηγούμενη περίπτωση μόνο που ο ζυγός 6 έχει χαμηλότερο συντελεστή κόστους λειτουργίας (το μισό).

Πίνακας 5.31: Αποτελέσματα για το Case 4-3p - treksimo4

Case 4-3p — treksimo4													
Υποψήφιες νέες γραμμές		1-5	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-5	4-6	4-6	4-6	3-6	3-6
Βέλτιστη λύση (best_chrome)		1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)			112.0796			Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)					981817.2		
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)			Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)			Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)			
1-2	8.887147	100	7.189034	8.887147	0.854646	143.7736	150	74.25867	0	150			
1-4	9.874608	80	5.346306	9.874608	-0.63469	0	0	0	0	0			
1-5	25.61912	100	25.61912	25.61912	17.01935	315.1887	360	126.4804	0	360			
2-3	86.53605	100	-83.1398	-86.5361	-27.6706	0	0	0	0	0			
2-4	5.924765	100	0.830425	5.924765	-1.80668	0	0	0	0	0			
3-5	94.38088	100	94.38088	94.38088	42.98065	581.0377	600	319.2609	0	600			
1-5	25.61912	100	25.61912	25.61912	17.01935								
2-6	50.16719	100	-50.1672	-50.1672	-29.8894								
2-6	50.16719	100	-50.1672	-50.1672	-29.8894								
2-6	50.16719	100	-50.1672	-50.1672	-29.8894								
3-5	94.38088	100	94.38088	94.38088	42.98065								
4-6	58.06688	100	-51.2744	-58.0669	-27.4805								
4-6	58.06688	100	-51.2744	-58.0669	-27.4805								
4-6	58.06688	100	-51.2744	-58.0669	-27.4805								
3-6	7.151443	100	3.2871	4.702194	-7.15144								
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)					926.093								
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)					15.43488								

Συγκρίνοντας με την προηγούμενη περίπτωση το κόστος είναι χαμηλότερο, προστίθεται 1 επιπλέον γραμμή 3-6, και η παραγωγή της γεννήτριας 6 έχει αυξηθεί σε αντίθεση με την 3 που έχει ελαττωθεί όπως ήταν αναμενόμενο λόγω του μεγαλύτερου κόστους της δεύτερης.

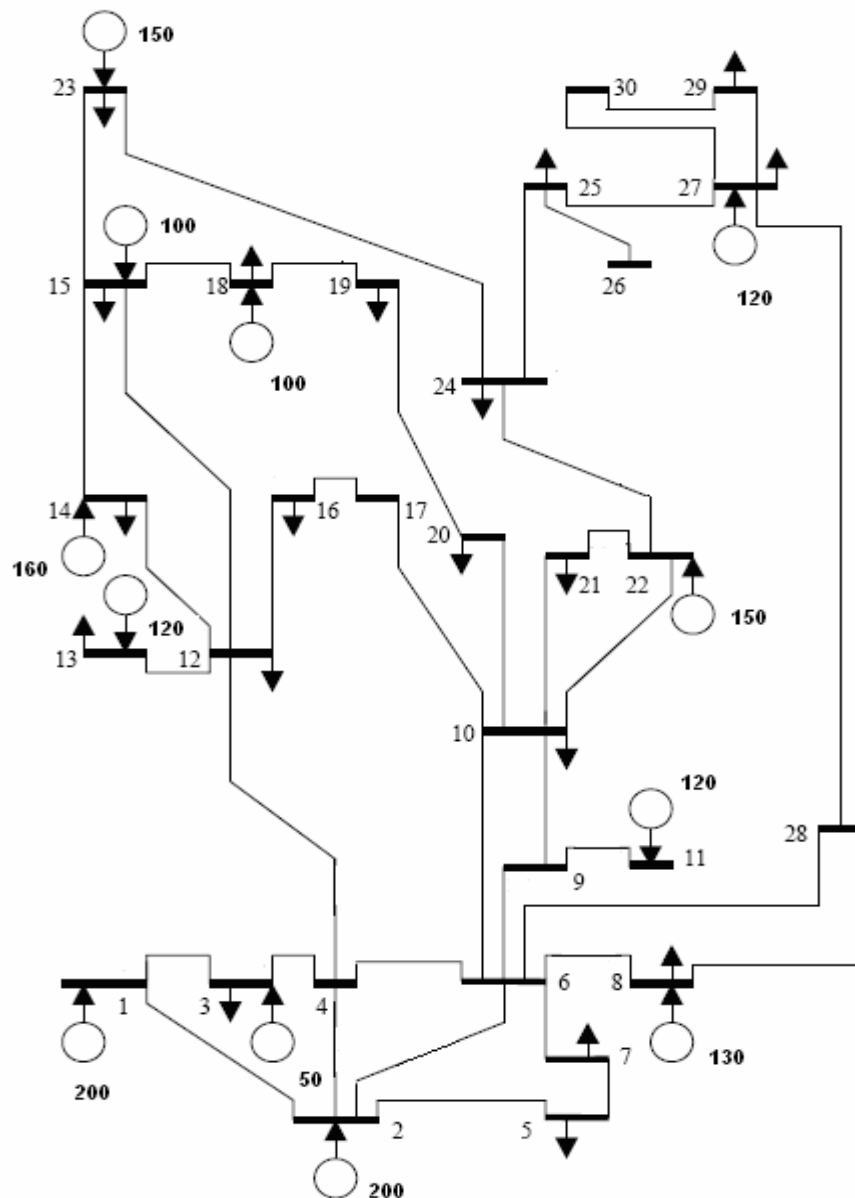
5.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2: ΜΕΣΑΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (30 ΖΥΓΟΙ)

5.3.1 Δεδομένα εισόδου

Για την περίπτωση του μεσαίου συστήματος των 30 ζυγών τα δεδομένα εισόδου του υπάρχοντος δικτύου (αρχικό σύστημα) βρίσκονται στο αρχείο **netdata30bus.xls**.

Τα δεδομένα εισόδου για τις μελλοντικές μονάδες παραγωγής, το δοσμένο μελλοντικό φορτίο και τις υποψήφιες προς κατασκευή νέες γραμμές μεταφοράς, βρίσκονται στο αρχείο **NEWdata30bus.xls**.

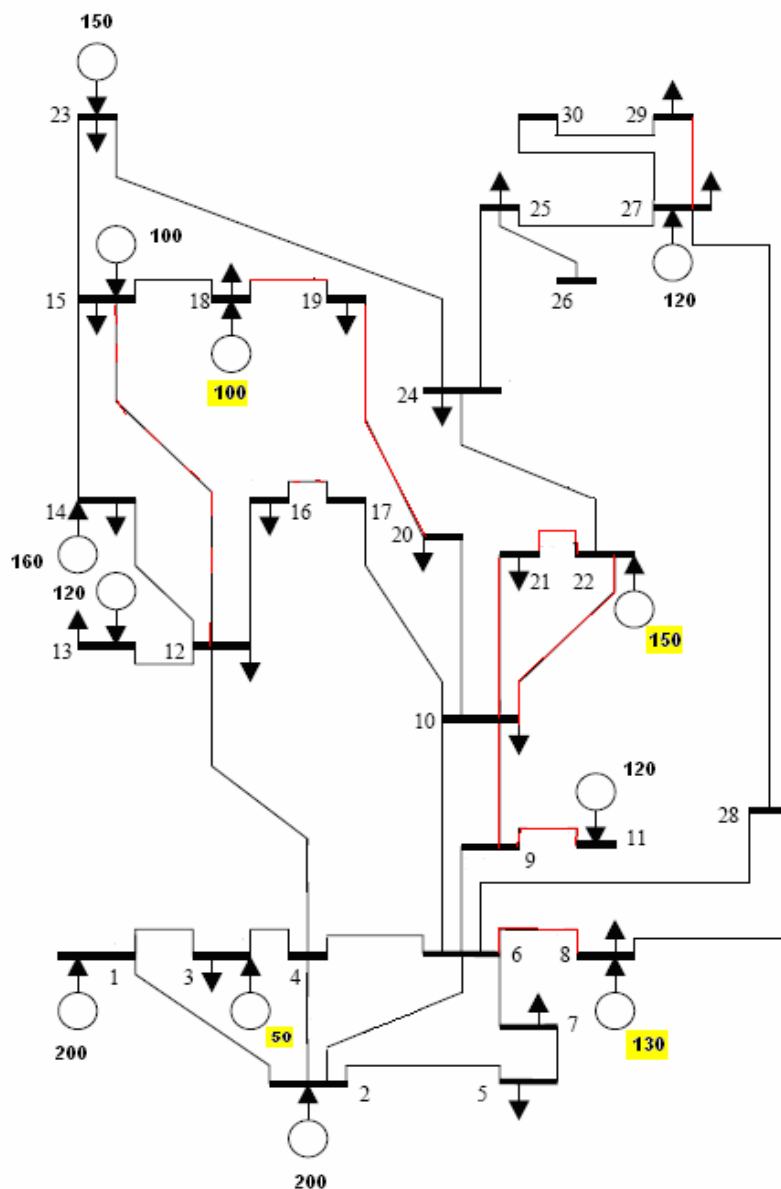
Το αρχικό δίκτυο φαίνεται στην Σχήμα 5.56



Σχήμα 5.56 : Αρχικό δίκτυο 30 ζυγών (IEEE 30 bus system)

Για να εφαρμόσουμε τη βέλτιστη ροή φορτίου στο υπάρχον σύστημα ώστε να δούμε ποιες γραμμές είναι υπερφορτισμένες και που χρειάζεται ενίσχυση, εκτελούμε την **initial.m** την οποία έχουμε υλοποιήσει βοηθητικά για να διαβάζει τα δεδομένα του υπάρχοντος δικτύου και να εκτελεί την **opf.m**.

Αφού εκτελέσουμε την **initial** προκύπτει το ακόλουθο δίκτυο, όπου οι γραμμές που έχουν μέγιστο φορτίο (σχεδόν ίσο με το capacity) φαίνονται με κόκκινο, αυτές που έχουν αρκετά μεγάλο φορτίο με διακεκομμένο κόκκινο, ενώ οι γεννήτριες που λειτουργούν σχεδόν στα όρια τους φαίνονται με έντονο κίτρινο.



Σχήμα 5.57: Επίλυση OPF για το αρχικό δίκτυο 30 ζυγών

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της OPF, για το μεσαίο σύστημα Εκτελούμε τις **4 υποπεριπτώσεις (cases)** που φαίνονται στον **Πίνακα 5.32**

Πίνακας 5.32: Υποπεριπτώσεις για το δίκτυο των 30 ζυγών

Υποπερίπτωση 1 (case1)	1 χρονική περίοδος (8760h) 1 μελλοντική γεννήτρια (31) με μέγιστη παραγωγή 100MW Μηδενικό κόστος λειτουργίας για τις γεννήτριες, $kc=10$ \$/MW year km
treksimo1	9 υποψήφιες γραμμές
treksimo2	6 υποψήφιες γραμμές,
Υποπερίπτωση 2 (case2)	1 χρονική περίοδος (8760h) 3 μελλοντικοί ζυγοί φορτίου (31, 32, 33) με φορτίο 150MW, 150MW, 40MW Μηδενικό κόστος λειτουργίας για τις γεννήτριες, $kc=10$ \$/MW year km
treksimo1	18 υποψήφιες γραμμές
Υποπερίπτωση 3 (case3)	Ίδια με Υποπερίπτωση 2 αλλά μη μηδενικό κόστος λειτουργίας για τις γεννήτριες $A \neq 0$, $B \neq 0$, $kc=10$ \$/MW year km
treksimo1	6 υποψήφιες γραμμές
treksimo2	18 υποψήφιες γραμμές
Υποπερίπτωση 4 (case4)	4 μελλοντικοί ζυγοί (3 ζυγοί φορτίου 150MW, 150MW, 40 MW και 1 γεννήτρια 100MW) Μέγιστη συνολική παραγωγή 1700MW Μη μηδενικό κόστος λειτουργίας για τις γεννήτριες $A \neq 0$, $B \neq 0$, $kc=10$ \$/MW year km
treksimo1	1 χρονική περίοδος (8760h) Συνολική ζήτηση 1340MW 13 υποψήφιες γραμμές
treksimo2-2p	2 χρονικές περίοδοι (2190h, 6570h) Συνολική ζήτηση 1 ^η περίοδος 1340MW, 2 ^η περίοδος 1700MW 13 υποψήφιες γραμμές
treksimo3-3p	3 χρονικές περίοδοι (2190h, 2820h, 3750h) Συνολική ζήτηση 1 ^η περίοδος 1340MW, 2 ^η περίοδος 1700MW, 3 ^η περίοδος 1700MW 9 υποψήφιες γραμμές

5.3.1.1 Υποπερίπτωση 1

Στην περίπτωση έχουμε μία μελλοντική γεννήτρια (31) που εγκαθίσταται κοντά στον ζυγό 22 για την αποσυμφόρηση των γραμμών και κάλυψη πιθανής μελλοντικής ζήτησης. Όσο αφορά το κόστος, έχουμε μόνο κόστος επένδυσης, δηλαδή οι γεννήτριες δεν έχουν κόστος λειτουργίας.

Πίνακας 5.33: Δεδομένα εισόδου netdata30bus.xls για το case1 του δικτύου των 30 ζυγών

Αριθμός γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	1	2	10	6	0.0575	130
2	1	3	10	18	0.1852	130
3	2	4	10	17	0.1737	65
4	3	4	10	4	0.0379	130
5	2	5	10	20	0.1983	130
6	2	6	10	18	0.1763	65
7	4	6	10	4	0.0414	90
8	5	7	10	12	0.116	70
9	6	7	10	8	0.082	130
10	6	8	10	4	0.042	100
11	6	9	10	21	0.208	65
12	6	10	10	56	0.556	32
13	9	11	10	21	0.208	70
14	9	10	10	11	0.11	70
15	4	12	10	26	0.256	65
16	12	13	10	14	0.14	65
17	12	14	10	26	0.2559	32
18	12	15	10	13	0.1304	32
19	12	16	10	20	0.1987	32
20	14	15	10	20	0.1997	16
21	16	17	10	20	0.1932	16
22	15	18	10	22	0.2185	16
23	18	19	10	13	0.1292	70
24	19	20	10	7	0.068	50
25	10	20	10	21	0.209	32
26	10	17	10	8	0.0845	32
27	10	21	10	7	0.0749	70
28	10	22	10	15	0.1499	50
29	21	22	10	2	0.0236	100
30	15	23	10	20	0.202	16
31	22	24	10	18	0.179	16
32	23	24	10	27	0.27	16
33	24	25	10	33	0.3292	16
34	25	26	10	38	0.38	16
35	25	27	10	21	0.2087	16
36	28	27	10	40	0.396	65
37	27	29	10	41	0.4153	30
38	27	30	10	60	0.6027	16
39	29	30	10	45	0.453	16
40	8	28	10	20	0.2	32
41	6	28	10	6	0.0599	32

Αριθμός ζυγού Α/Α	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος 8760h	Ελάχιστο όριο παραγωγής P _{MIN} (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής P _{MAX} (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Α (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Β (\$/MWh)
1	1	0	0	200	0	0
2	2	0	0	200	0	0
3	3	160	0	50	0	0
4	4	0	0	0	0	0
5	5	85	0	0	0	0
6	6	0	0	0	0	0
7	7	50	0	0	0	0
8	8	25	0	130	0	0
9	9	0	0	0	0	0
10	10	190	0	0	0	0
11	11	0	0	120	0	0
12	12	50	0	0	0	0
13	13	20	0	120	0	0
14	14	50	0	160	0	0
15	15	50	0	100	0	0
16	16	9	0	0	0	0
17	17	0	0	0	0	0
18	18	35	0	100	0	0
19	19	17	0	0	0	0
20	20	60	0	0	0	0
21	21	34	0	0	0	0
22	22	0	0	150	0	0
23	23	85	0	150	0	0
24	24	9	0	0	0	0
25	25	9	0	0	0	0
26	26	0	0	0	0	0
27	27	27	0	120	0	0
28	28	0	0	0	0	0
29	29	35	0	0	0	0
30	30	0	0	0	0	0

Πίνακας 5.34: Δεδομένα εισόδου NEWdata30bus.xls για treksimol για το case1 του δικτύου των 30 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής Α/Α	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός αφίξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	9	31	10	20	0.2	100
2	10	31	10	20	0.2	100
3	20	31	10	20	0.2	100
4	21	31	10	20	0.2	100
5	22	31	10	20	0.2	100
6	6	31	10	20	0.2	100
7	7	31	10	20	0.2	100
8	8	31	10	20	0.2	100
9	11	31	10	20	0.2	100

Αριθμός ζυγού Α/Α	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος 8760h	Ελάχιστο όριο παραγωγής P _{MIN} (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής P _{MAX} (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Α (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Β (\$/MWh)
1	31	0	0	100	0	0

Πίνακας 5.35: Δεδομένα εισόδου NEWdata30bus.xls για treksimo2 για το case 1 του δικτύου των 30 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	10	31	10	20	0.2	100
2	10	31	10	20	0.2	100
3	20	31	10	20	0.2	100
4	20	31	10	20	0.2	100
5	21	31	10	20	0.2	100
6	9	31	10	20	0.2	100

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος 8760h	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	31	0	0	100	0	0

5.3.1.2 Υποπερίπτωση 2

Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε 3 μελλοντικούς ζυγούς φορτίου για να συνδεθούν στο αρχικό δίκτυο, τους 31, 32, 33 με ζήτηση 150MW, 150MW και 40MW αντίστοιχα. Έχουμε 18 υποψήφιες γραμμές μεταφοράς και τα χαρακτηριστικά τους είναι τα ίδια (δηλ. το μήκος, το κόστος ανά μονάδα μήκους επί ισχύ, η επαγωγική αντίσταση).

Τα δεδομένα εισόδου netdata30bus.xls για το case2 είναι ίδια με το case1.

Πίνακας 5.36: Δεδομένα εισόδου NEWdata30bus.xls για treksimo1 για το case 2 του δικτύου των 30 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	31	1	10	20	0.2	200
2	31	2	10	20	0.2	200
3	32	14	10	20	0.2	200
4	32	23	10	20	0.2	200
5	33	24	10	20	0.2	200
6	33	26	10	20	0.2	200
7	31	4	10	20	0.2	200
8	31	12	10	20	0.2	200
9	31	9	10	20	0.2	200
10	31	6	10	20	0.2	200
11	32	15	10	20	0.2	200
12	32	18	10	20	0.2	200
13	33	25	10	20	0.2	200
14	32	13	10	20	0.2	200
15	32	17	10	20	0.2	200
16	33	27	10	20	0.2	200
17	33	29	10	20	0.2	200
18	33	11	10	20	0.2	200

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος 8760h	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	31	150	0	0	0	0
2	32	150	0	0	0	0
3	33	40	0	0	0	0

5.3.1.3 Υποπερίπτωση 3

Στην περίπτωση case3 έχουμε τα δεδομένα της case2 αλλά εδώ οι γεννήτριες έχουν κόστος λειτουργίας.

Τα δεδομένα εισόδου netdata30bus.xls είναι ίδια με το case1 με τη διαφορά ότι υπάρχουν άλλες τιμές για τα Tact (πιο μεγάλες) και στους συντελεστές A, B για το κόστος λειτουργίας υπάρχουν οι τιμές που δίνονται στον Πίνακα 5.37

Πίνακας 5.37: Μέρος δεδομένων εισόδου netdata30bus.xls για treksimol για το case3 του δικτύου των 30 ζυγών

Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B (\$/MWh)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	0.001	130
0.7	0.001	130
0.3	0.001	130
0	0	130
0	0	130
0	0	130
0	0	130
0.3	0.001	130
0	0	130
0	0	160
0.7	0.001	100
0	0	100
0.7	0.001	130
0.7	0.001	130
0.5	0.001	130
0	0	130
0	0	130
0.3	0.001	130
0	0	130
0	0	130
0	0	130
0.5	0.001	130
0.7	0.001	130
0	0	130
0	0	100
0	0	130
0.5	0.001	130
0	0	130
0	0	150
0	0	130

Πίνακας 5.38: Δεδομένα εισόδου NEWdata30bus.xls για treksimol για το case3 του δικτύου των 30 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	31	2	10	20	0.2	300
2	31	12	10	20	0.2	300
3	32	13	10	20	0.2	300
4	32	14	10	20	0.2	300
5	32	23	10	20	0.2	300
6	33	27	10	20	0.2	300

Αριθμός ζυγού Α/Α	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος 8760h	Ελάχιστο όριο παραγωγής P _{MIN} (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής P _{MAX} (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Α (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Β (\$/MWh)
1	31	150	0	0	0	0
2	32	150	0	0	0	0
3	33	40	0	0	0	0

Για το επόμενο τρέξιμο (treksimo2) του case3 η μόνη διαφορά είναι ότι έχουμε 18 υποψήφιες γραμμές μεταφοράς.

Πίνακας 5.39: Δεδομένα εισόδου NEWdata30bus.xls για treksimo2 για το case3 του δικτύου των 30 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής Α/Α	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός αφίξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	31	1	10	20	0.2	300
2	31	2	10	20	0.2	300
3	32	14	10	20	0.2	300
4	32	23	10	20	0.2	300
5	33	24	10	20	0.2	300
6	33	26	10	20	0.2	300
7	31	4	10	20	0.2	300
8	31	12	10	20	0.2	300
9	31	9	10	20	0.2	300
10	31	6	10	20	0.2	300
11	32	15	10	20	0.2	300
12	32	18	10	20	0.2	300
13	33	25	10	20	0.2	300
14	32	13	10	20	0.2	300
15	32	17	10	20	0.2	300
16	33	27	10	20	0.2	300
17	33	29	10	20	0.2	300
18	33	11	10	20	0.2	300

Αριθμός ζυγού Α/Α	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος 8760h	Ελάχιστο όριο παραγωγής P _{MIN} (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής P _{MAX} (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Α (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Β (\$/MWh)
1	31	150	0	0	0	0
2	32	150	0	0	0	0
3	33	40	0	0	0	0

5.3.1.4 Υποπερίπτωση 4

Στην περίπτωση αυτή έχουμε 3 μελλοντικούς ζυγούς φορτίου (31, 32, 33) για να συνδεθούν στο υπάρχον δίκτυο και μια μελλοντική γεννήτρια (34).

Στο 1^ο τρέξιμο έχουμε 1 χρονική περίοδο ζήτησης , στο 2^ο τρέξιμο 2 χρονικές περιόδους και στο 3^ο τρεις.

Τα δεδομένα των νέων ζυγών για τα τρεξίματα treksimo1, treksimo2-2p, treksimo3-3p φαίνονται στον Πίνακα 5.40.

Πίνακας 5.40: Δεδομένα εισόδου NEWdata30bus.xls για treksimo1 για το case4 του δικτύου των 30 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	31	2	10	20	0.2	300
2	32	14	10	20	0.2	300
3	32	23	10	20	0.2	300
4	33	26	10	20	0.2	300
5	31	12	10	20	0.2	300
6	33	25	10	20	0.2	300
7	33	27	10	20	0.2	300
8	34	9	10	20	0.2	300
9	34	10	10	20	0.2	300
10	34	20	10	20	0.2	300
11	34	22	10	20	0.2	300
12	34	8	10	20	0.2	300
13	34	11	10	20	0.2	300

Αριθμός ζυγού A/A	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 1 περίοδος 8760h	Ελάχιστο όριο παραγωγής PMIN (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής PMAX (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας A (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας B(\$/MWh)
1	31	150	0	0	0	0
2	32	150	0	0	0	0
3	33	40	0	0	0	0
4	34	0	0	100	0.5	0.001

Εδώ έχουμε 13 υποψήφιες γραμμές μεταφοράς με capacity 300MW

Για το **treksimo-2p** τα δεδομένα εισόδου netdata30bus2p.xls διαφέρουν από πριν στο ότι οι χρονικές περίοδοι είναι 2

TIME (h)	2190	6570
-----------------	------	------

Η ζήτηση (για το αρχικό δίκτυο) στην πρώτη περίοδο είναι ίση με πριν και η ζήτηση στην δεύτερη περίοδο είναι ίση με την πρώτη περίοδο.

Πίνακας 5.41: Δεδομένα εισόδου NEWdata30bus.xls για treksimo2-2p για το case4 του δικτύου των 30 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής A/A	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	31	1	10	20	0.2	300
2	31	2	10	20	0.2	300
3	31	12	10	20	0.2	300
4	32	1	10	20	0.2	300
5	32	14	10	20	0.2	300
6	32	23	10	20	0.2	300
7	33	11	10	20	0.2	300
8	33	27	10	20	0.2	300
9	34	8	10	20	0.2	300
10	34	9	10	20	0.2	300
11	34	10	10	20	0.2	300
12	34	20	10	20	0.2	300
13	34	24	10	20	0.2	300

Αριθμός ζυγού Α/Α	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 2 περίοδοι 2190h 6570h		Ελάχιστο όριο παραγωγής P _{MIN} (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής P _{MAX} (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Α (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Β (\$/MWh)
1	31	150	310	0	0	0	0
2	32	150	310	0	0	0	0
3	33	40	80	0	0	0	0
4	34	0	0	0	100	0.5	0.001

Για το **treksimo3-3p** έχουμε 3 χρονικές περιόδους και η ζήτηση σε κάθε μια περίοδο είναι ίση με προηγουμένως

TIME	2190	2820	3750
------	------	------	------

Πίνακας 5.42: Δεδομένα εισόδου NEWdata30bus.xls για treksimo3-3p για το case4 του δικτύου των 30 ζυγών

Αριθμός υποψήφιας γραμμής Α/Α	Ζυγός αναχώρ.	Ζυγός άφιξης	Συντελεστής κόστους επένδυσης kc (\$/MW.year.km)	Μήκος γραμμής L (km)	Επαγωγική αντίσταση X (αμ)	Πραγματική ικανότητα μεταφοράς Tact (MW)
1	31	1	10	20	0.2	300
2	31	2	10	20	0.2	300
3	31	12	10	20	0.2	300
4	32	1	10	20	0.2	300
5	32	14	10	20	0.2	300
6	32	23	10	20	0.2	300
7	33	11	10	20	0.2	300
8	34	10	10	20	0.2	300
9	34	24	10	20	0.2	300

Αριθμός ζυγού Α/Α	Ζυγός	Ζήτηση D (MW) 3 περίοδοι 2190h 2820h 3750h			Ελάχιστο όριο παραγωγής P _{MIN} (MW)	Μέγιστο όριο παραγωγής P _{MAX} (MW)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Α (\$/MWh)	Συντελεστής κόστους λειτουργίας Β (\$/MWh)
1	31	150	310	350	0	0	0	0
2	32	150	310	350	0	0	0	0
3	33	40	80	0	0	0	0	0
4	34	0	0	0	0	100	0.5	0.001

Εδώ έχουμε 9 υποψήφιες γραμμές μεταφοράς.

5.3.2 Δεδομένα γενετικού αλγορίθμου

Τα δεδομένα του γενετικού αλγορίθμου βρίσκονται στο αρχείο **genpar30.dat**.

Μήκος χρωμοσώματος - Size of chromosome (NVARs)

Μέγεθος πληθυσμού - Size of population (POPSIZE)

Πλήθος γενεών - No. of generations (MAXGENS)

Πιθανότητα μετάλλαξης - Mutation Probability (PMUTATION)

Πιθανότητα επιχiasμού - Crossover Probability (PXOVER)

Παράμετρος επιλογής - Selective pressure(q)

Ποινή - Penalty (PENALTY)

Πίνακας 5.43: Δεδομένα για case1-treksimo1

GENETIC ALGORITHM PARAMETERS

Size of chromosome (NVARs)= 9
Size of population (POPSIZE)= 10
No. of generations (MAXGENS)= 100
Mutation Probability (PMUTATION)= 0.05
Crossover Probability (PXOVER)= 0.9
Selective pressure(q)= 3
Penalty (PENALTY)= 1000

Πίνακας 5.44: Δεδομένα για case 1-treksimo2

GENETIC ALGORITHM PARAMETERS

Size of chromosome (NVARs)= 6
Size of population (POPSIZE)= 10
No. of generations (MAXGENS)= 100
Mutation Probability (PMUTATION)= 0.05
Crossover Probability (PXOVER)= 0.9
Selective pressure(q)= 3
Penalty (PENALTY)= 1000

Πίνακας 5.45: Δεδομένα για case2-treksimol

GENETIC ALGORITHM PARAMETERS

Size of chromosome (NVARs)= 18
Size of population (POPSIZE)= 30
No. of generations (MAXGENS)= 150
Mutation Probability (PMUTATION)= 0.08
Crossover Probability (PXOVER)= 0.9
Selective pressure(q)= 2
Penalty (PENALTY)= 1000

Πίνακας 5.46: Δεδομένα για case3-treksimol

GENETIC ALGORITHM PARAMETERS

Size of chromosome (NVARs)= 6
Size of population (POPSIZE)= 20
No. of generations (MAXGENS)= 300
Mutation Probability (PMUTATION)= 0.08
Crossover Probability (PXOVER)= 0.9
Selective pressure(q)= 2
Penalty (PENALTY)= 10000

Πίνακας 5.47: Δεδομένα για case3-treksimol2

GENETIC ALGORITHM PARAMETERS

Size of chromosome (NVARs)= 18
Size of population (POPSIZE)= 30
No. of generations (MAXGENS)= 150
Mutation Probability (PMUTATION)= 0.08
Crossover Probability (PXOVER)= 0.9
Selective pressure(q)= 2
Penalty (PENALTY)= 10000

Πίνακας 5.48: Δεδομένα για case4-treksimo1

GENETIC ALGORITHM PARAMETERS

Size of chromosome (NVARs)= 13
Size of population (POPSIZE)= 30
No. of generations (MAXGENS)= 150
Mutation Probability (PMUTATION)= 0.08
Crossover Probability (PXOVER)= 0.9
Selective pressure(q)= 2
Penalty (PENALTY)= 10000

Πίνακας 5.49: Δεδομένα για case4-treksimo2-2p

GENETIC ALGORITHM PARAMETERS

Size of chromosome (NVARs)= 13
Size of population (POPSIZE)= 30
No. of generations (MAXGENS)= 100
Mutation Probability (PMUTATION)= 0.08
Crossover Probability (PXOVER)= 0.9
Selective pressure(q)= 2
Penalty (PENALTY)= 10000

Πίνακας 5.50: Δεδομένα για case4-treksimo3-3p

GENETIC ALGORITHM PARAMETERS

Size of chromosome (NVARs)= 9
Size of population (POPSIZE)= 15
No. of generations (MAXGENS)= 50
Mutation Probability (PMUTATION)= 0.08
Crossover Probability (PXOVER)= 0.9
Selective pressure(q)= 2
Penalty (PENALTY)= 10000

5.3.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται με τη μορφή πινάκων στο αρχείο εξόδου results30.xls αλλά και με τη μορφή των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.1. Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται καταγραφή και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της εκτέλεσης του αλγορίθμου για το μεσαίο σύστημα των 30 ζυγών.

5.3.3.1 Υποπερίπτωση 1

Τα αποτελέσματα του προγράμματος για το **case1** αποθηκεύονται στο αρχείο **results30.xls**. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το treksimo1 του case1 φαίνονται στον Πίνακα 5.51

Πίνακας 5.51: Αποτελέσματα για το Case 1- treksimo1

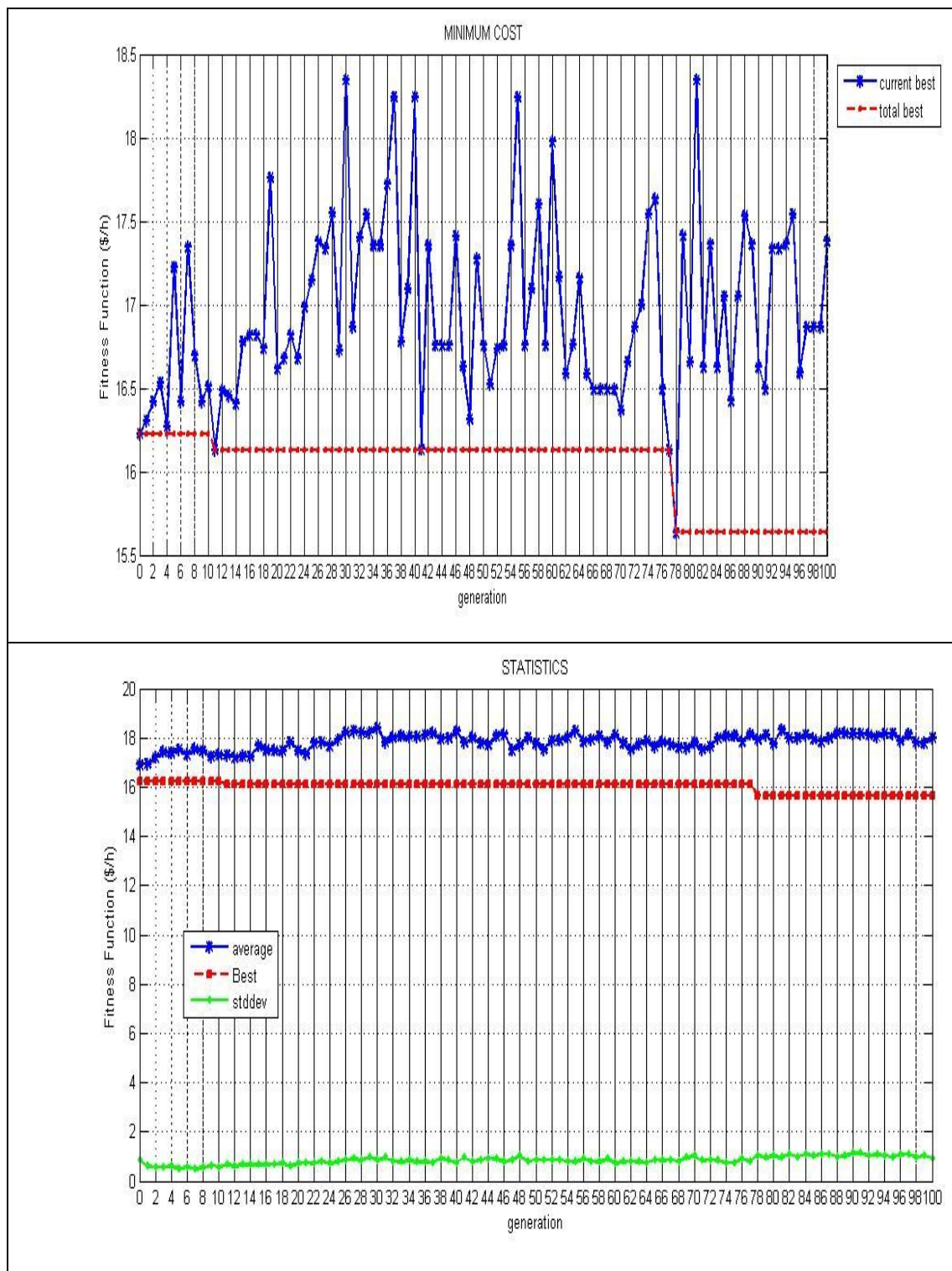
Case 1— treksimo1— results30.xls									
Υποψήφιες νέες γραμμές	9-31	10-31	20-31	21-31	22-31	6-31	7-31	8-31	11-31
Βέλτιστη λύση (best chrome)	1	1	1	0	1	0	0	1	1
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)		15.63293848		Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)			136944.5411		
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)	Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)	Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)			
1-2	0	130	0	40.382993	0	200			
1-3	40.38299	130	40.38299	106.18445	0	200			
2-4	27.86669	65	27.8667	50	0	50			
3-4	69.61701	130	-69.617	0	0	0			
2-5	60.66612	130	60.66612	0	0	0			
2-6	17.65163	65	17.65163	0	0	0			
4-6	41.75031	90	-41.7503	0	0	0			
5-7	24.33388	70	-24.3339	130	0	130			
6-7	74.33388	130	74.33388	0	0	0			
6-8	90.39251	100	-90.3925	0	0	0			
6-9	0.404520	65	-0.40452	17.847814	0	120			
6-10	6.971964	32	6.971964	0	0	0			
9-11	17.84781	70	-17.8478	37.721047	0	120			
9-10	36.00502	70	36.00502	64.18902	0	160			
4-12	0	65	0	77.844864	0	100			
12-13	17.72105	65	-17.721	0	0	0			
12-14	14.18902	32	-14.189	0	0	0			
12-15	27.84486	32	-27.8449	71.350935	0	100			
12-16	9.754931	32	9.754931	0	0	0			
14-15	0	16	0	0	0	0			
16-17	0.754931	16	0.754931	0	0	0			
15-18	0	16	0	150	0	150			
18-19	36.35093	70	36.35093	87.583991	0	150			
19-20	19.35093	50	19.35093	0	0	0			

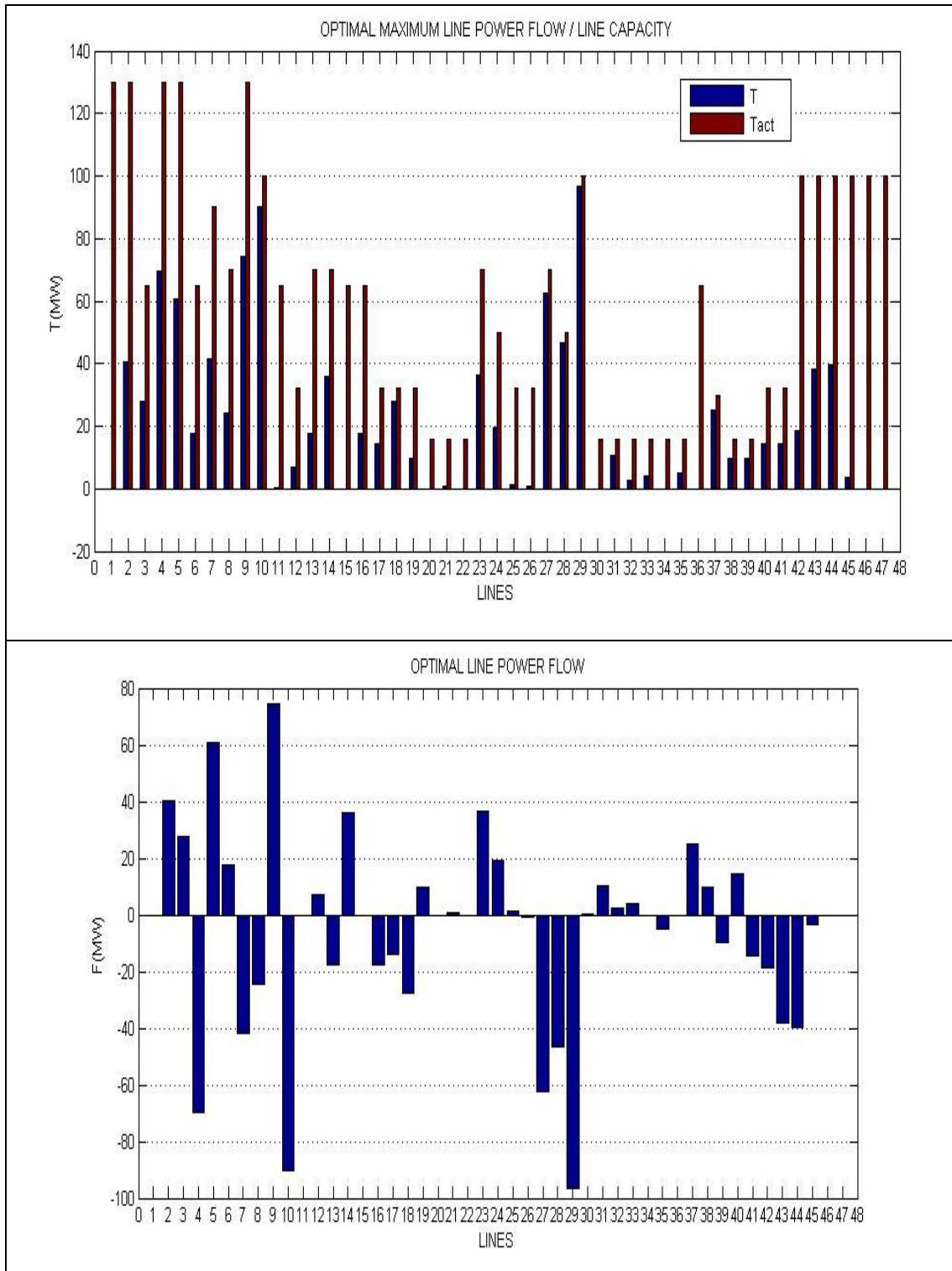
10-20	1.117153	32	1.117153	0	0	0
10-17	0.754931	32	-0.75493	0	0	0
10-21	62.55962	70	-62.5596	66.894885	0	120
10-22	46.46113	50	-46.4611	0	0	0
21-22	96.55962	100	-96.5596	0	0	0
15-23	0	16	0	0	0	0
22-24	10.52112	16	10.52112	100	0	200
23-24	2.583991	16	2.583991			
24-25	4.105115	16	4.105115			
25-26	0	16	0			
25-27	4.894885	16	-4.89488			
28-27	0	65	0			
27-29	25.11863	30	25.11863			
27-30	9.881373	16	9.881373			
29-30	9.881373	16	-9.88137			
8-28	14.60748	32	14.60749			
6-28	14.60748	32	-14.6075			
9-31	18.56173	100	-18.5617			
10-31	38.36449	100	-38.3645			
20-31	39.53191	100	-39.5319			
22-31	3.541873	100	-3.54187			
8-31	0	100	0			
11-31	0	100	0			
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)					12418.28	
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)					206.9763	

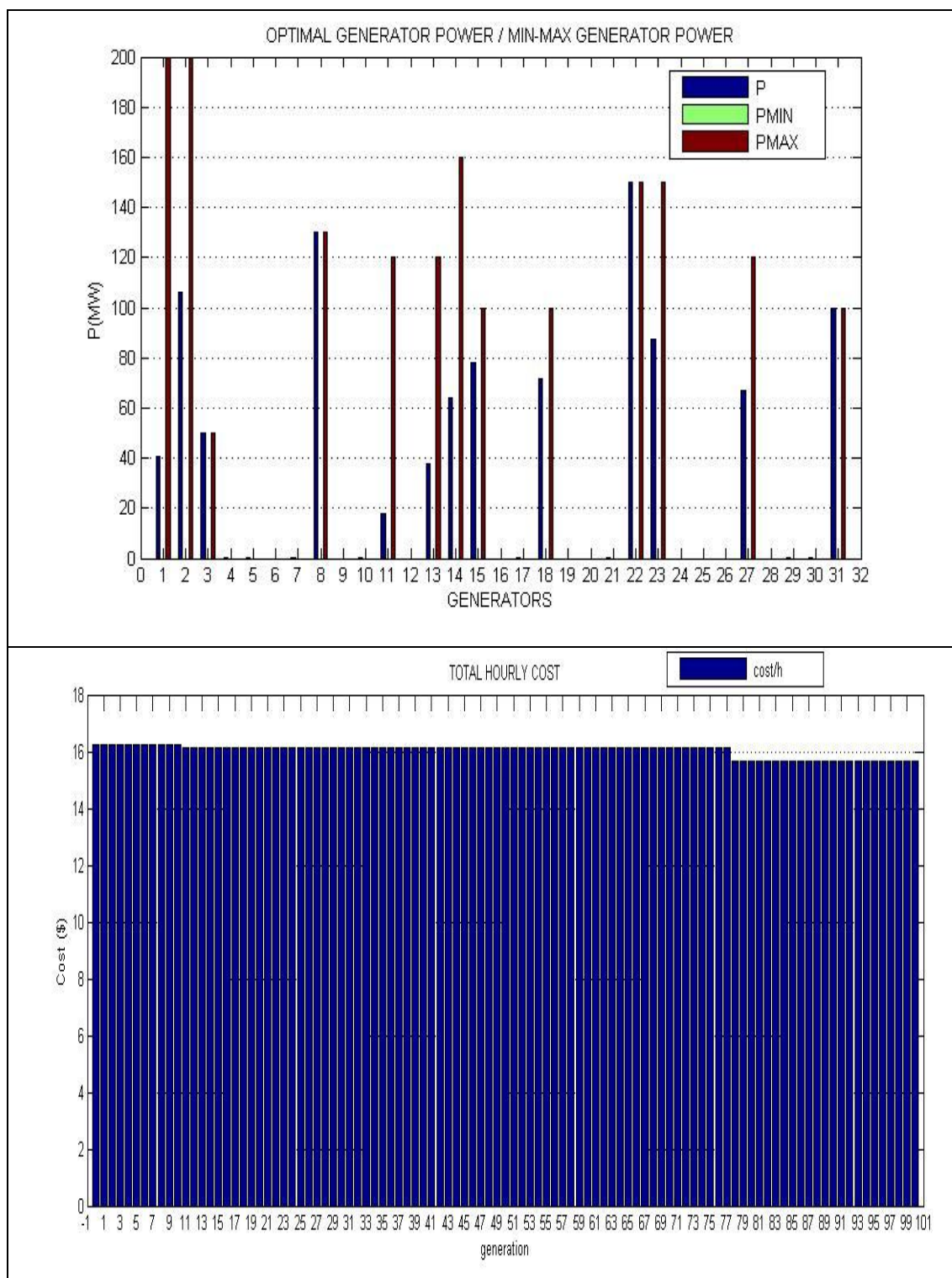
Το δίκτυο που προκύπτει είναι όταν συνδεθεί ο ζυγός 31 με τους ζυγούς 9, 10, 20, 22, 8, και 11.

Οι γραμμές που θέλαμε να αποσυμφορήσουμε φαίνονται με **έντονη κόκκινη γραφή** και αν συγκρίνουμε με τα όρια τους βλέπουμε ότι με τη σύνδεση του ζυγού 31 η βέλτιστη ροή τους μειώνεται στις περισσότερες ακόμα και στο μισό των ορίων τους. Αυτό φαίνεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν.

Αναλυτικά η πορεία του αλγορίθμου και τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.58.







Σχήμα 5.58 : Διαγράμματα για εξέλιξη γενετικού και αποτελέσματα για T,P,F ,cost για case1-treksimo1

Στο [treksimo2](#) έχουμε λιγότερες υποψήφιες γραμμές (6) (με βάση την προτεινόμενη λύση από το 1^ο τρέξιμο) και η λύση που προκύπτει είναι καλύτερη της προηγούμενης

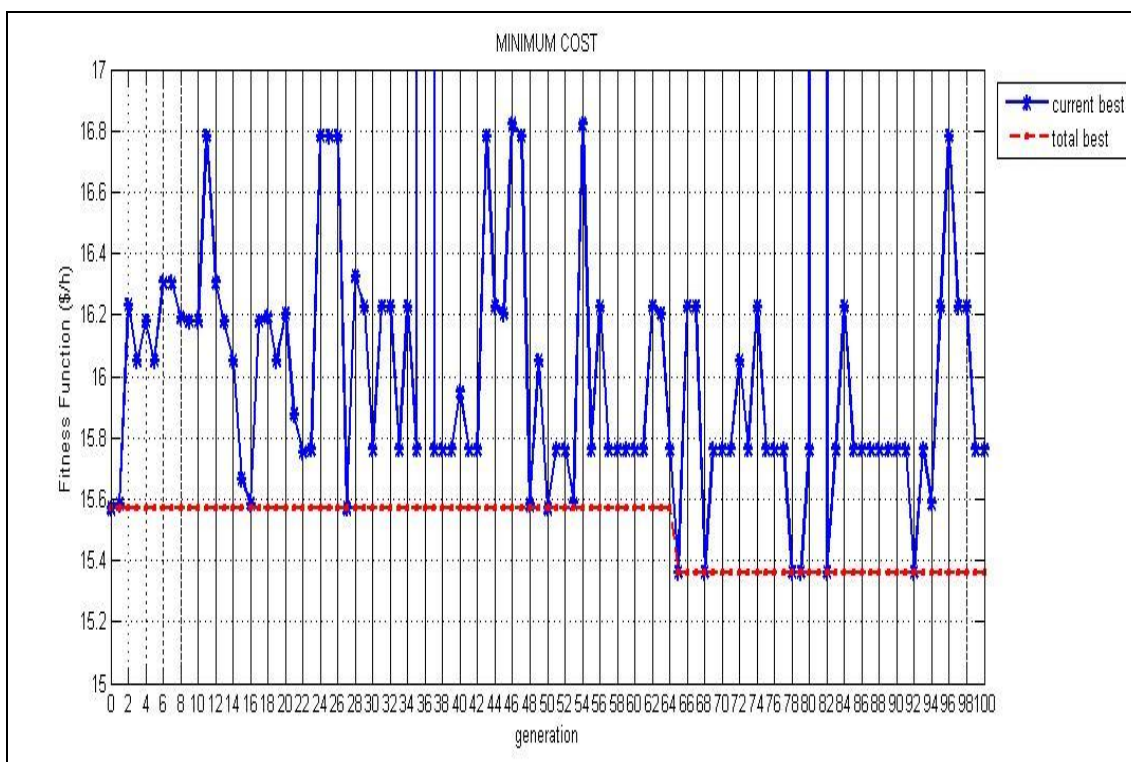
Πίνακας 5.52: Αποτελέσματα για το Case 1- treksimo2

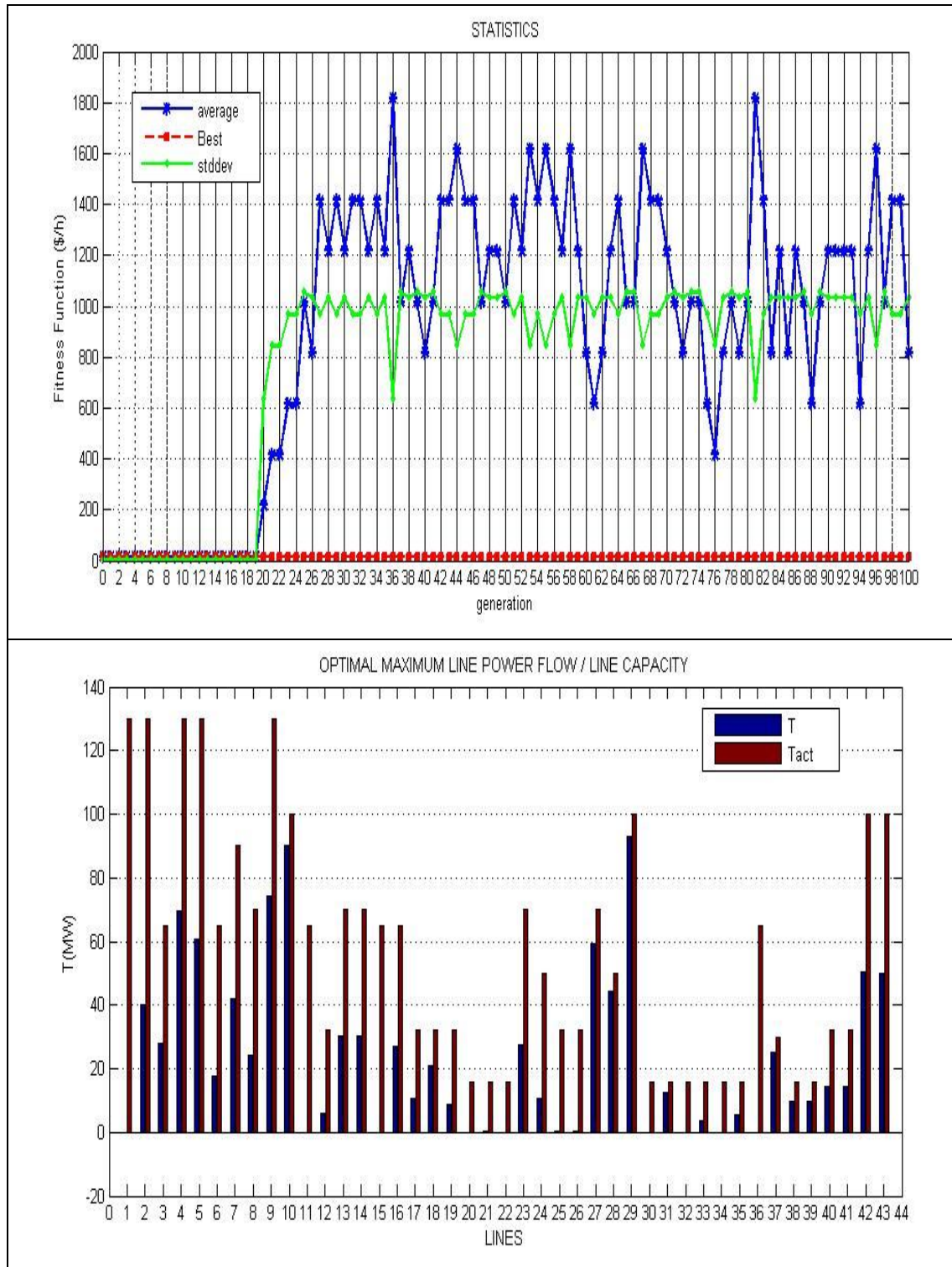
Case 1— treksimo2— results30.xls									
Υποψήφιες νέες γραμμές	10-31	10-31	20-31	20-31	21-31	9-31			
Βέλτιστη λύση (best_chrome)	0	1	0	1	0	0			
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)		15.35998167		Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)		134553.4394			
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)	Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)	Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)			
1-2	0	130	0	40.27392	0	200			
1-3	40.27392	130	40.273916	105.7604	0	200			
2-4	27.7266	65	27.726602	50	0	50			
3-4	69.72608	130	-69.72608	0	0	0			
2-5	60.57868	130	60.578683	0	0	0			
2-6	17.45509	65	17.455089	0	0	0			
4-6	41.99948	90	-41.99948	0	0	0			
5-7	24.42132	70	-24.42132	130	0	130			
6-7	74.42132	130	74.421317	0	0	0			
6-8	90.39251	100	-90.39251	0	0	0			
6-9	0	65	0	30.5006	0	120			
6-10	6.034291	32	6.0342912	0	0	0			
9-11	30.5006	70	-30.5006	47.01121	0	120			
9-10	30.5006	70	30.500599	60.6763	0	160			
4-12	0	65	0	70.95142	0	100			
12-13	27.01121	65	-27.01121	0	0	0			
12-14	10.6763	32	-10.6763	0	0	0			
12-15	20.95142	32	-20.95142	62.53802	0	100			
12-16	8.638932	32	8.6389324	0	0	0			
14-15	0	16	0	0	0	0			
16-17	0.361068	16	-0.361068	0	0	0			
15-18	0	16	0	150	0	150			
18-19	27.53802	70	27.538017	85	0	150			
19-20	10.53802	50	10.538017	0	0	0			
10-20	0.353377	32	-0.353377	0	0	0			
10-17	0.361068	32	0.3610676	0	0	0			
10-21	59.10022	70	-59.10022	67.28816	0	120			
10-22	44.18794	50	-44.18794	0	0	0			
21-22	93.10022	100	-93.10022	0	0	0			
15-23	0	16	0	0	0	0			
22-24	12.71184	16	12.711839	100	0	200			
23-24	0	16	0						

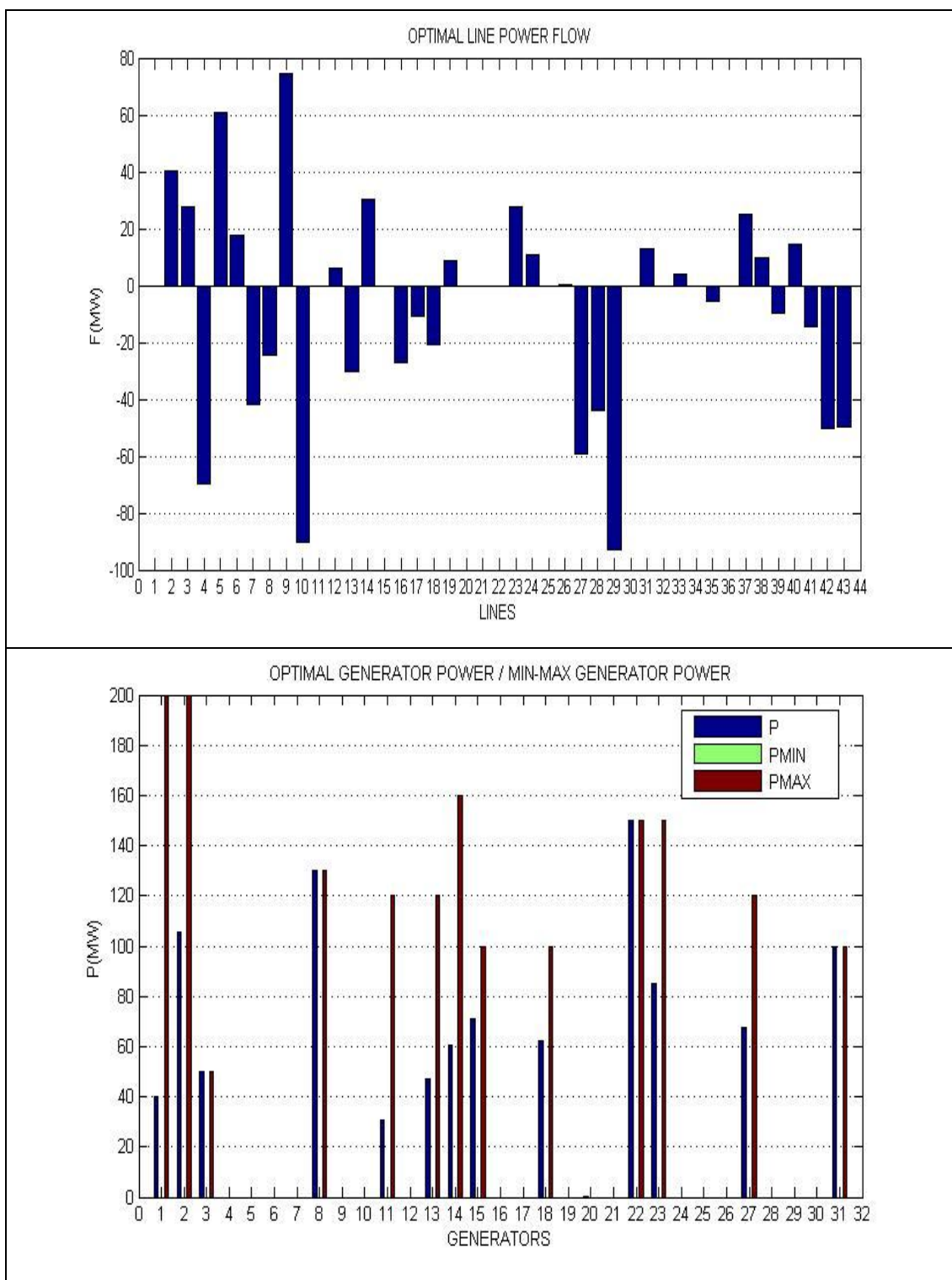
24-25	3.711839	16	3.7118393
25-26	0	16	0
25-27	5.288161	16	-5.288161
28-27	0	65	0
27-29	25.11863	30	25.118627
27-30	9.881373	16	9.8813732
29-30	9.881373	16	-9.881373
8-28	14.60749	32	14.607486
6-28	14.60749	32	-14.60749
10-31	50.18464	100	-50.18464
20-31	49.81536	100	-49.81536
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)			5201.578
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)			86.69323

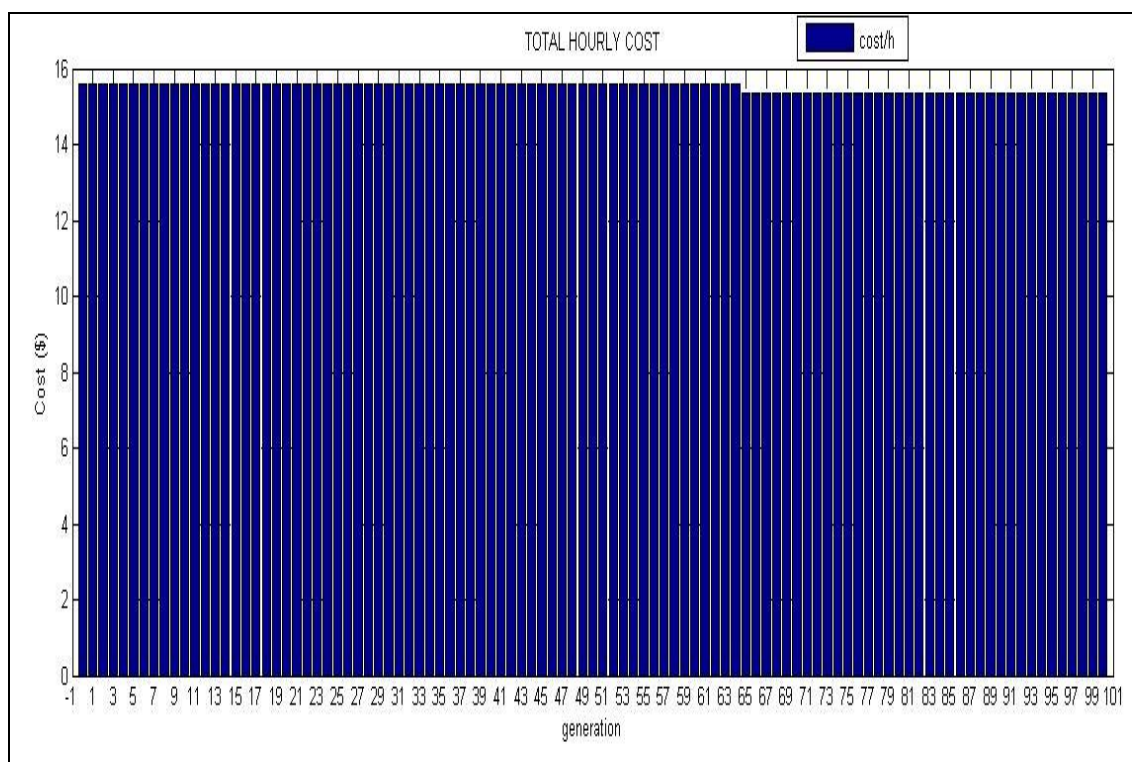
Εδώ η λύση είναι να προστεθούν 2 γραμμές μεταξύ του 31 και του 10 και του 31 και του 20.

Αναλυτικά η πορεία του αλγορίθμου και τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.59.









Σχήμα 5.56 : Διαγράμματα για εξέλιξη γενετικού και αποτελέσματα για T,P,F ,cost για case1-treksimo2

5.3.3.2 Υποπερίπτωση 2

Τα αποτελέσματα του προγράμματος για το **case2** αποθηκεύονται στο αρχείο **results30.xls**. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το treksimo1 του case2 φαίνονται στον Πίνακα 5.53

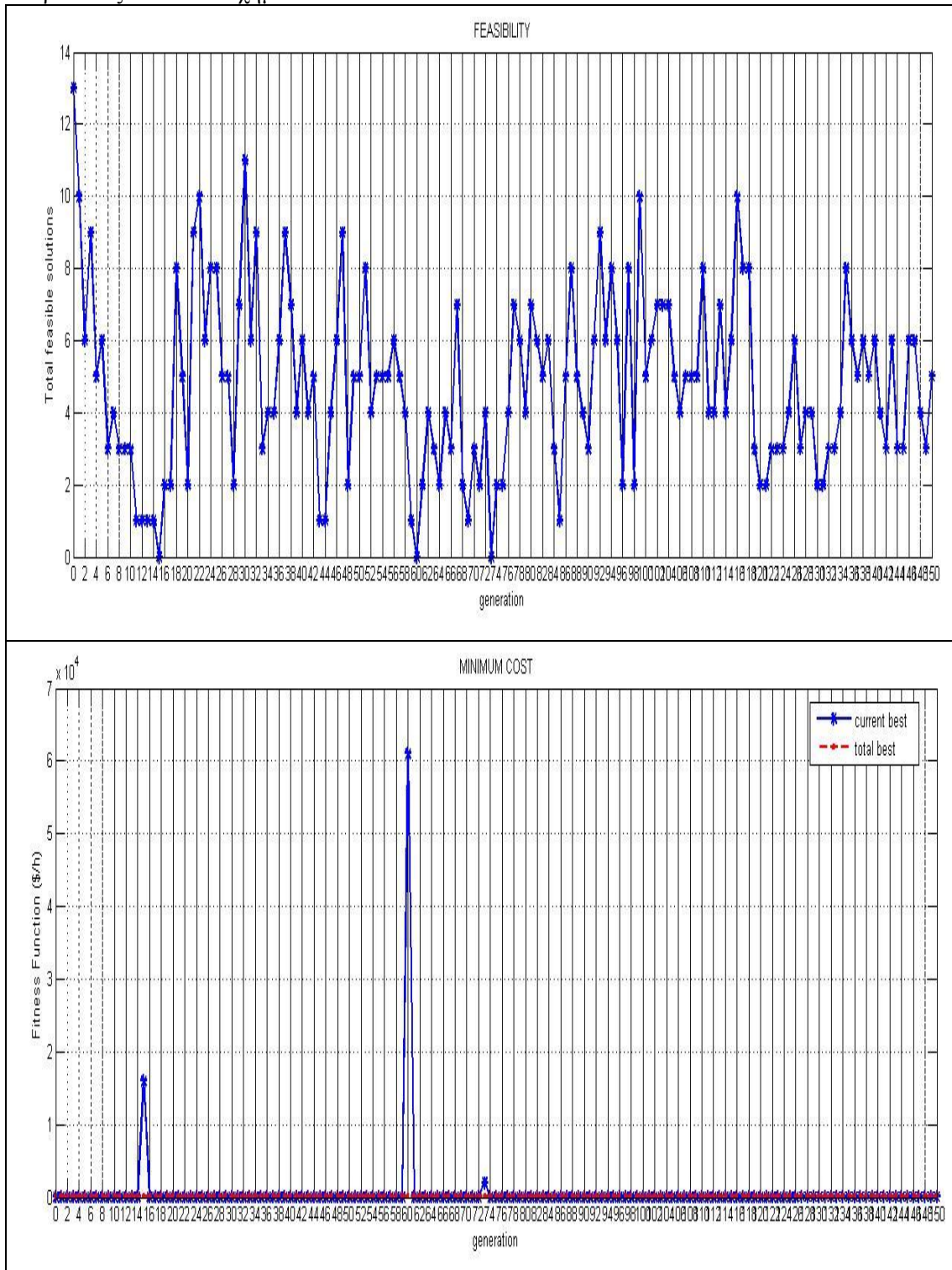
Πίνακας 5.53: Αποτελέσματα για το Case 2- treksimo1

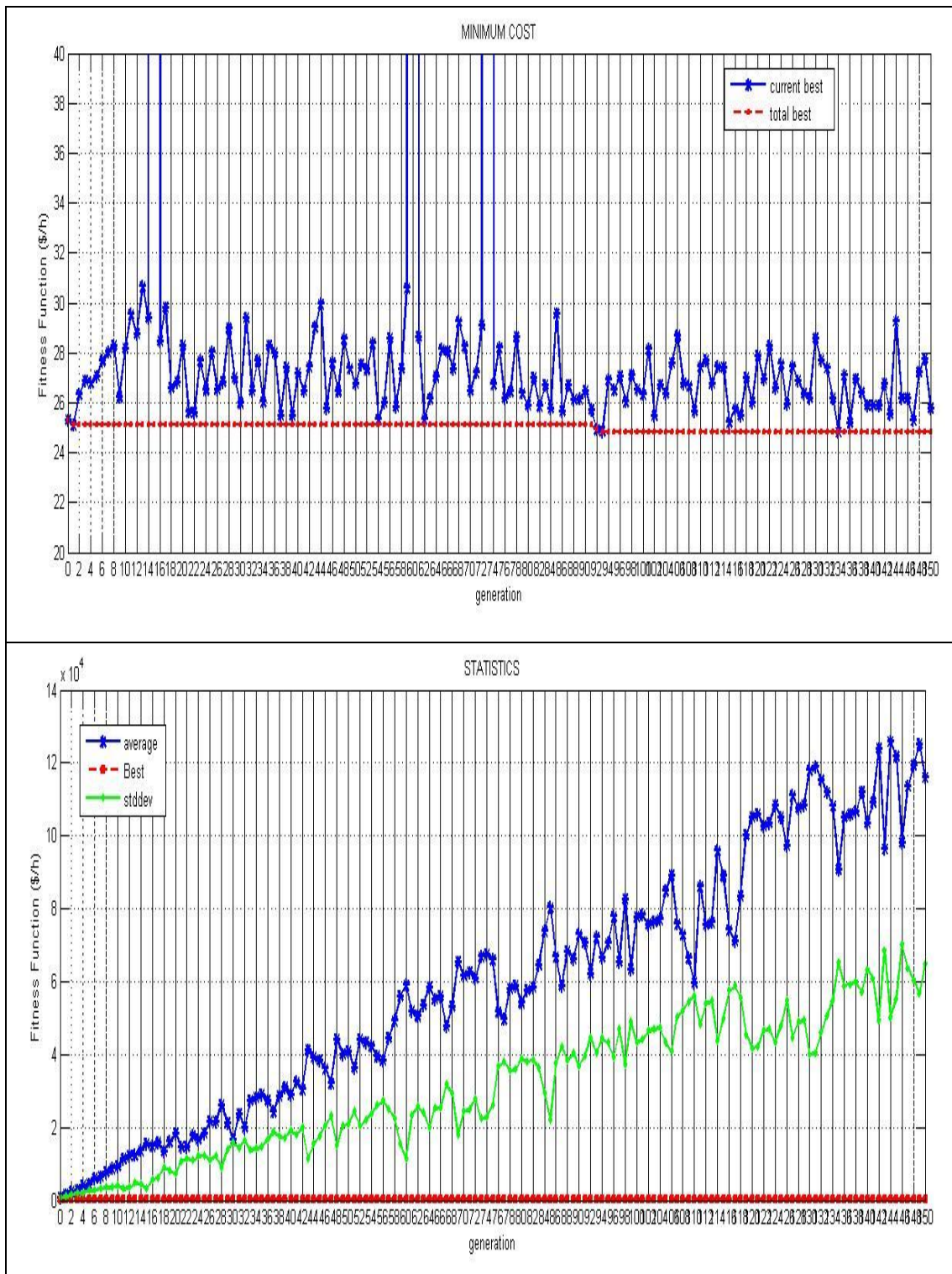
Case 2— treksimo1— results30.xls																		
Υποψήφιες νέες γραμμές	31 1	31 2	32 14	32 23	33 24	33 26	31 4	31 12	31 9	31 6	32 15	32 18	33 25	32 13	32 17	33 27	33 29	33 11
Βέλτιστη λύση (best_chrome)	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)				24.81229367				Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)						217355.6926				
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)		Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)		Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)		Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)		Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)		Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)							
1-2	-5.4E-16		130		1.77E-15		108.065		0		200							
1-3	48.5528		130		48.5528		197.46		0		200							
2-4	38.35998		65		38.35998		50		0		50							
3-4	61.4472		130		-61.4472		1.09E-16		0		0							

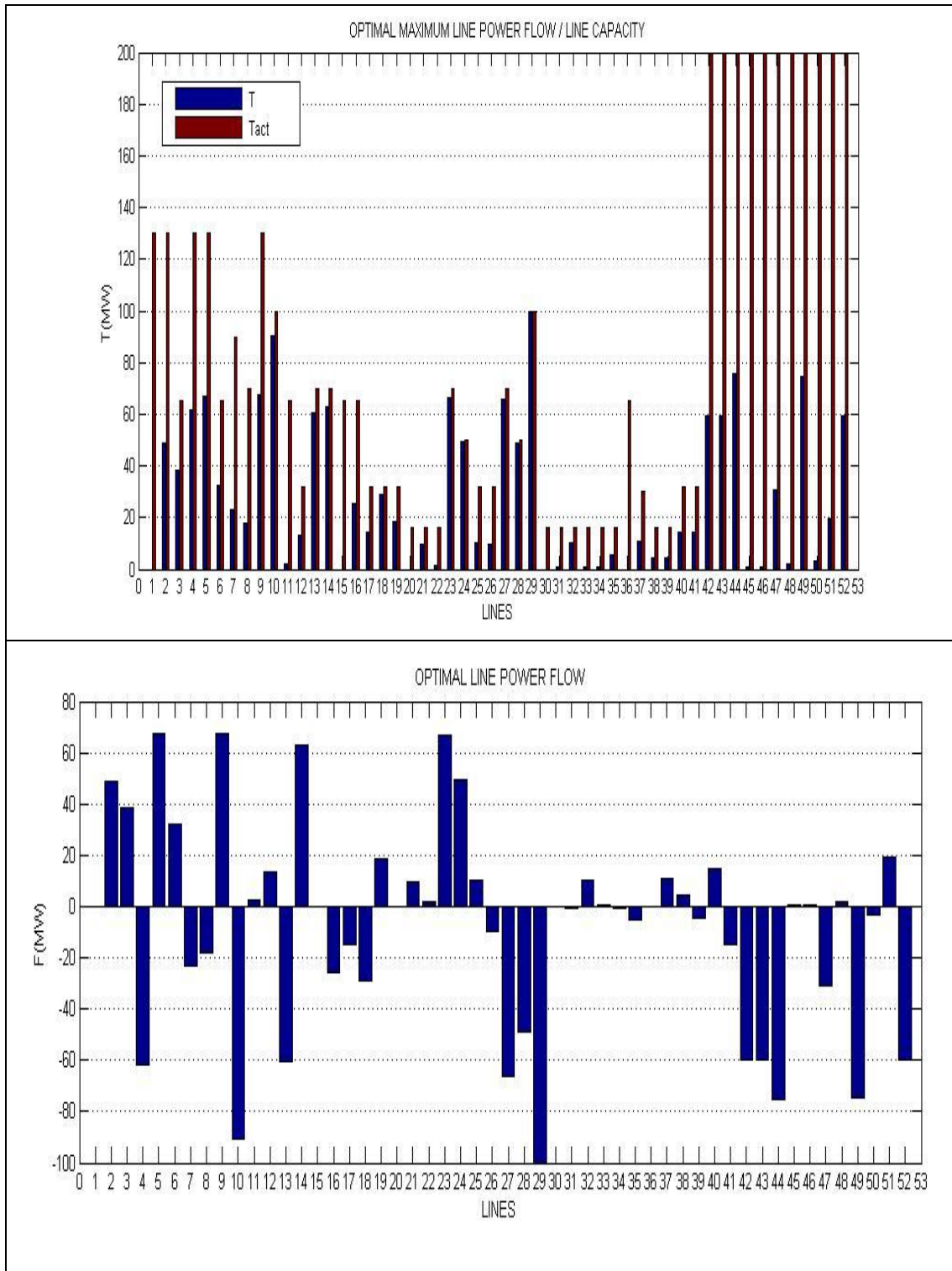
2-5	67.21504	130	67.21504	3.92E-14	0	0
2-6	32.37277	65	32.37277	4.13E-17	0	0
4-6	23.08722	90	-23.0872	3.7E-14	0	0
5-7	17.78496	70	-17.785	130	0	130
6-7	67.78496	130	67.78496	1.26E-17	0	0
6-8	90.39251	100	-90.3925	1.47E-16	0	0
6-9	2.26891	65	2.26891	120	0	120
6-10	13.25607	32	13.25607	-7.2E-17	0	0
9-11	60.44419	70	-60.4442	120	0	120
9-10	62.7131	70	62.7131	140.0468	0	160
4-12	1.35E-16	65	1.95E-16	80.2622	0	100
12-13	25.44036	65	-25.4404	-4.8E-16	0	0
12-14	14.60646	32	-14.6065	-1.4E-17	0	0
12-15	28.66406	32	-28.6641	100	0	100
12-16	18.71088	32	18.71088	-2.6E-19	0	0
14-15	-4.2E-17	16	1.53E-16	-1.6E-17	0	0
16-17	9.71088	16	9.71088	4.58E-16	0	0
15-18	1.598138	16	1.598138	147.9668	0	150
18-19	66.59814	70	66.59814	95.05112	0	150
19-20	49.59814	50	49.59814	-7.6E-17	0	0
10-20	10.40186	32	10.40186	5.49E-16	0	0
10-17	9.71088	32	-9.71088	1.48E-16	0	0
10-21	66	70	-66	51.14812	0	120
10-22	48.72181	50	-48.7218	-6.8E-17	0	0
21-22	100	100	-100	6.94E-16	0	0
15-23	2.51E-17	16	-1.6E-16	2.08E-15	0	0
22-24	0.755054	16	-0.75505	-5.6E-17	0	0
23-24	10.05112	16	10.05112	2.64E-13	0	0
24-25	0.90164	16	0.90164	-6.2E-17	0	0
25-26	0.720578	16	-0.72058			
25-27	5.288106	16	-5.28811			
28-27	7.49E-17	65	-3.4E-16			
27-29	11.07484	30	11.07484			
27-30	4.356713	16	4.356713			
29-30	4.356713	16	-4.35671			
8-28	14.60749	32	14.60749			
6-28	14.60749	32	-14.6075			
31-1	59.5122	200	-59.5122			
31-2	59.5122	200	-59.5122			
32-14	75.44036	200	-75.4404			
33-24	0.605576	200	0.605576			
33-26	0.720578	200	0.720578			
31-6	30.9756	200	-30.9756			
33-25	2.089676	200	2.089676			
32-13	74.55964	200	-74.5596			
33-27	3.428463	200	-3.42846			
33-29	19.56845	200	19.56845			
33-11	59.55581	200	-59.5558			
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)					62649.3	
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)					1044.155	

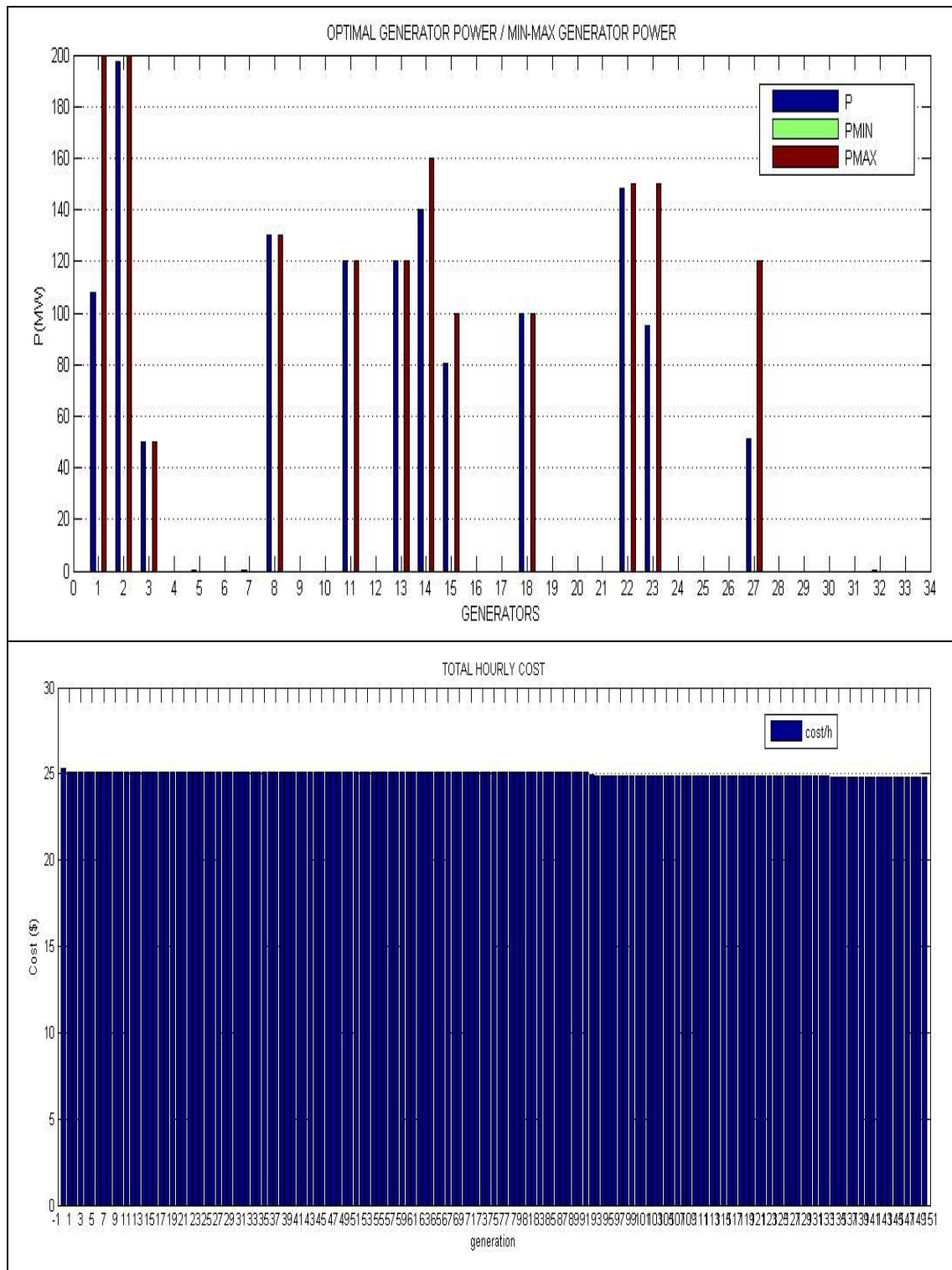
Οι γραμμές που θα προστεθούν είναι οι 31-1, 31-2, 32-14, 33-24, 33-26, 31-6, 33-25 32-13, 33-27, 33-29, 33-11 δηλ. 11 νέες γραμμές.

Αναλυτικά η πορεία του αλγορίθμου και τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.60.









Σχήμα 5.60 : Διαγράμματα για εξέλιξη γενετικού και αποτελέσματα για T,P,F ,cost για case2-treksimol

5.3.3.3 Υποπερίπτωση 3

Τα αποτελέσματα του προγράμματος για το **case3** αποθηκεύονται στο αρχείο **results30.xls**. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το **treksimo1** του **case3** φαίνονται στον Πίνακα 5.54

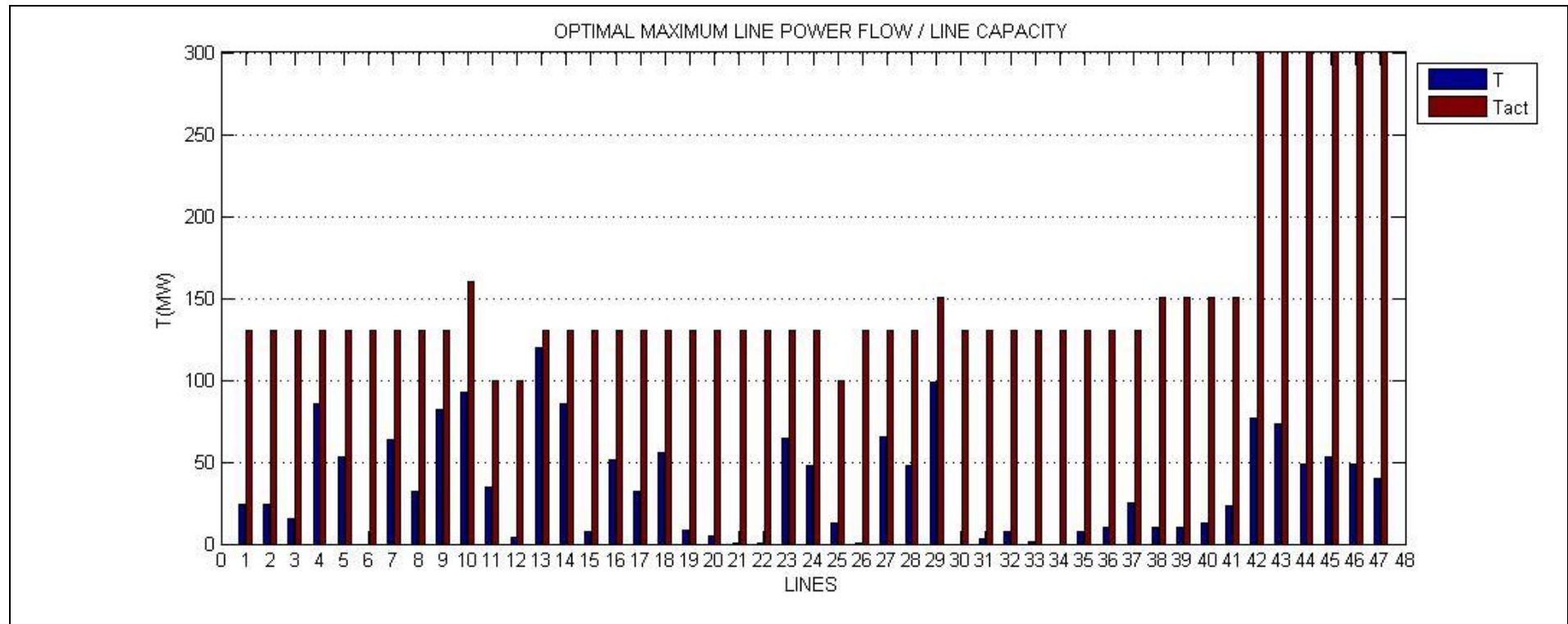
Πίνακας 5.54: Αποτελέσματα για το Case 3- **treksimo1**

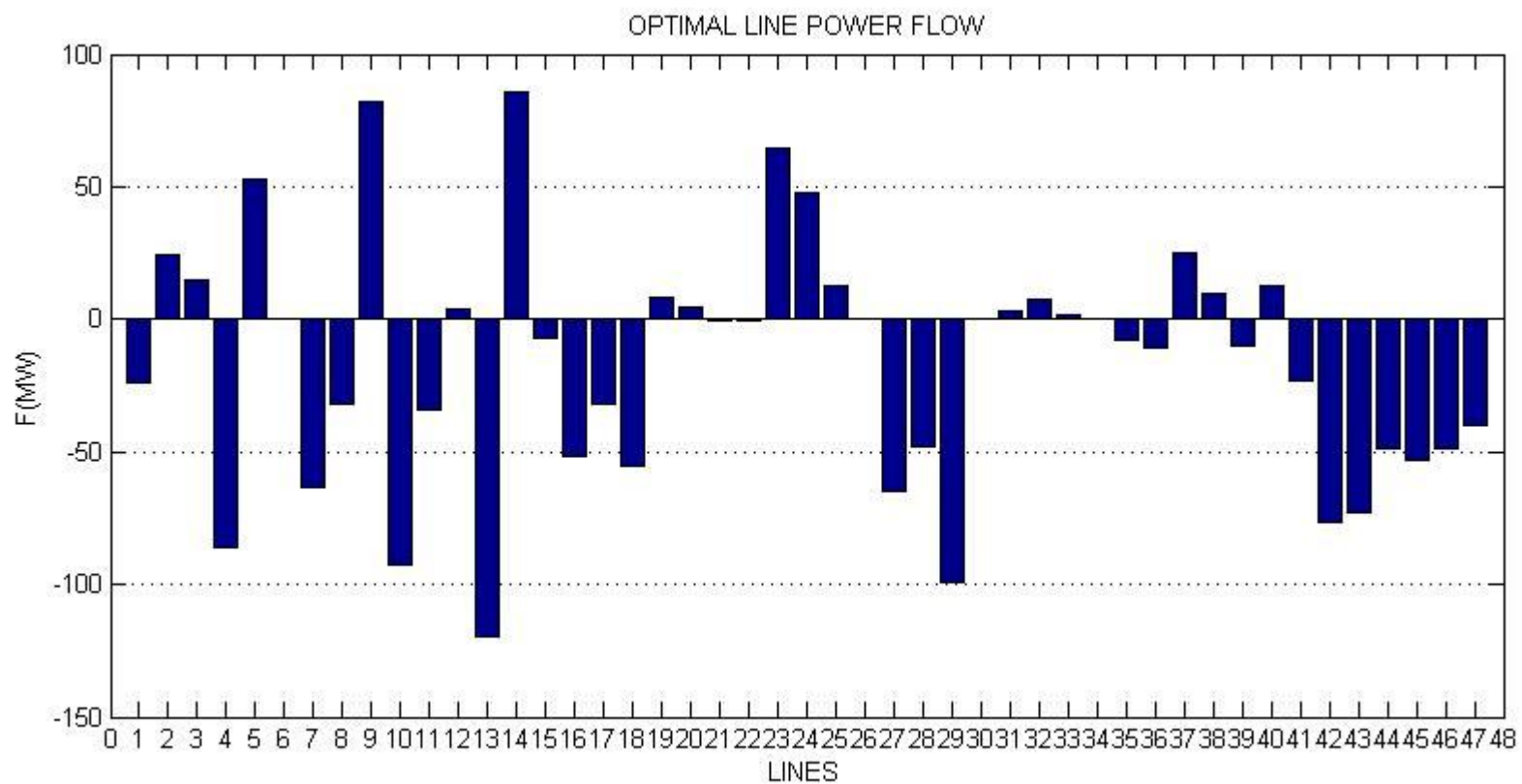
Case 2— treksimo1— results30.xls									
Υποψήφιες νέες γραμμές	31-2	31-12	32-13	32-14	32-23	33-27			
Βέλτιστη λύση (best_chrome)	1	1	1	1	1	1			
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)		865.9931283			Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)		7586099.804		
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)	Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)	Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)			
1-2	24.20718	130	-24.2072	0	0	200			
1-3	24.20718	130	24.20718	168.9995	0	200			
2-4	15.10383	130	15.10383	50	0	50			
3-4	85.79282	130	-85.7928	0	0	0			
2-5	52.81353	130	52.81353	0	0	0			
2-6	0	130	0	0	0	0			
4-6	63.37042	130	-63.3704	0	0	0			
5-7	32.18647	130	-32.1865	130	0	130			
6-7	82.18647	130	82.18647	0	0	0			
6-8	92.46422	160	-92.4642	0	0	0			
6-9	34.26102	100	-34.261	120	0	120			
6-10	4.145673	100	4.145673	0	0	0			
9-11	120	130	-120	120	0	120			
9-10	85.73898	130	85.73898	139.9473	0	160			
4-12	7.318568	130	-7.31857	100	0	100			
12-13	51.59476	130	-51.5948	0	0	0			
12-14	31.96613	130	-31.9661	0	0	0			
12-15	55.39304	130	-55.393	100	0	100			
12-16	8.510311	130	8.510311	0	0	0			
14-15	4.79158	130	4.79158	0	0	0			
16-17	0.489689	130	-0.48969	0	0	0			
15-18	0.601464	130	-0.60146	150	0	150			
18-19	64.39854	130	64.39854	141.0532	0	150			
19-20	47.39854	130	47.39854	0	0	0			
10-20	12.60146	100	12.60146	0	0	0			
10-17	0.489689	130	0.489689	0	0	0			
10-21	65.08557	130	-65.0856	120	0	120			
10-22	48.12094	130	-48.1209	-0	0	0			

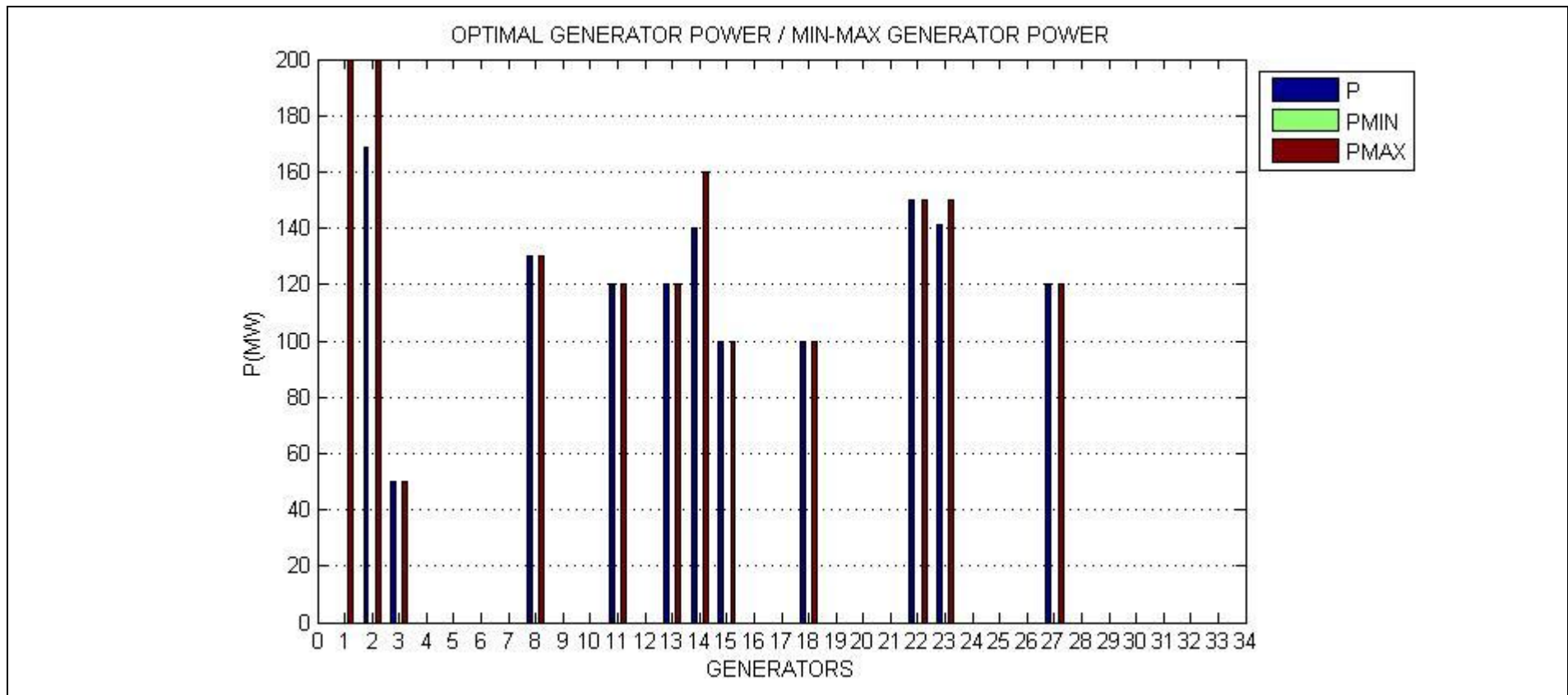
21-22	99.08557	150	-99.0856	0	0	0
15-23	0	130	0	0	0	0
22-24	2.793496	130	2.793496	0	0	0
23-24	7.648047	130	7.648047	0	0	0
24-25	1.441543	130	1.441543	0	0	0
25-26	0	130	0			
25-27	7.558457	130	-7.55846			
28-27	10.44154	130	-10.4415			
27-29	25.11863	130	25.11863			
27-30	9.881373	130	9.881373			
29-30	9.881373	130	-9.88137			
8-28	12.53578	160	12.53578			
6-28	22.97732	100	-22.9773			
31-2	76.87495	300	-76.875			
31-12	73.12505	300	-73.125			
32-13	48.40524	300	-48.4052			
32-14	53.18957	300	-53.1896			
32-23	48.40518	300	-48.4052			
33-27	40	300	-40			
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)					5443.953	
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)					90.7375	

Οι γραμμές που θα προστεθούν είναι οι 31-2, 31-12, 32-13, 32-14, 32-23, 33-27 δηλ. και οι 6 υποψήφιες νέες γραμμές.

Τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.61.







Σχήμα 5.61 : Βασικά Διαγράμματα για τα αποτελέσματα για T,P,F ,cost για case3-treksimo1

Για το treksimo2 έχουμε 18 υποψήφιες γραμμές εν αντιθέσει με προηγουμένως που είχαμε 6. Η λύση που προκύπτει είναι λίγο χειρότερη και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.55.

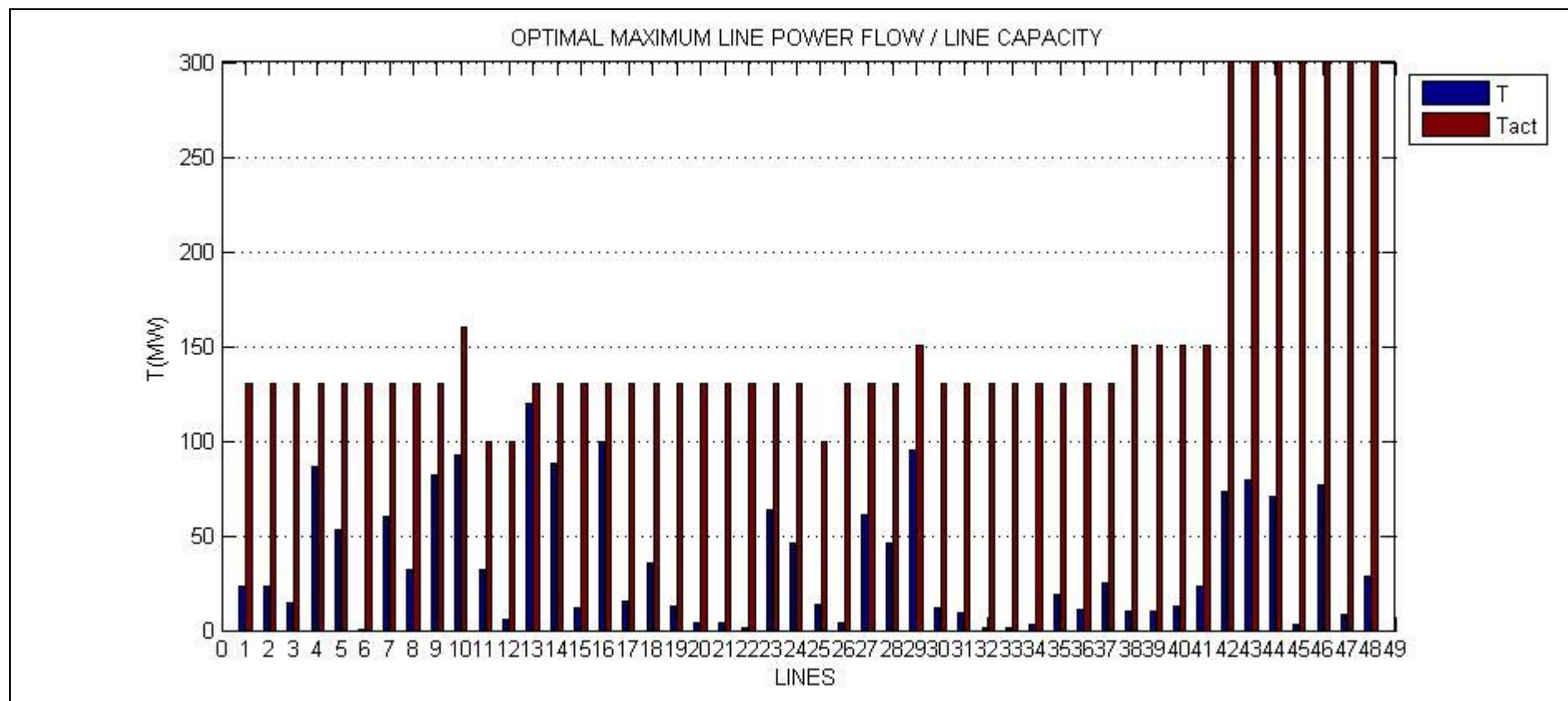
Πίνακας 5.55: Αποτελέσματα για το Case 3- treksimo2

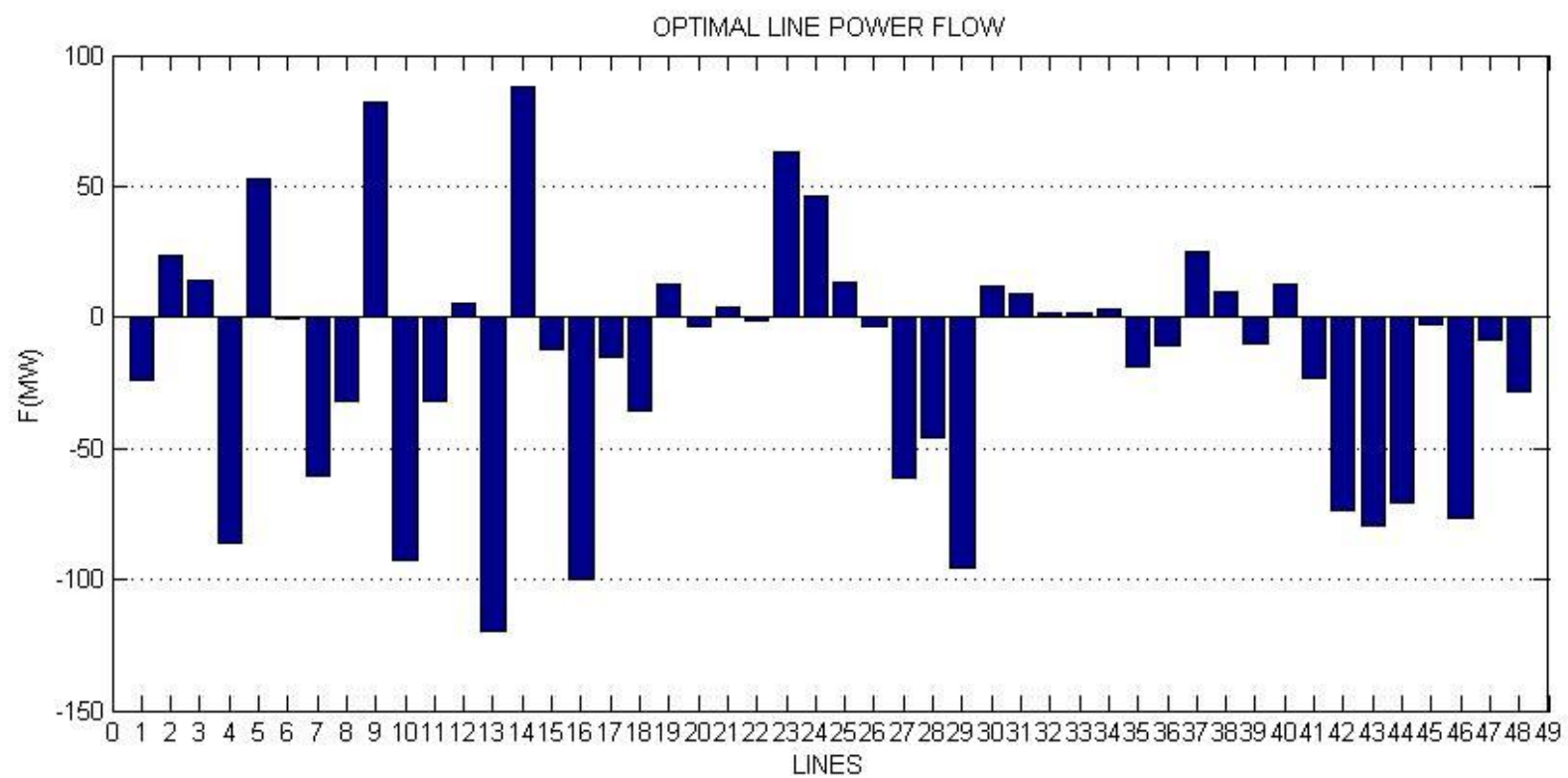
Case 3— treksimo2— results30.xls																		
Υποψήφιες νέες γραμμές	31 1	31 2	32 14	32 23	33 24	33 26	31 4	31 12	31 9	31 6	32 15	32 18	33 25	32 13	32 17	33 27	33 29	33 11
Βέλτιστη λύση (best chrome)	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)				866.7677134				Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)						7592885.17				
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max flow)		Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)		Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)		Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)		Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)		Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)							
1-2	23.63886		130		-23.6389		0		0		200							
1-3	23.63886		130		23.63886		163.9202		0		200							
2-4	14.18574		130		14.18574		50		0		50							
3-4	86.36114		130		-86.3611		0		0		0							
2-5	52.73627		130		52.73627		0		0		0							
2-6	0.173654		130		-0.17365		0		0		0							
4-6	60.25792		130		-60.2579		0		0		0							
5-7	32.26373		130		-32.2637		130		0		130							
6-7	82.26373		130		82.26373		0		0		0							
6-8	92.52437		160		-92.5244		0		0		0							
6-9	32.24775		100		-32.2478		120		0		120							
6-10	5.297149		100		5.297149		0		0		0							
9-11	120		130		-120		120		0		120							
9-10	87.75225		130		87.75225		140.9543		0		160							
4-12	11.91748		130		-11.9175		100		0		100							
12-13	100		130		-100		0		0		0							
12-14	15.30293		130		-15.3029		0		0		0							
12-15	35.67754		130		-35.6775		100		0		100							
12-16	12.59595		130		12.59595		0		0		0							
14-15	3.687186		130		-3.68719		0		0		0							
16-17	3.595952		130		3.595952		0		0		0							
15-18	1.601149		130		-1.60115		150		0		150							
18-19	63.39885		130		63.39885		145.1255		0		150							
19-20	46.39885		130		46.39885		0		0		0							
10-20	13.60115		100		13.60115		0		0		0							
10-17	3.595952		130		-3.59595		0		0		0							
10-21	61.3135		130		-61.3135		120		0		120							
10-22	45.6423		130		-45.6423		0		0		0							
21-22	95.3135		150		-95.3135		0		0		0							
15-23	12.23643		130		12.23643		0		0		0							

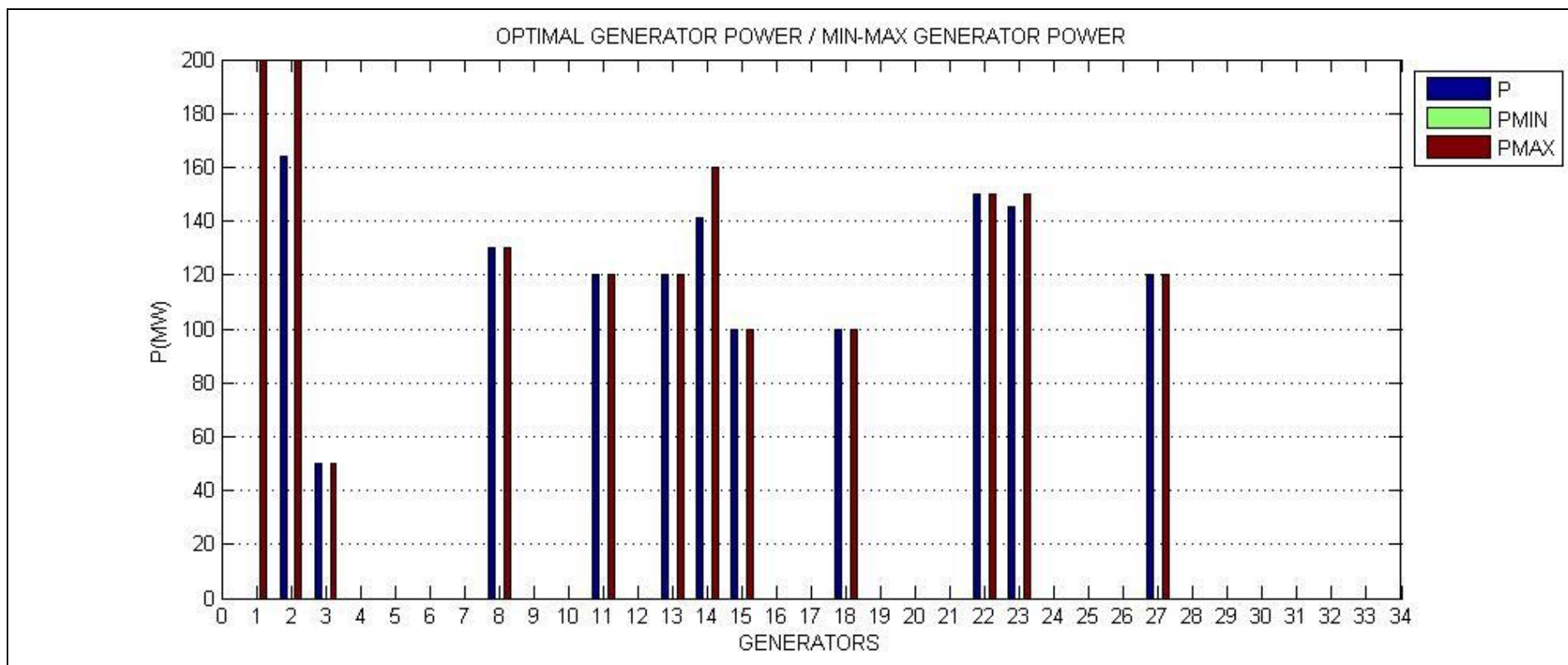
22-24	9.0442	130	9.0442	0	0	0
23-24	1.700503	130	1.700503	0	0	0
24-25	1.744703	130	1.744703	0	0	0
25-26	2.983454	130	2.983454			
25-27	18.89077	130	-18.8908			
28-27	10.7447	130	-10.7447			
27-29	25.11863	130	25.11863			
27-30	9.881373	150	9.881373			
29-30	9.881373	150	-9.88137			
8-28	12.47563	150	12.47563			
6-28	23.22033	150	-23.2203			
31-2	73.53297	300	-73.533			
32-14	79.33857	300	-79.3386			
32-23	70.66143	300	-70.6614			
33-26	2.983454	300	-2.98345			
31-12	76.46703	300	-76.467			
33-25	8.652016	300	-8.65202			
33-27	28.36453	300	-23.6389			
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)					21734.09	
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)					362.2424	

Οι γραμμές που θα προστεθούν είναι οι 31-2, 31-12, 32-14, 32-23, 33-25, 33-26, 33-27 δηλ. και οι 7 υποψήφιες νέες γραμμές.

Τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.62.







Σχήμα 5.62 : Βασικά Διαγράμματα για τα αποτελέσματα για T,P,F ,cost για case3-treksimo2

5.3.3.4 Υποπερίπτωση 4

Τα αποτελέσματα του προγράμματος για το **case4** αποθηκεύονται στο αρχείο **results30.xls**. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το **treksimo1** του **case4** φαίνονται στον Πίνακα 5.56

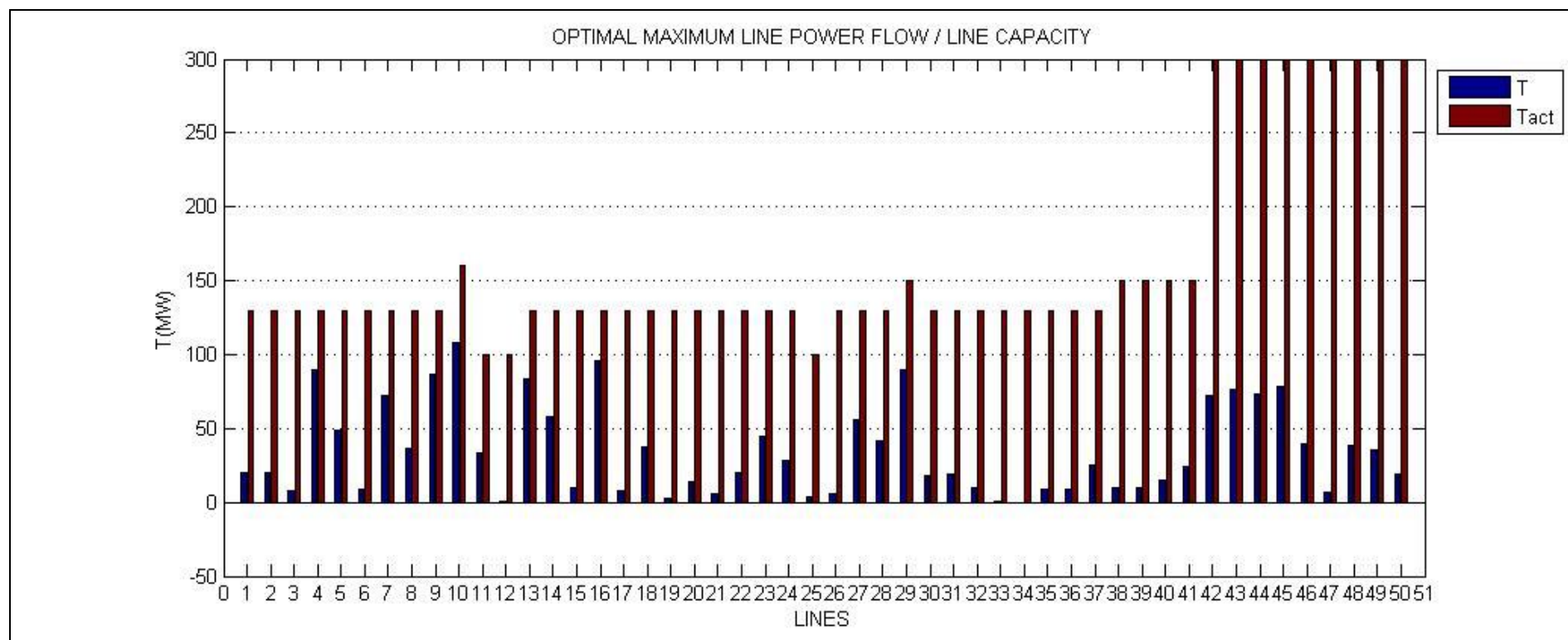
Πίνακας 5.56: Αποτελέσματα για το Case 4- treksimo1

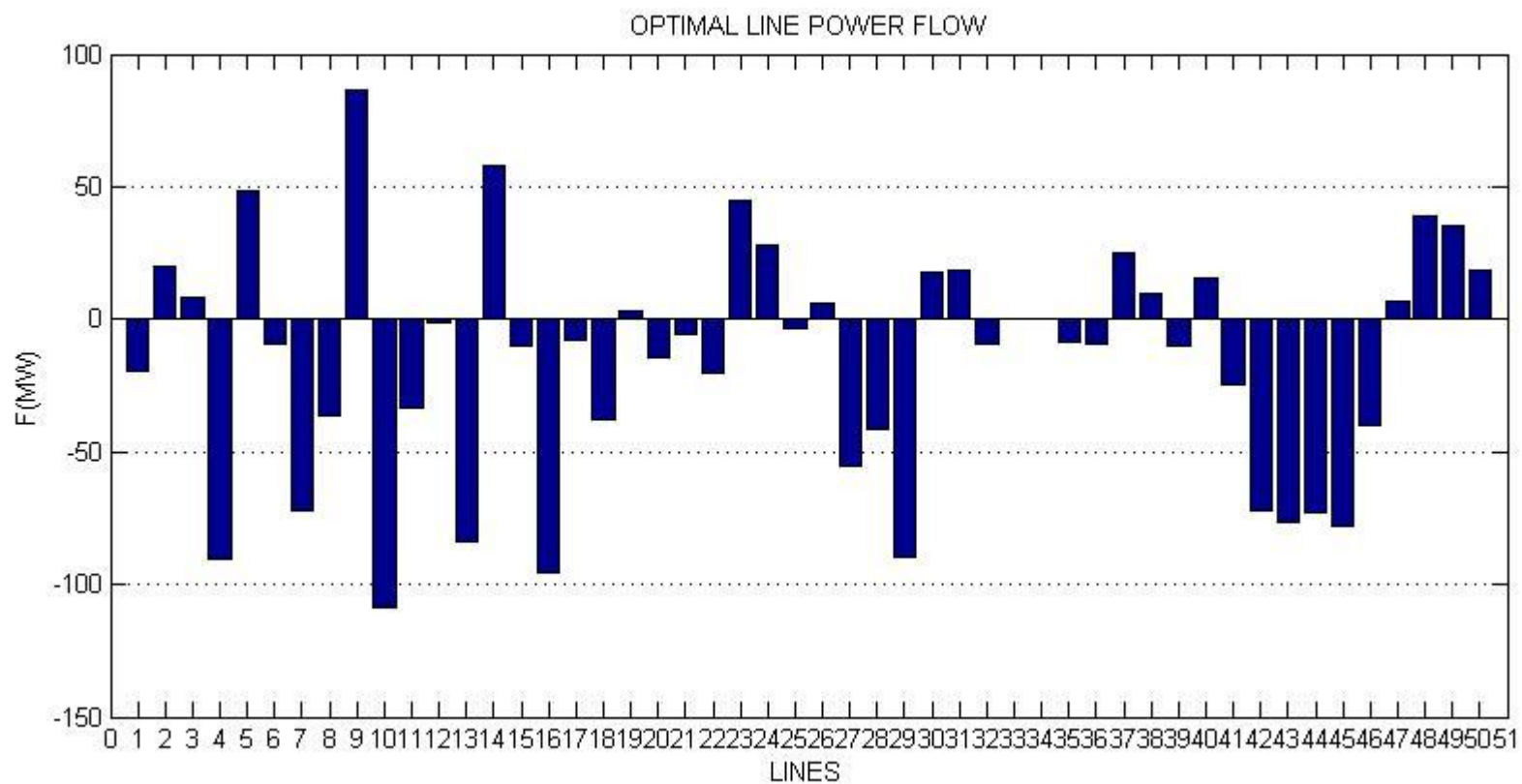
Case 4— treksimo1— results30.xls																
Υποψήφιες νέες γραμμές	31 - 2	32 - 14	32 - 23	33 - 26	31 - 12	33 - 25	33 - 27	34 - 9	34 - 10	34 - 20	34 - 22	34 - 8	34 - 11			
Βέλτιστη λύση (best chrome)	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0			
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)				839.6810958				Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)				7355606.4				
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)		Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)		Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)		Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)		Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)		Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)					
1-2	19.80889		130		-19.8089		0		0		200					
1-3	19.80889		130		19.80889		139.5581		0		200					
2-4	7.998708		130		7.998708		50		0		50					
3-4	90.19111		130		-90.1911		0		0		0					
2-5	48.78769		130		48.78769		0		0		0					
2-6	9.049557		130		-9.04956		0		0		0					
4-6	72.09692		130		-72.0969		0		0		0					
5-7	36.21231		130		-36.2123		130		0		130					
6-7	86.21231		130		86.21231		0		0		0					
6-8	108.4388		160		-108.439		0		0		0					
6-9	33.20539		100		-33.2054		83.78477		0		120					
6-10	1.019979		100		-1.01998		0		0		0					
9-11	83.78477		130		-83.7848		115.539		0		120					
9-10	57.63285		130		57.63285		120.4058		0		160					
4-12	10.09548		130		-10.0955		100		0		100					
12-13	95.53904		130		-95.539		0		0		0					
12-14	7.98468		130		-7.98468		0		0		0					
12-15	37.77485		130		-37.7748		100		0		100					
12-16	3.215413		130		3.215413		0		0		0					
14-15	14.43445		130		-14.4345		0		0		0					
16-17	5.784587		130		-5.78459		0		0		0					
15-18	20.15379		130		-20.1538		150		0		150					
18-19	44.84621		130		44.84621		130.7123		0		150					
19-20	27.84621		130		27.84621		0		0		0					
10-20	3.226281		100		-3.22628		0		0		0					
10-17	5.784587		130		5.784587		0		0		0					
10-21	55.42257		130		-55.4226		120		0		120					
10-22	41.77133		130		-41.7713		0		0		0					
21-22	89.42257		150		-89.4226		0		0		0					
15-23	17.94449		130		17.94449		0		0		0					

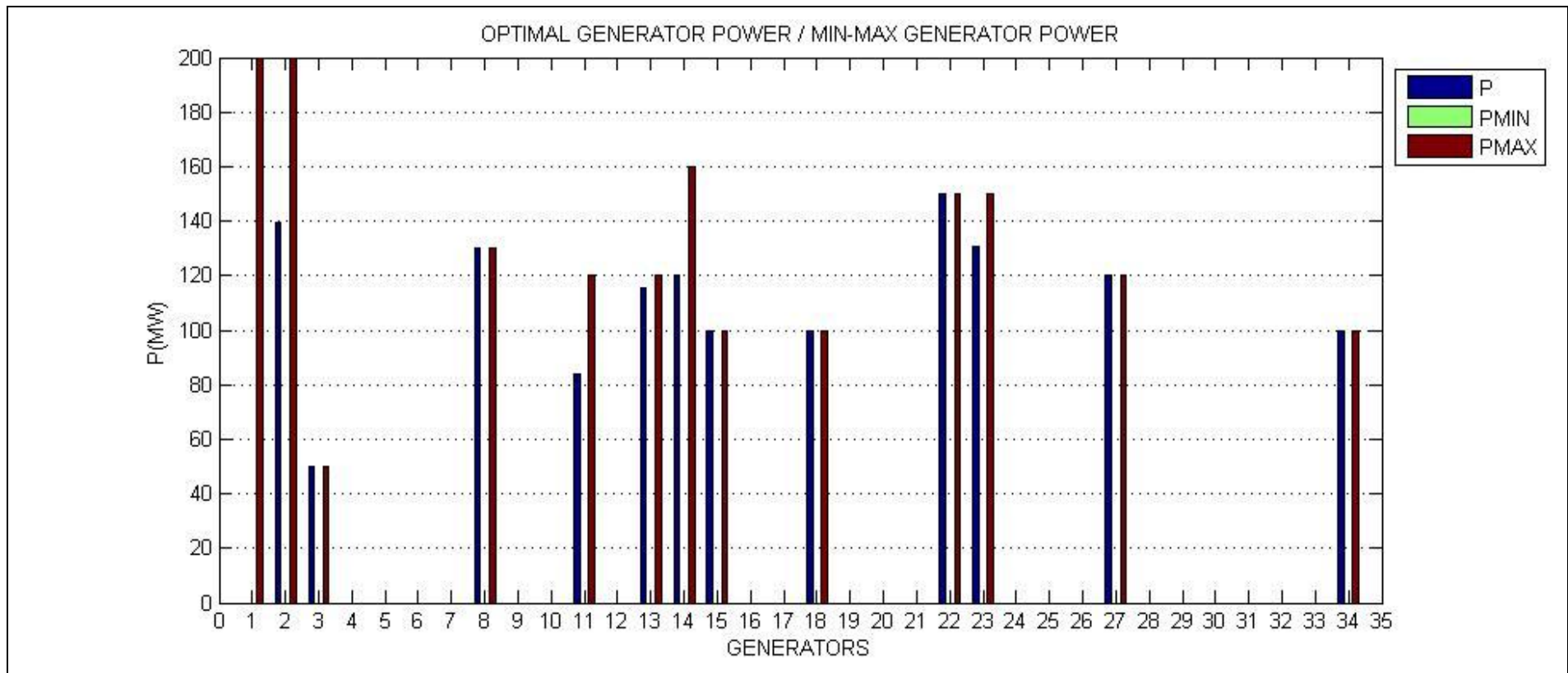
22-24	18.8061	130	18.8061	0	0	0
23-24	9.487613	130	-9.48761	0	0	0
24-25	0.318485	130	0.318485	0	0	0
25-26	-1.7E-17	130	-3.5E-18	100	0	100
25-27	8.681515	130	-8.68152			
28-27	9.318485	130	-9.31848			
27-29	25.11863	130	25.11863			
27-30	9.881373	150	9.881373			
29-30	9.881373	150	-9.88137			
8-28	15.37612	150	15.37612			
6-28	24.6946	150	-24.6946			
31-2	72.01233	300	-72.0123			
32-14	76.85557	300	-76.8556			
32-23	73.14443	300	-73.1444			
31-12	77.98767	300	-77.9877			
33-27	40	300	-40			
34-9	7.053469	300	7.053469			
34-10	38.75153	300	38.75153			
34-20	35.38007	300	35.38007			
34-8	18.81493	300	18.81493			
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)					29377.24	
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)					489.6297	

Οι γραμμές που θα προστεθούν είναι οι 31-2, 31-12, 32-14, 32-23, 33-27, 34-9, 34-10, 34-20, 34-8 δηλ. και 9 νέες γραμμές.

Τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.63.







Σχήμα 5.63 : Βασικά Διαγράμματα για τα αποτελέσματα για T,P,F ,cost για case4-treksimo1

Για το treksimo2-2p τα αποτελέσματα βρίσκονται στο **results302p.xls** και φαίνονται στον Πίνακα 5.57.

Πίνακας 5.57: Αποτελέσματα για το Case 4- treksimo2-2p

Case 4— treksimo2-2p — results302p.xls																		
Υποψήφιες νέες γραμμές	31 - 1	31 - 2	31 - 12	32 - 1	32 - 14	32 - 23	33 - 11	33 - 27	34 - 8	34 - 9	34 - 10	34 - 20	34 - 24					
Βέλτιστη λύση (best_chrome)	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0					
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)				1116.915359			Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)				9784178.543							
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)		Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)		Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow) 2 περίοδοι 2190h6570h				Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen) 2 περίοδοι 2190h6570h				Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)		Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)			
	1-2		70.15379		130		-70.1538		-29.3666		0		200		0		200	
	1-3		5.844513		130		-2.80835		5.844513		170.7039		200		0		200	
	2-4		6.773238		130		-4.38515		-6.77324		50		50		0		50	
	3-4		112.8084		130		-112.808		-104.155		0		0		0		0	
	2-5		42.66445		130		42.66445		42.15169		0		0		0		0	
	2-6		23.96646		130		-22.8138		-23.9665		0		0		0		0	
	4-6		78.75311		130		-78.7531		-73.6419		0		0		0		0	
	5-7		42.84831		130		-42.3356		-42.8483		130		130		0		130	
	6-7		92.84831		130		92.33555		92.84831		0		0		0		0	
	6-8		129.1917		160		-129.192		-127.986		0		0		0		0	
	6-9		24.1933		100		-21.6855		-24.1933		80.16799		120		0		120	
	6-10		1.834948		100		-1.83495		-1.68438		0		0		0		0	

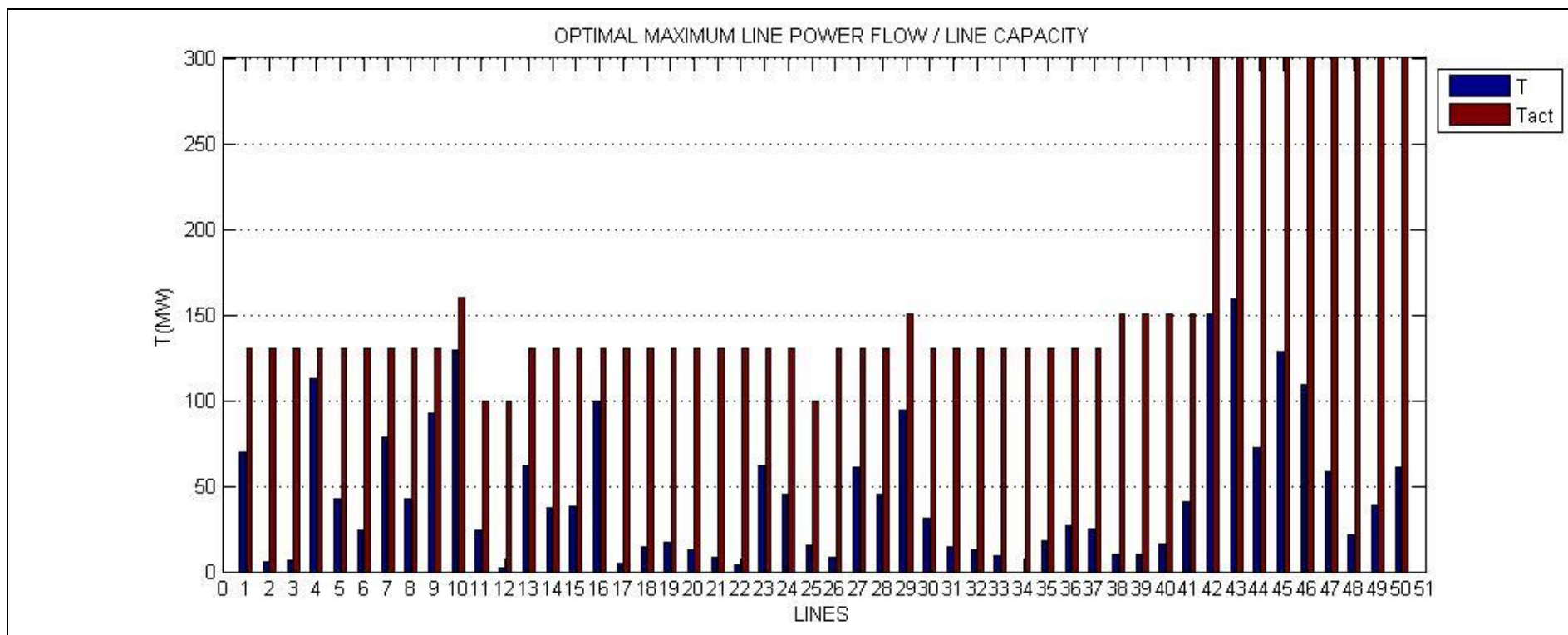
9-11	61.42685	130	-53.416	-61.4269	114.079	120	0	120
9-10	37.23355	130	31.73052	37.23355	111.8758	160	0	160
4-12	38.4404	130	-38.4404	-37.2868	100	100	0	100
12-13	100	130	-94.079	-100	0	0	0	0
12-14	5.232874	130	2.844779	5.232874	0	0	0	0
12-15	14.12349	130	-14.1235	-9.43704	100	100	0	100
12-16	16.91736	130	16.91736	16.91736	0	0	0	0
14-15	12.86771	130	-12.8677	-12.8677	0	0	0	0
16-17	7.917363	130	7.917363	7.917363	0	0	0	0
15-18	3.783061	130	-2.80481	-3.78306	150	150	0	150
18-19	62.19519	130	62.19519	61.21694	113.1733	150	0	150
19-20	45.19519	130	45.19519	44.21694	0	0	0	0
10-20	15.78306	100	14.80481	15.78306	0	0	0	0
10-17	7.917363	130	-7.91736	-7.91736	0	0	0	0
10-21	60.72303	130	-60.723	-57.8518	120	120	0	120
10-22	45.25429	130	-45.2543	-43.3676	0	0	0	0
21-22	94.72303	150	-94.723	-91.8518	0	0	0	0
15-23	31.47831	130	25.8136	31.47831	0	0	0	0
22-24	14.78068	130	10.02267	14.78068	0	0	0	0
23-24	12.67761	130	-10.378	-12.6776	0	0	0	0
24-25	9.355371	130	-9.35537	-6.89693	0	0	0	0
25-26	6.05E-15	130	6.06E-15	6.05E-15	100	100	0	100
25-27	18.35537	130	-18.3554	-15.8969				
28-27	26.39658	130	-26.3966	-20.6762				
27-29	25.11863	130	25.11863	25.11863				
27-30	9.881373	150	9.881373	9.881373				
29-30	9.881373	150	-9.88137	-9.88137				
8-28	15.91723	150	14.79375	15.91723				
6-28	41.19033	150	-41.1903	-36.5935				
31-1	150.7786	300	-64.9154	-150.779				
31-2	159.2214	300	-85.0846	-159.221				

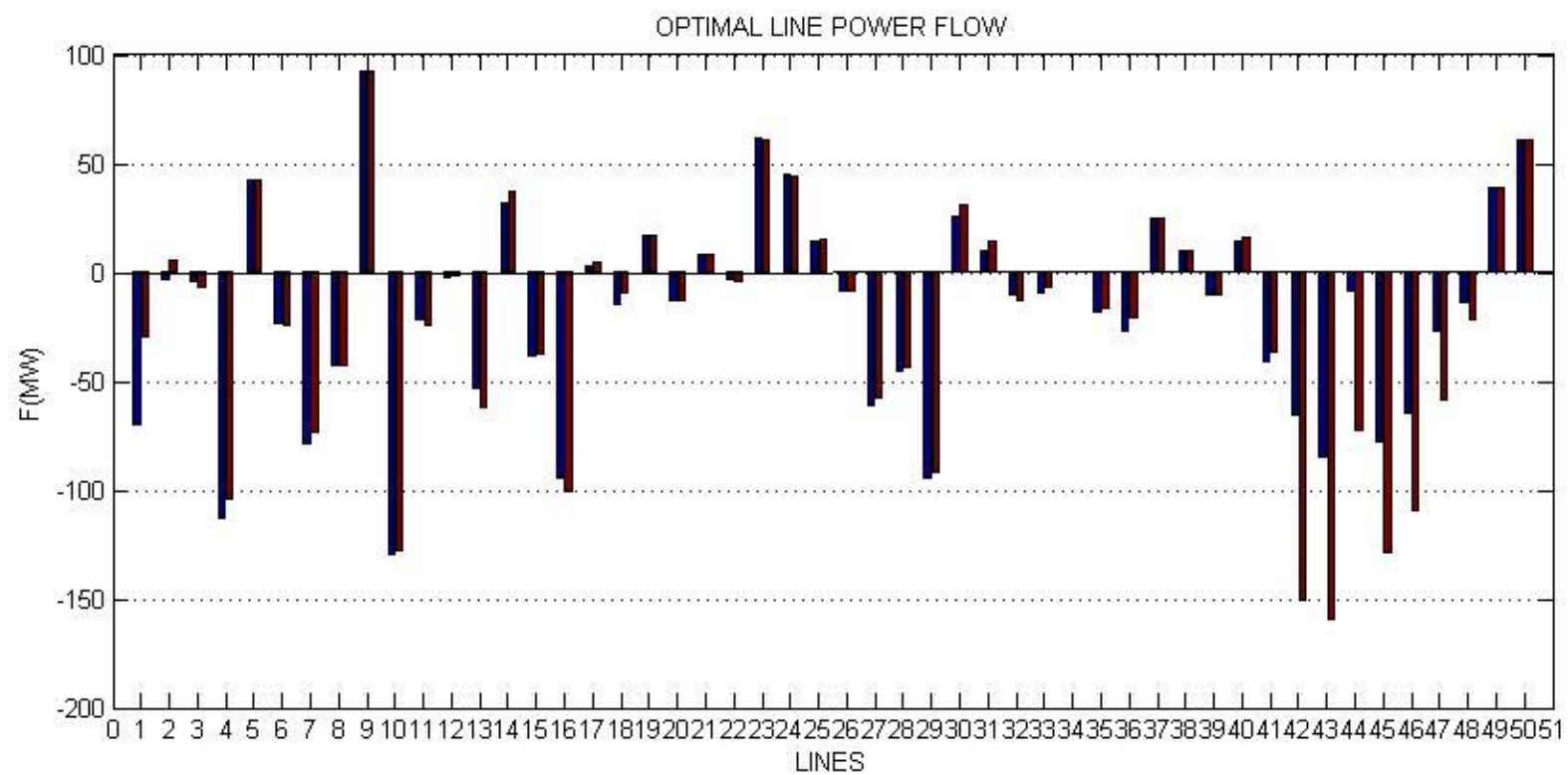
32-1	72.7435	300	-8.04675	-72.7435
32-14	128.1006	300	-77.5883	-128.101
32-23	109.1559	300	-64.365	-109.156
33-11	58.57315	300	-26.7519	-58.5731
33-27	21.42685	300	-13.2481	-21.4269
34-8	38.98545	300	38.98545	38.9028
34-10	61.0972	300	61.01455	61.0972
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)				144365.1
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)				2406.092

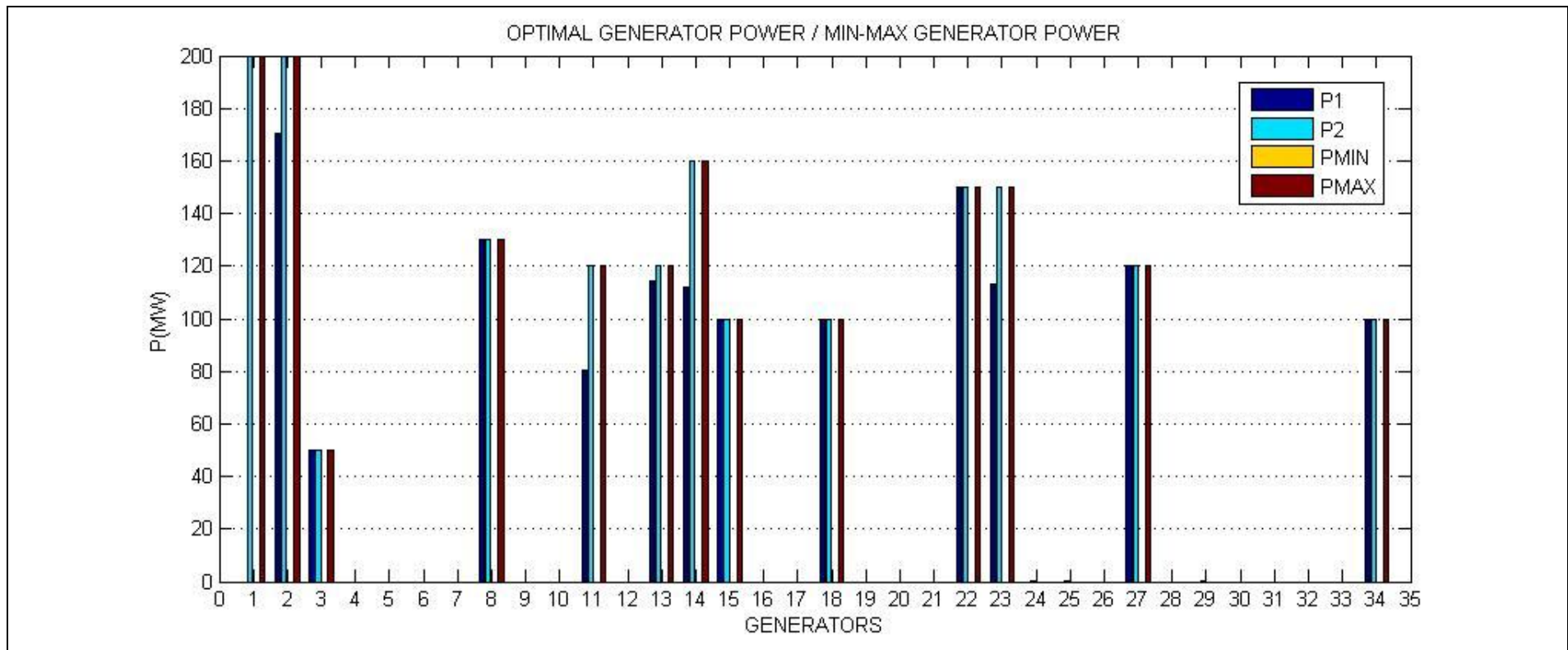
Στην περίπτωση αυτή στην πρώτη περίοδο έχουμε μελλοντική ζήτηση ίση με περίπου maximum/2 (1340MW) της μέγιστης παραγωγής και στη 2^η περίοδο ίση με το maximum (1700MW).

Οι γραμμές που θα προστεθούν είναι οι 31-1, 31-2, 32-1, 32-14, 32-23, 33-11, 33-27, 34-8, 34-10 δηλ. και 9 νέες γραμμές.

Τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.64.







Σχήμα 5.64 : Βασικά Διαγράμματα για τα αποτελέσματα για T,P,F ,cost για case4-treksimo2-2p

Για το treksimo3-3p τα αποτελέσματα βρίσκονται στο **results303p.xls** και φαίνονται στον Πίνακα 5.58.

Πίνακας 5.58: Αποτελέσματα για το Case 4- treksimo3-3p

Case 4— treksimo3-3p — results303p.xls																	
Υποψήφιες νέες γραμμές	31 - 1	31 - 2	31 - 12	32 - 1	32 - 14	32 - 23	33 - 11	34 - 10	34 - 24								
Βέλτιστη λύση (best_chrome)	1	1	0	1	1	1	1	1	1								
Βέλτιστο ωριαίο κόστος σε \$ (opt_h_cost)			1124.552028			Βέλτιστο ετήσιο κόστος σε \$ (opt_y_cost)			9851075.768								
Συνολικές Γραμμές Βέλτιστου Δικτύου	Βέλτιστη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (opt_max_flow)	Πραγματική Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε MW (capacity)	Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε MW (opt_line_flow)			Βέλτιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (opt_power_gen)			Ελάχιστη παραγωγή γεννητριών σε MW (PMIN)	Μέγιστη Παραγωγή γεννητριών σε MW (PMAX)							
			2190h	2820h	3750h	2190h	3 περιόδοι 2820h	3750h									
1-2	61.04035	130	-61.0404	-24.6274	-38.63	0	200	200	0	200							
1-3	7.783209	130	-4.68296	7.783209	-4.79867	146.5896	200	200	0	200							
2-4	17.37684	130	-9.80972	-5.85198	-17.3768	50	50	50	0	50							
3-4	114.7987	130	-114.683	-102.217	-114.799	0	0	0	0	0							
2-5	43.53694	130	40.11934	43.53694	35.99644	0	0	0	0	0							
2-6	37.80267	130	-28.5349	-20.8526	-37.8027	0	0	0	0	0							
4-6	88.07378	130	-80.3565	-64.247	-88.0738	0	0	0	0	0							
5-7	49.00356	130	-44.8807	-41.4631	-49.0036	130	130	130	0	130							
6-7	99.00356	130	94.88066	91.46306	99.00356	0	10	0	0	0							
6-8	98.66253	160	-98.6625	-98.3271	-98.6487	0	0	0	0	0							
6-9	64.89365	100	-46.3872	-25.1189	-64.8936	120	120	120	0	120							
6-10	13.37442	100	-10.7035	-6.45289	-13.3744	0	0	0	0	0							

9-11	120	130	-80	-40	-120	107.1876	120	120	0	120
9-10	55.10635	130	33.61283	14.88112	55.10635	110.0969	160	160	0	160
4-12	44.13618	130	-44.1362	-43.8218	-44.1017	100	100	100	0	100
12-13	100	130	-87.1876	-100	-100	0	0	0	0	0
12-14	11.09923	130	2.665237	4.137388	11.09923	0	0	0	0	0
12-15	19.10225	130	-19.1022	-13.6394	-10.883	100	100	100	0	100
12-16	15.68022	130	9.48842	15.68022	5.682002	0	0	0	0	0
14-15	21.32915	130	-15.8887	-14.208	-21.3292	0	0	0	0	0
16-17	6.680219	130	0.48842	6.680219	-3.318	0	0	0	0	0
15-18	12.04939	130	-7.4309	-3.84931	-12.0494	150	150	150	0	150
18-19	61.15069	130	57.5691	61.15069	52.95061	106.1259	150	150	0	150
19-20	44.15069	130	40.5691	44.15069	35.95061	0	0	0	0	0
10-20	24.04939	100	19.4309	15.84931	24.04939	0	0	0	0	0
10-17	6.680219	130	-0.48842	-6.68022	3.317998	0	0	0	0	0
10-21	69.1504	130	-67.3705	-69.1504	-63.4393	120	120	120	0	120
10-22	50.79196	130	-49.6224	-50.792	-47.0392	0	0	0	0	0
21-22	103.1504	150	-101.37	-103.15	-97.4393	0	0	0	0	0
15-23	29.83729	130	22.43998	26.00188	29.83729	0	0	0	0	0
22-24	5.52156	130	-0.99284	-3.94236	5.52156	0	0	0	0	0
23-24	38.75259	130	-28.2854	-25.2683	-38.7526	0	0	0	0	0
24-25	9.009161	130	-7.31856	-9.00916	-7.38806	0	0	0	0	0
25-26	1.09E-14	130	-4.2E-17	-1.1E-14	-1.6E-14	100	100	100	0	100
25-27	18.00916	130	-16.3186	-18.0092	-16.3881					
28-27	41.68144	130	-41.6814	-39.9908	-41.6119					
27-29	25.11863	130	25.11863	25.11863	25.11863					
27-30	9.881373	150	9.881373	9.881373	9.881373					
29-30	9.881373	150	-9.88137	-9.88137	-9.88137					
8-28	6.672901	150	6.337468	6.672901	6.351257					
6-28	48.01891	150	-48.0189	-46.6637	-47.9632					
31-1	169.4469	300	-66.2254	-151.46	-169.447					
31-2	180.5531	300	-83.7746	-158.54	-180.553					

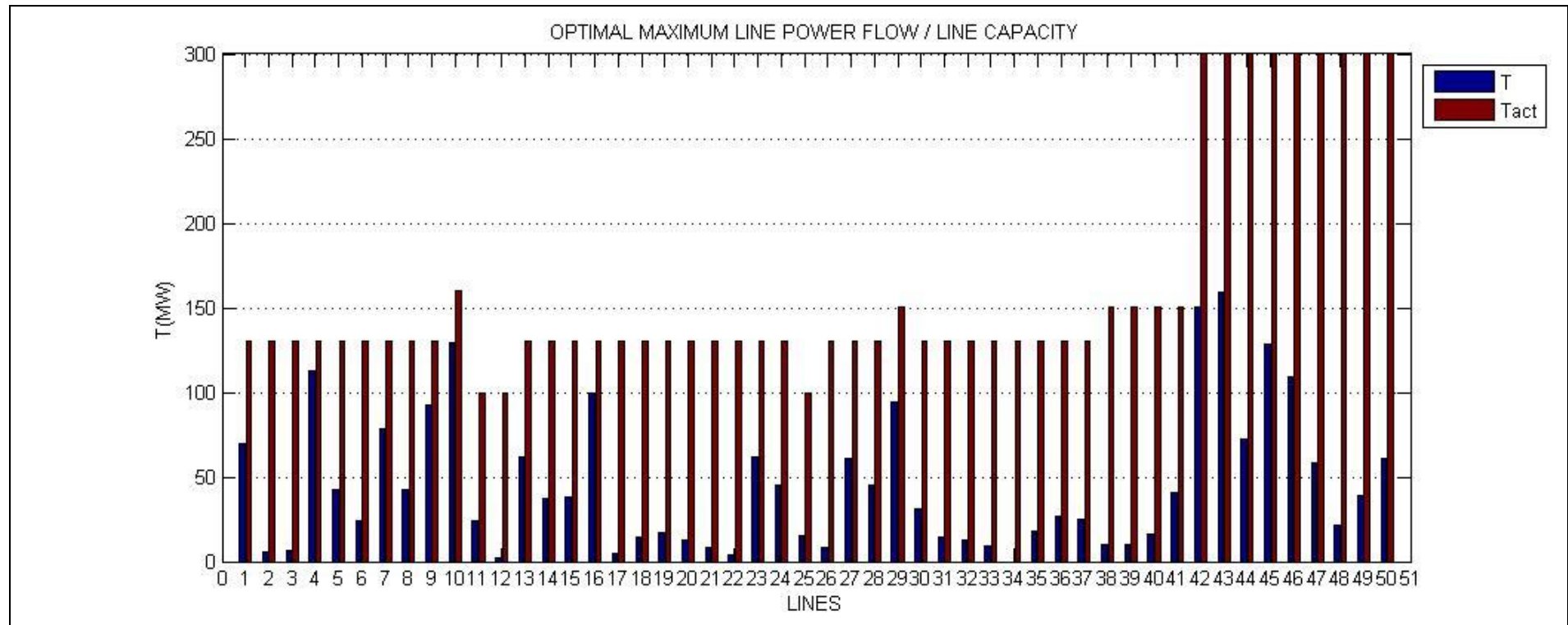
32-1	73.98174	300	0.502141	-65.3844	-73.9817
32-14	142.4284	300	-78.6508	-128.345	-142.428
32-23	133.5899	300	-71.8513	-116.27	-133.59
33-11	80	300	-40	-80	-2.1E-15
34-10	70.7985	300	69.04027	70.7985	65.15703
34-24	34.84297	300	30.95973	29.2015	34.84297
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα (duration_sec)					68875.22
Διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου σε λεπτά (duration_min)					1147.93

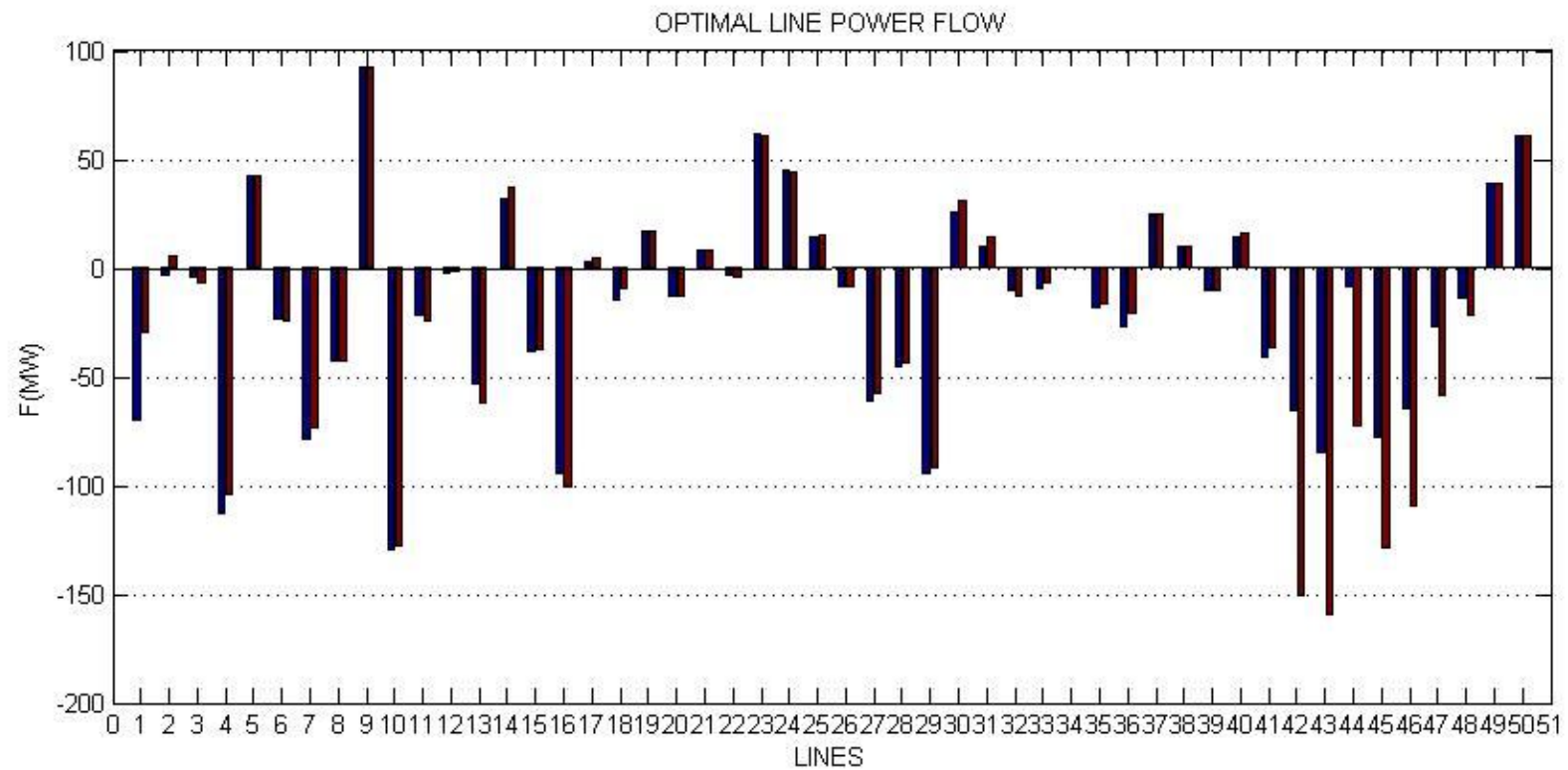
Στην περίπτωση αυτή στην πρώτη περίοδο έχουμε μελλοντική ζήτηση ίση με περίπου maximum/2 (1340MW) της μέγιστης παραγωγής και στη 2^η περίοδο ίση με το maximum (1700MW), όπως και στην 3^η περίοδο έχουμε maximum αλλά διαφορετικά κατανεμημένη στους ζυγούς φορτίου..

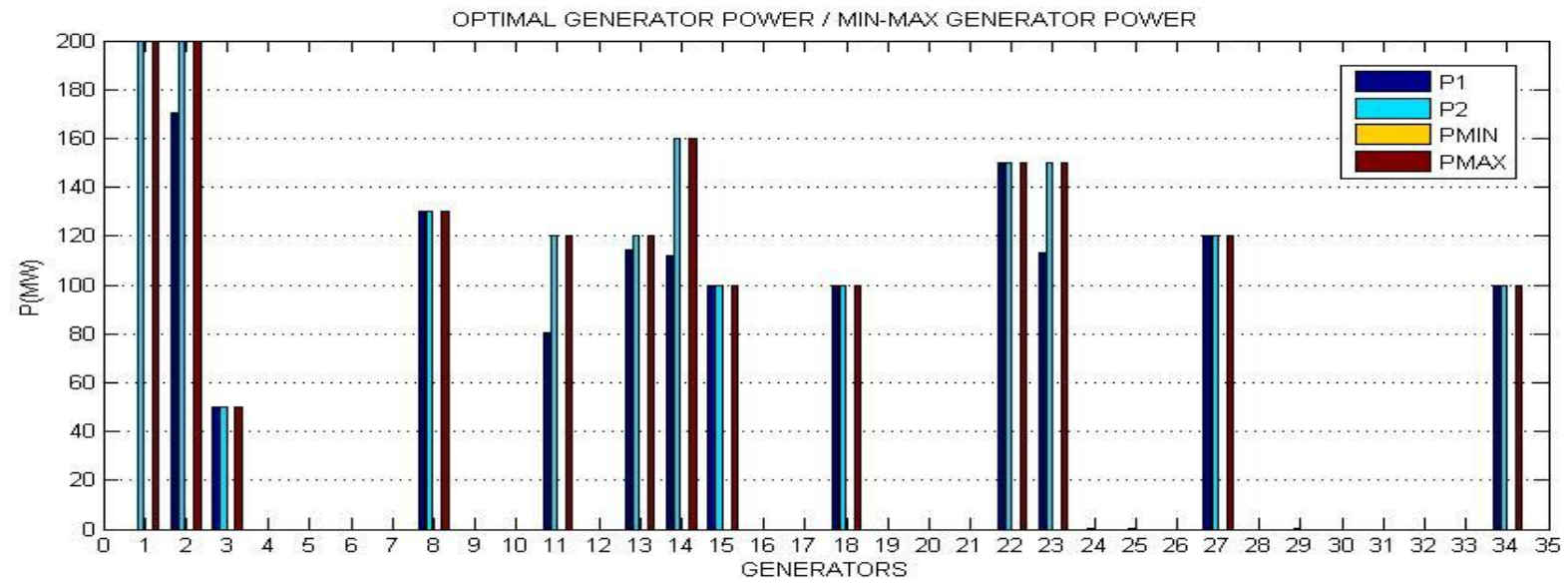
Οι γραμμές που θα προστεθούν είναι οι 31-1, 31-2, 32-1, 32-14, 32-23, 33-11, 34-10, 34-24 δηλ. 9 νέες γραμμές.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα οι γεννήτριες στην δεύτερη και Τρίτη περίοδο παράγουν το μέγιστο (σύνολο 1700MW) ενώ στην 1^η περίοδο το μισό (1340MW)

Τα αποτελέσματα για τα T, P, F και το κόστος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.65.







Σχήμα 5.65 : Βασικά Διαγράμματα για τα αποτελέσματα για T,P,F ,cost για case4-treksimo3-3p

5.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] R. Gallego, A. Monticelli, and R. Romero, "Transmission systems expansion planning by an extended genetic algorithms," *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 3, pp. 329-335, 1998.
- [5.2] I. Silva, M. Rider, R. Romero, C. Murari, "Genetic Algorithm of Chu and Beasley for Static and Multistage Transmission Expansion Planning" , *Power Engineering Society General Meeting 2006 IEEE*, 7pp., June 2006.
- [5.3] M. O. Buygi, "Transmission Expansion Planning in Deregulated Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19 No.4 , November 2004.
- [5.4] K R Payidar, R S Shanbhag, "Comparison of methods for transmission system expansion using network flow and DC load flow models", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol 10, No.1, Butterworth & Co (Publishers) Ltd, January 1988.
- [5.5] R S Chanda, P K Bhattacharjee, "Transmission Expansion Planning: A Fuzzy Linear Programming based Approach", *IE(I) Journal-EL*, November 5, 2001.
- [5.6] V. Levi, "A new mixed-integer methodology for optimal transmission expansion planning", *Electric Power Research* 32 (1995) 227-238, October 1994.
- [5.7] S. Haffner, A. Monticelli, A. Garcia, J. Mantovani, R. Romero, "Branch and bound algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model", *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 147, No. 3, May 2000

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε μια γενική υλοποίηση του προβλήματος της επέκτασης συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς. Ο κύριος στόχος της υλοποίησης αυτής είναι η υποστήριξη αποφάσεων σχετικά με τους κανονισμούς, τις επενδύσεις και την τιμολόγηση. Το πρόβλημα επέκτασης του συστήματος μεταφοράς με βάση το κόστος λειτουργίας και επένδυσης χωρίζεται σε δύο αλληλοσυνδεδεμένα προβλήματα : 1) το πρόβλημα του βέλτιστου δικτύου (optimum network problem) και 2) το υποπρόβλημα του δικτύου αναφοράς (reference network subproblem) που εμπεριέχεται στο πρόβλημα βέλτιστου δικτύου.

Η προτεινόμενη μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος στην εργασία αυτή, είναι ένας γενετικός αλγόριθμος ο οποίος εφαρμόζεται σε 2 συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ένα μικρό 6 ζυγών και ένα μεσαίο 30 ζυγών. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται ευρέως στο σχεδιασμό, τη λειτουργία και τον έλεγχο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στους γενετικούς αλγορίθμους και μια σύντομη επεξήγηση της χρήσης τους στον τομέα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και αναλυτικότερα στα συστήματα μεταφοράς της ενέργειας.

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου στα συγκεκριμένα συστήματα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, αποδείχθηκε ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να επιλύσουν σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε εύλογο χρονικό διάστημα και με μεγάλη αξιοπιστία. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει διαφορετικά σενάρια επέκτασης και ο αλγόριθμος να βρει το βέλτιστο από αυτά.

Το μοντέλο της επέκτασης του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αναπτυχθεί μέσω διαφόρων υπολογιστικών εργαλείων, από απλά υπολογιστικά φύλλα (spreadsheets) μέχρι και γλώσσες προγραμματισμού υψηλού επιπέδου. Επειδή απαιτείται η ανάλυση πολλών και σύνθετων σεναρίων και ο υπολογιστικός χρόνος έχει ιδιαίτερη σημασία, καθίσταται απαραίτητη η χρήση μιας γλώσσας προγραμματισμού υψηλού επιπέδου όπως η C, Fortran, Matlab, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα για υλοποίηση ενός user interface για την εισαγωγή- εξαγωγή δεδομένων από το χρήστη και τη συνεργασία με άλλα προγράμματα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα Matlab, η οποία μπορεί να υστερεί σε υπολογιστικούς χρόνους σε σχέση με άλλες γλώσσες αλλά έχει την ευχέρεια της ευκολότερης και γρηγορότερης υλοποίησης του μοντέλου εξαιτίας των συναρτήσεων που παρέχει για υλοποίηση και πράξεις μεταξύ πινάκων ή τα εργαλεία που διαθέτει για βελτιστοποίηση (optimization toolboxes).

Εκτός από τα θετικά της μεθόδου που αναπτύχθηκε, υπάρχουν και τα αρνητικά όσον αφορά την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, όπως το ότι δε συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο οι ωμικές απώλειες, δεν λαμβάνονται υπόψη πολλαπλές αστοχίες ή το κόστος από περικοπές φορτίου, δεν υπάρχει εγγύηση για τη σύγκλιση του αλγορίθμου λόγω εγγενών περιορισμών του προβλήματος και απουσιάζει η δυνατότητα για επανασχεδιασμό του υπάρχοντος συστήματος (όπου είναι εφικτό) ώστε να μειωθεί περισσότερο το κόστος. Επίσης

το ότι ο χρήστης είναι αυτός που προτείνει τα σενάρια επέκτασης μπορεί να είναι και μειονέκτημα, καθώς μπορεί να παραλειφθεί κάποιο σενάριο το οποίο να είναι βέλτιστο.

Από τα παραπάνω προκύπτει το ότι δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί ο συγκεκριμένος αλγόριθμος σε ρεαλιστικά παγκόσμια συστήματα μεταφοράς ενέργειας λόγω της απλούστευσης του προβλήματος. Τα εργαλεία αυτά δεν ικανοποιούν ακόμα τις πρακτικές απαιτήσεις των νέων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως δεν παύει ο συγκεκριμένος αλγόριθμος να είναι ένα πολύ χρήσιμο βοηθητικό εργαλείο για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Στη σημερινή εποχή το πρόβλημα επέκτασης δεν είναι μόνο πρόβλημα «βελτιστοποίησης» αλλά και «λήψης αποφάσεων».